

## DIFERENCIAS ENTRE BIOTIPOS EN EL RETRASO DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA EN RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Raúl ORTEGA<sup>(1)</sup>, Domingo ALCARAZ-SEGURA<sup>(2,1)</sup>, Andrés REYES<sup>(1)</sup>, Fernando S. RODRIGO<sup>(3)</sup>, Javier CABELLO<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Biología y Geología. Centro Andaluz para el Estudio y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG), Universidad de Almería. España.

<sup>(2)</sup> Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Universitario de Fuentenueva, 18071 Granada, España.

<sup>(3)</sup> Departamento de Química y Física, Centro Andaluz para el Estudio y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG), Universidad de Almería, España  
rortega@ual.es; dalcaraz@ugr.es; ard243@ual.es; frodrigo@ual.es; jcabello@ual.es

### RESUMEN

El 5º Informe del IPCC enfatiza en la distribución espacial heterogénea que los efectos del cambio climático (calentamiento global, olas de calor, sequías, inundaciones, etc.) tendrán a lo largo del planeta. Para la cuenca mediterránea, predicen a lo largo del siglo XXI una disminución de las precipitaciones entre el 12% (invierno) y el 24% (verano), y un calentamiento sustancial de entre 3.8°C (invierno) y 6°C (verano). La producción primaria es el descriptor más integrador del funcionamiento de los ecosistemas y ofrece una respuesta más rápida a los cambios ambientales que otros descriptores de la composición (especies) y estructura de los ecosistemas (relaciones entre las especies). Además, presenta la ventaja de que puede ser estimada mediante teledetección a escala regional utilizando índices espectrales de vegetación. El objetivo de este trabajo es caracterizar el control que la precipitación y la temperatura ejercen sobre la dinámica temporal de la producción primaria. Se evalúa si dos componentes de este control, la correlación y el retardo, varían en función de la leñosidad de la vegetación y a lo largo de gradientes climáticos en ecosistemas mediterráneos de Andalucía. Para ello, utilizamos series temporales para el período 2001-2012 del índice de vegetación mejorado (EVI: *Enhanced Vegetation Index*), derivadas del sensor MODIS-Terra, y de precipitación y temperatura, obtenidas de estaciones meteorológicas. Las estaciones se escogieron en un gradiente desde semi-árido a húmedo, y desde frío a cálido. A su vez se estableció un gradiente de leñosidad diferenciando cuatro tipos funcionales de plantas: Herbazales, Mezcla de herbazales y matorrales, Matorrales, y Árboles. Los análisis de correlaciones cruzadas de las series temporales permitieron caracterizar el retardo (efecto memoria) y los coeficientes de correlación (intensidad de las relaciones) de la respuesta del EVI a las variables climáticas. En general, la respuesta del EVI a la temperatura fue más rápida y más intensa que a la precipitación. En el gradiente de leñosidad, el EVI de los ecosistemas dominados por árboles presentaban mayor variabilidad en el retardo, mayores retardos, y menor correlación en la respuesta a ambas variables climáticas que los dominados por matorral o herbazal. En el gradiente de temperatura, se observó una ligera disminución en el

retardo al aumentar la temperatura, especialmente en los matorrales. En cambio, en el gradiente de precipitación, no se encontraron patrones direccionales en el retardo ni en la correlación. Nuestros resultados son de interés para la modelización del clima y para la gestión ya que caracterizan el retraso en las respuestas de distintos tipos de coberturas a los cambios en la dinámica temporal de la temperatura y la precipitación. Para la gestión, por ejemplo, la caracterización de la respuesta futura de la producción primaria a la dinámica presente del clima puede utilizarse como una herramienta de gestión. Así permitiría anticipar diferentes actuaciones de manejo en el medio plazo y priorizarlas en función del tipo de vegetación dominante y de las temperaturas medias del lugar.

**PALABRAS CLAVE:** Producción primaria; Efecto memoria; Correlación Cruzada, Gradiente de leñosidad; Gradiente climático.

## ABSTRACT

The Fifth IPCC report emphasizes on the worldwide spatial heterogeneous effects of climate change (climate warming, heat waves, droughts, floods). The Mediterranean basin is predicted along 21st century a decrease in rainfall of around 12% (winter) to 24% (summer) and a substantial warming of 3.8°C (winter) to 6°C (summer). Primary production is a good integrative descriptor of ecosystem functioning and provides faster response to environmental changes that other descriptors based on ecosystems composition (species) or structural changes (relationship between species) do not. One advantage is that it can be estimated by remote sensing at regional level using spectral vegetation indices. In this work our aim was to characterize in Andalusian Mediterranean ecosystems the control that precipitation and temperature exert on the temporal dynamics of primary production. It was evaluated variations in two control components, correlation and time lags, in different functional type plants and along climatic gradients. To do so we used time series of enhanced vegetation index (EVI) derived from MODIS sensor launched with TERRA satellite, and temperature and precipitation records from selected weather stations of the region for the period 2001-2012. Stations selected were representative to established gradients of precipitation (arid to humid) and temperature (cold to warm). To introduce woodiness gradient four functional types of plants were considered or selected (grassl, Mix of scrub and grass, Scrub, and Tree) Cross-correlation analysis of time series allowed us to characterize the time lag (memory effect) and correlation coefficients (intensity of relationships) of the response of EVI with climate variables. On a global scale the response of EVI to temperature was shorter and more intense than with precipitation. When considered a woodiness gradient forest ecosystems showed higher values and variability of time lags and lower correlations to climatic variables than grass and scrub ecosystems. Regarding to temperature gradient only has been found a slight decline in response delay with increasing temperature, especially for scrubs. However with precipitation gradient no directional patterns were found on time lags and correlations coefficients. Our results are relevant to climate modeling and management purposes as characterizes the time lags responses of different types of land covers

to changes in the temporal dynamics of temperature and precipitation. The characterization of the future response of primary production in function of the present climate dynamics can be an interesting management tool. This could permit to develop in a medium term different management actions prioritizing them based on the dominant vegetation type and mean temperature of the different locations.

**KEYWORDS:** Primary production; Memory effect; Cross-Correlation; Woodiness gradient; Climatic gradient.

## 1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de los estudios de los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas emplean modelos dinámicos de vegetación global que implícitamente asumen que clima y biosfera forman un sistema acoplado (Foley et al, 2000). Tradicionalmente, estos modelos asumen que dicho acoplamiento ocurre a escalas temporales cortas, lo que implica que la respuesta de los ecosistemas frente a los cambios ambientales oscila entre segundos y horas (Foley et al, 1998). A pesar de esta asunción general, existen numerosos trabajos que muestran que la respuesta de la vegetación a la variabilidad climática también puede revelarse a medio (desde días a meses) (Paruelo *et al*, 1999; Rui et al, 2014; Shao et al, 2014) y largo plazo (desde estaciones a años) (Chaturvedi et al, 2011; Forzieri et al, 2013; Jantsch et al, 2013; Sardans y Peñuelas, 2013), lo que sin duda complica las predicciones de cambios en el funcionamiento de los ecosistemas ante los escenarios de cambio climático.

La mayoría de los estudios que relacionan el clima con las respuestas de la vegetación no tienen en cuenta el efecto que las condiciones climáticas pasadas ejercen sobre los procesos ecosistémicos unos meses o incluso años después. Este efecto, conocido como memoria de los ecosistemas (Wiegand et al, 2004), puede ser particularmente importante en zonas semiáridas donde las disponibilidades hídricas anteriores, promediadas durante varios días, semanas e incluso años, pueden llegar a ser más importantes que las actuales (Paruelo et al, 2005). Existen mecanismos tanto abióticos (e.g. textura de los suelos) como bióticos (e.g. estado fisiológico de las plantas) que explican dicho efecto desde el nivel de ecosistema hasta el de individuo. En el primer caso, puede ser particularmente importante la capacidad de retención de agua en el suelo, tal y como puso de manifiesto Liras (2009) en ecosistemas del sureste ibérico, mientras que en el segundo, son muy relevantes las diferentes tasas fotosintéticas que muestran las especies (Ogle et al, 2010).

Una de las principales variables empleadas para modelar y validar la respuesta de la vegetación frente a los cambios en el clima, es la producción primaria. Este atributo es un buen descriptor del funcionamiento de los ecosistemas ya que ofrece una respuesta rápida a los cambios ambientales (Cabello et al, 2012a). La producción primaria presenta además, la ventaja de que puede ser estimada mediante teledetección a través de índices espectrales de vegetación tales

como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o el EVI (Enhanced Vegetation Index), lo que permite extender los análisis de la respuesta del funcionamiento de los ecosistemas a grandes extensiones. La relación entre la producción primaria y los índices espectrales puede ser establecida a través del modelo de Monteith (1972), ya que estos índices son estimadores lineales de la fPAR (fracción de la radiación fotosintéticamente activa que es interceptada por la vegetación) (Myneni et al., 1995; Sellers, 1985). Dicho modelo, establece que el fPAR junto con la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) representan determinantes fundamentales de la producción primaria (Monteith, 1972). Aunque la RUE también puede ser estimada de forma precisa incluso mediante teledetección (a través del Índice de Reflectancia Fotoquímica, PRI -Photochemical Reflectance Index- Garbulsky et al, 2014), en la práctica, los índices de vegetación representan por sí solos una buena aproximación al estudio de la respuesta del funcionamiento de los ecosistemas a los cambios ambientales, a escala de región.

El análisis del papel de la memoria de los ecosistemas en la relación a los cambios en el clima se ha centrado particularmente en el estudio de la respuesta frente a los cambios en la precipitación. En dichos trabajos la memoria se ha estimado a través del retraso en el tiempo que ocurre entre las precipitaciones y los cambios en la productividad, y los resultados obtenidos indican una gran variabilidad temporal en la respuesta en función del tipo de ecosistema y la región geográfica. Así, en el desierto del Kalahari y zonas de Sudán y el Sahel (Grist et al, 1997; Malo y Nicholson, 1990; Nicholson et al, 1990; Shinoda, 1995) al igual que en las zonas semiáridas del Oeste del continente (Philippon et al, 2007), se han identificado retardos de entre 1-2 meses. Algo parecido se ha encontrado en bosques tropicales caducifolios de India, en los que Prasad et al (2005), midieron retardos en la respuesta de en torno a un mes, o en los bosques de montaña del suroeste de Norteamérica (Forzieri et al, 2011) donde la respuesta era casi inmediata. Junto a estos hallazgos, también se han encontrado retardos mayores para otros ecosistemas, que en algunos casos llegan incluso al año. Richard et al (2008) y Martiny et al (2005) identificaron para zonas semiáridas de Sudáfrica un efecto memoria negativo (relación proporcionalmente inversa entre NDVI y precipitaciones) de entre 7-10 meses y positivo (relación proporcionalmente directa) a los 12-14 meses. Para el caso de las zonas semiáridas del Oeste de Norteamérica, Forzieri et al (2011) encontraron valores de retardos intermedios a los medidos en África (1-4 meses). Frente a esta proliferación de trabajos, los trabajos que tienen en cuenta la memoria de la productividad de la vegetación en relación a la temperatura, son escasos. Solo Forzieri et al (2011) han analizado esta relación observando que mientras que en los bosques de montaña del Oeste de Norteamérica que los retardos en relación a los cambios en la temperatura eran inferiores al mes, en las zonas desérticas estos retardos pueden llegar hasta los 2 meses, relacionándose además ambas variables de forma proporcionalmente inversa (memoria negativa).

Los trabajos referidos al papel de la memoria de los ecosistemas frente a los cambios en el clima en las zonas Mediterráneas son muy escasos. En éstas áreas, caracterizadas por una dinámica anual de la precipitación y temperatura desacoplada, la memoria puede jugar un papel determinante para comprender su respuesta frente al cambio climático. Sólo la aproximación

realizada por Cabello et al (2012a), basada en el estudio de las variaciones en las tendencias intra-anales del índice espectral EVI, ha mostrado avances en este sentido. Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la importancia de los cambios en la distribución estacional en la precipitación y temperatura en éstas áreas sobre la productividad primaria de la vegetación. En estas zonas la estructura y composición de la vegetación son especialmente vulnerables al cambio climático ya que reciben las precipitaciones justas para soportar herbazales, matorrales y bosques abiertos (Woodward, 1987). Este trabajo persigue caracterizar la intensidad y el retardo que muestra la dinámica temporal de la producción primaria de la vegetación mediterránea en relación al control que ejercen sobre ella la precipitación y la temperatura. Así mismo, evaluamos si dicho control varía en función de la leñosidad de la vegetación y a lo largo de gradientes climáticos. Para ello planteamos las siguientes preguntas e hipótesis guía: 1) ¿está la dinámica de la producción primaria la dinámica de los ecosistemas mediterráneos más determinada por (más correlacionada con) por la dinámica de la temperatura o por la de la precipitación?; 2), ¿es tiempo que tarda en responder la vegetación mediterránea ante las variables climáticas mayor para la temperatura o para la precipitación?; 3) ¿muestran los tipos de vegetación comportamientos diferentes en relación a la memoria para responder con mayor retardo ante las variables climáticas en función de su grado de leñosidad y biotipo?; 4) ¿varía este comportamiento a lo largo del gradiente climático? Para atender a estas cuestiones evaluamos en el ámbito de los ecosistemas andaluces: 1) las diferencias entre tipos funcionales de plantas que representan un gradiente de leñosidad, en el retardo e intensidad de la respuesta del EVI con la precipitación y la temperatura; y 2) la existencia de cambios en la respuesta de estos tipos de vegetación a lo largo de gradientes climáticos de temperatura y precipitación.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

La elevada diversidad climática y de ecosistemas en Andalucía permiten considerar esta zona como un excelente laboratorio natural donde evaluar cómo varía la producción primaria de diferentes tipos estructurales de vegetación ante los controles climáticos. La región cuenta con una gran diversidad de bioclimas de tipo mediterráneo (Rivas-Martínez, 1987), y en términos de diversidad de tipos de vegetación, es una de las regiones con mayor concentración de hábitats de interés comunitario de Europa (ver Fichas Tipos de Hábitat de Interés Comunitarios de España en <http://www.magrama.gob.es/>).

### 2.2. Imágenes de satélite, datos climáticos y mapas de vegetación empleados

Como indicador de la producción primaria empleamos una serie temporal de imágenes de satélite para el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, del inglés, *Enhanced Vegetation Index*) procedente del sensor MODIS del satélite TERRA de la NASA (producto MOD13Q1). La serie temporal de imágenes empleada abarcó el periodo 2001-2012 con una resolución temporal de 16 días (23 valores por año) y espacial de unos 230x230 m. Para evitar la influencia de valores espurios, utilizamos la información de las bandas de calidad “QA” de los productos MODIS para eliminar los datos con contenido medio y alto de aerosoles, y presencia de nubes, hielo, nieve, sombras, o valores negativos .

Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron de estaciones meteorológicas de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (Figura 1). Se seleccionaron 20 estaciones meteorológicas cubriendo un gradiente de precipitación anual entre 204 a 869 mm y de temperatura media anual de 11.0 a 18.6 °C. Las series temporales diarias originales fueron transformadas en resúmenes de 16 días coincidiendo con la resolución temporal de las imágenes de EVI. Cuando no se disponía de más de 2 datos diarios en los resúmenes de 16 días se le asignó la etiqueta “Sin datos” en los análisis.

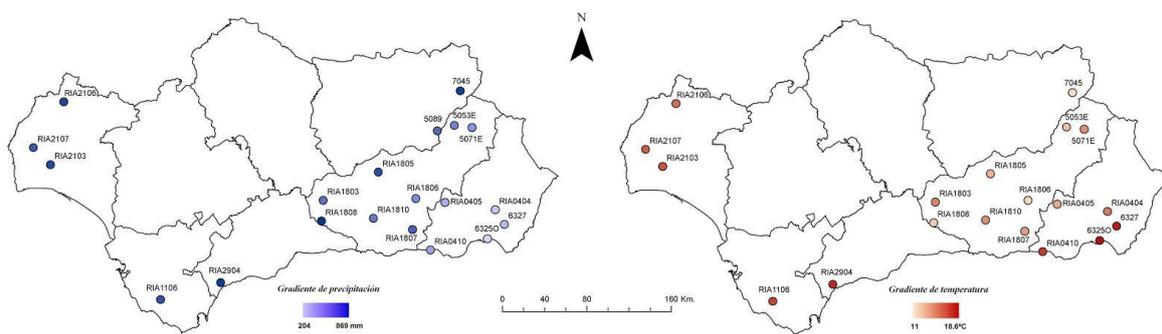


Figura 1. Localización de estaciones meteorológicas de la Red de Información Agroalimentario de Andalucía (RIA) y de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) empleadas en el estudio. Los puntos muestran escalas de color según los gradientes de temperatura (11-18.6°C) y precipitación (204-869 mm). Nombre estaciones: 5053E Castril, Las Pocas; 5071E Huescar, ICONA; 5089 Pozo Alcon, El Hornico; 6325O Almeria, Aeropuerto; 6327 Nijar; 7045 Pontones, C.H. Segura; RIA0404 Tabernas; RIA0405 Fiñana; RIA0410 Adra; RIA1106 Vejer de la frontera; RIA1803 Loja; RIA1805 Iznalloz; RIA1806 Jerez del Marquesado; RIA1807 Cádiar; RIA1808 Zafarraya; RIA1810 Padul; RIA2103 Gíbraleón; RIA2106 Aroche; RIA2107 Puebla de Guzmán; RIA2904 Estepona.

A partir de la información derivada por la Junta de Andalucía en su Cartografía y evaluación de la vegetación de la masa forestal de Andalucía a escala de detalle 1:10.000, año 1996-2006, reagrupamos la leyenda del mapa de vegetación en torno a cuatro tipos funcionales de plantas que conformaban un gradiente de leñosidad: 1) Herbazales, 2) Mezcla de herbazales y matorrales, 3) Matorrales, y 4) Árboles.

La selección de los píxeles de las imágenes EVI se realizó siguiendo los siguientes criterios: 1) distancia a alguna estación meteorológica < 5 km; ii) diferencia altitudinal respecto de la estación < 200 m; iii) cobertura de uno de los cuatro tipos funcionales de vegetación superior a un 70% en la superficie del píxel. (Cabello et al, 2012a). Debido a que la selección de los píxeles se basó en información de vegetación del año 2006, tuvimos en cuenta posibles cambios en los usos con posterioridad a esa fecha. Así, descartamos aquellos píxeles que no estaban dominados en al

menos un 70% de su superficie por un mismo tipo de uso del suelo en el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España en Andalucía para el año 2009 (Romero et al., 2010), y aquellos que no estaban dominados por vegetación natural en las últimas ortoimágenes disponibles en Google Earth para mayo de 2014.

### 2.3. Análisis de los datos

Para evaluar el retardo y la intensidad en la respuesta de la producción primaria ante las variaciones climáticas, se empleó la Función de Correlación Cruzada (CCF) entre la serie temporal de EVI de cada píxel y las correspondientes de temperatura y precipitación según la estación meteorológica para el periodo 2001-2012. Para ello se empleó la función “ccf” del paquete “stats” de R (versión 3.0.2). Esta técnica calcula coeficientes de correlación de Pearson entre series temporales a medida que incluye desfases temporales ( $n$  compuestos =  $n \cdot 16$  días) de una variable (temperatura o precipitación) sobre otra (EVI). Posteriormente extrajimos para cada píxel el retardo con el mayor coeficiente de correlación positivo observado para la relación EVI-precipitación y negativo para la relación EVI-temperatura.

Utilizamos gráficos de boxplot para representar por un lado la memoria de la respuesta (retardos) y su intensidad (coeficientes de correlación), teniendo en cuenta además las diferencias según tipos funcionales de plantas (gradiente de leñosidad) y a lo largo de un gradiente climático (localizaciones de las estaciones). En estos gráficos el eje y representa los retardos (en números de compuestos de 16 días cada uno) o los máximos coeficientes de correlación obtenidos a escala de píxel. En el eje x se indicó como se organizaron los píxeles.

Para evaluar si existen diferencias entre los tipos funcionales de plantas en la respuesta del EVI a las variables climáticas realizamos un test de medianas de Moods con la función “Median.test” del paquete “agricolae” de R (version 3.0.2), que es un test no paramétrico que se usa para comparar la mediana de 2 o más poblaciones, siendo bastante robusto a datos con outliers.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Diferencias en la respuesta del EVI a las variables climáticas

En la Figura 2 se muestra el rango de valores obtenidos para el retardo (a y b) y la intensidad (c y d) de la respuesta del EVI a la precipitación y la temperatura para todos los píxeles seleccionados en el área de estudio. Los boxplots se han construido con los retardos en los que se consiguieron los máximos coeficientes de correlación entre las series temporales de EVI y de las variables climáticas, aplicando desfases entre las series. La mediana de los retardos para la relación EVI-Precipitación (a) fue de -3 ( $3 \times 16 = 48$  días) mientras que para la relación EVI-Temperatura (b) fue de -2 ( $2 \times 16 = 32$  días). En relación a la intensidad de la respuesta si se encontraron mayores diferencias. La mediana para los coeficientes de correlación entre el EVI y la precipitación (c) fue de 0.34, mientras que para el EVI y la temperatura (d) fue de -0.60. Los signos indican que la relación entre el EVI y precipitación era proporcionalmente directa y entre el EVI y la temperatura proporcionalmente inversa.

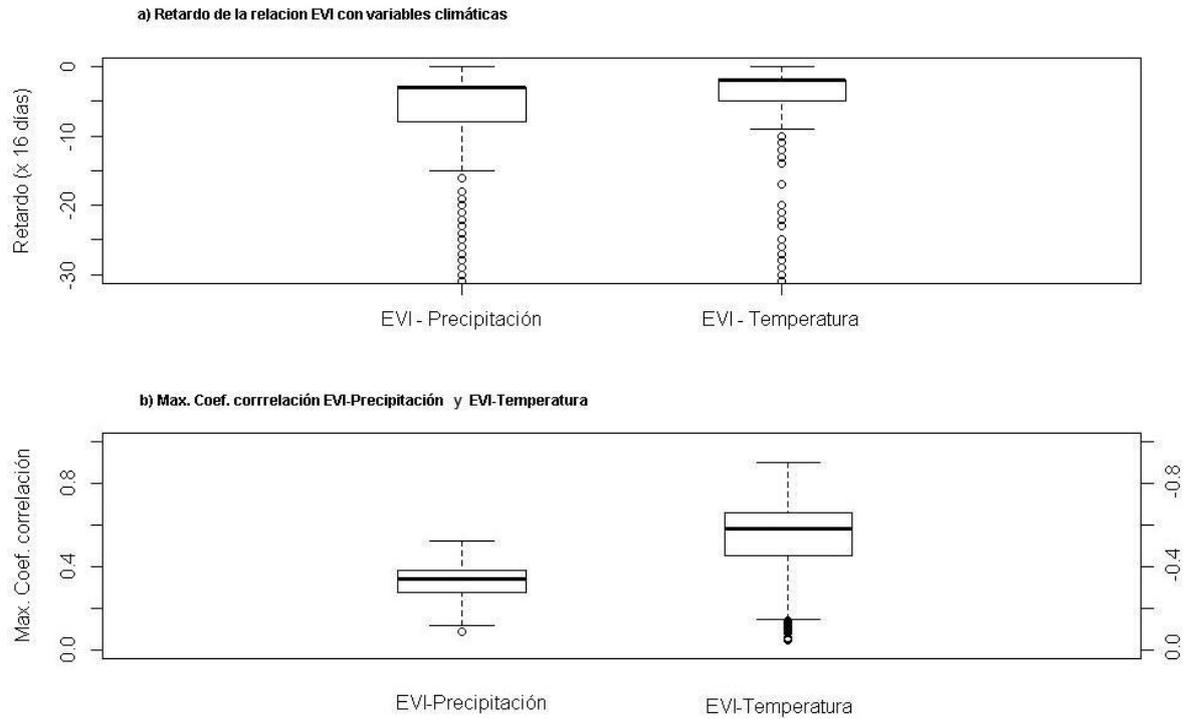


Figura 2. Boxplots de la respuesta de la producción primaria a la precipitación y la temperatura. El eje y representa los retardos (en números de compuestos de 16 días cada uno) (a) con los máximos coeficientes de correlación (b) obtenidos a escala de píxel mediante la técnica de correlación cruzada. En el apartado b los coeficientes de correlación negativos para la relación EVI-temperatura se muestran en el eje y de la derecha. La línea central representa la mediana, las cajas incluyen el 50% de los datos entre los cuartiles primero y tercero y los bigotes incluyen aquellos valores que se alejan del primer o tercer cuartil, una distancia inferior a 1.5 veces la amplitud intercuartil (longitud del intervalo que contiene el 50% central de los individuos de la distribución). Aquellos valores superiores a 1.5 veces el rango intercuartil se representan como círculos.

### 3.2. Diferencias en la respuesta del EVI a las variables climáticas según tipos funcionales de vegetación (gradiente de leñosidad)

En la figura 3 se muestran los rangos de valores obtenidos para el retardo y la intensidad de la respuesta del EVI a la precipitación y la temperatura agrupando los píxeles en cuatro tipos funcionales de plantas (herbazal, mezcla de matorral y herbazal, matorral y árboles. Los tipos de plantas se muestran ordenados según un gradiente de leñosidad de menor a mayor porte leñoso. Para comprobar si existen diferencias entre los grupos se realizó un Test de Medianas de Mood

DIFERENCIAS ENTRE BIOTIPOS EN EL RETRASO DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA  
EN RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

(Tabla 1). Se utilizó este test en vez de un ANOVA ya que la mediana es un factor estadístico más robusto que la media frente a valores extremos.

Tipos funcionales vegetación	Retardos EVI- Precip. Chi. Sq = 37.04, p-Value =4.50E-08		Coef. Correlacion EVI-Precip. Chi Sq= 481.93, p- Value= 3.92E-104		Retardos EVI- Temp. Chi Sq= 40.07, p-Value= 1.03E-08		Coef. Correlación EVI-Temp. Chi Sq= 242.51, p- Value= 2.71E-52		
	Grupos	n° pixeles	Mediana	Similitud grupos	Mediana	Similitud grupos	Mediana	Similitud grupos	Mediana
Herbazales	439	-3	a	0.37	a	-2	a	-0.68	a
Mezcla	1552	-3	b	0.36	b	-2	b	-0.61	b
Matorrales	232	-4	a	0.33	c	-3	a	-0.58	c
Árboles	852	-10	c	0.26	d	-3	b	-0.47	d

Precip: Precipitación, Temp: Temperatura, Chi. Sq = Chi Square, n° = número. Mezcla: mezcla de herbazal y matorral.

Tabla 1. Test de medianas de Mood para los retardos EVI-Precipitación y EVI-Temperatura según tipos funcionales de vegetación.

A excepción de la mediana de los retardos entre el EVI y la precipitación para los árboles (Me=-10), el retardo en la respuesta entre el EVI y las variables climáticas para los otros grupos varía entre -2 y -4 (aproximadamente entre 1 y 2 meses) observándose un ligero adelanto de una unidad en la influencia de la temperatura (Tabla 1).

Según el test de medianas de Mood los retardos en los grupos herbazal-matorral y mezcla-árboles no se diferencian en las relaciones EVI-temperatura. En cambio en las relaciones EVI-precipitación sólo se observaron semejanzas entre herbazal y matorral. Sin embargo en la respuesta a lo largo del gradiente de leñosidad (figura 3.a y 3.b) se observó que para herbazales y mezcla los datos estaban bastante agrupados (rango intercuartil pequeño), mientras que para los matorrales y las arboledas la variabilidad de las respuestas se iba haciendo mayores (rangos intercuartiles más grandes).

Respecto la intensidad de la respuesta, medida a través de los coeficientes de correlación, todos los tipos funcionales de plantas presentaron diferencias entre todos los grupos según el Test de Mood (Tabla 1) en las relaciones del EVI con ambas variables climáticas. Cabe destacar que en todos los grupos los coeficientes de correlación obtenidos para las relaciones EVI-temperatura (Me entre -0.47 y -0.68) fueron entre 0.2 a 0.3 puntos en valor absoluto superiores a los coeficientes de EVI-Precipitación (0.26-0.37). Examinando las respuestas a lo largo del gradiente

de leñosidad (Figura 3.c y 3.d) se observó que a medida que los tipos de vegetación definidos presentaban más porte leñoso los coeficientes de correlación disminuían (en valor absoluto). En cuanto a la variabilidad en la intensidad de las respuestas (rangos intercuartiles) se observó que eran más pequeñas para las relaciones del EVI con la precipitación que con la temperatura.

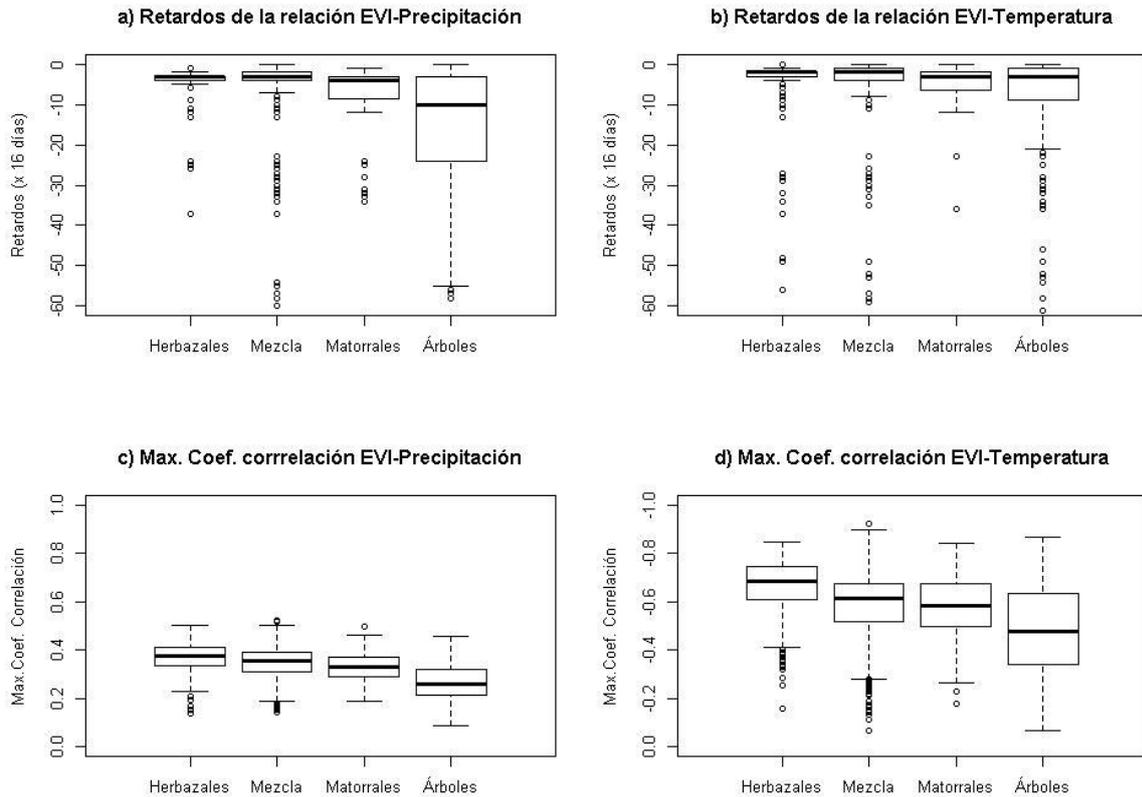


Figura 3. Boxplots de las diferencias en las respuestas de la producción primaria de los tipos funcionales de vegetación a las precipitación y temperatura. El tipo Mezcla hace referencia a la mezcla de herbazales y matorrales. El eje y representa los retardos (en números de compuestos de 16 días cada uno) (a y b) con los máximos coeficientes de correlación (c y d) obtenidos a escala de píxel mediante la técnica de correlación cruzada. La línea central representa la mediana, las cajas incluyen el 50% de los datos entre los cuartiles primero y tercero y los bigotes incluyen aquellos valores que se alejan del primer o tercer cuartil, una distancia inferior a 1.5 veces la amplitud intercuartil (longitud del intervalo que contiene el 50% central de los individuos de la distribución). Aquellos valores superiores a 1.5 veces el rango intercuartil se representan como círculos.

### 3.3. Diferencias en la respuesta del EVI de los tipos funcionales de vegetación frente a las variables climáticas a lo largo de un gradiente de precipitación y temperatura

Para analizar si los resultados anteriores variaron en diferentes localizaciones a lo largo de climático que tiene lugar en Andalucía, agrupamos los píxeles por tipos funcionales de vegetación y por estaciones climáticas. A continuación representamos en unos boxplot los valores obtenidos de las correlaciones cruzadas entre las series temporales de EVI y de las variables climáticas. En el eje  $y$  se representaron los valores de los retardos o de los coeficientes de correlación y en eje  $x$  se colocaron las estaciones climáticas ordenadas formando gradientes climáticos de precipitación y temperatura, de izquierda a derecha de menor a mayor valor anual medio de las estaciones. En la figura 1 se indican los gradientes de precipitación y temperatura que forman las estaciones climáticas seleccionadas.

Al analizar los boxplot no se apreciaron que las diferencias entre estaciones para el gradiente de precipitación mostraran algún tipo de patrón característico para ningún tipo de vegetación. Sólo con respecto a la temperatura podía apreciarse una ligera disminución del retraso a medida que aumentaba la temperatura media de las estaciones, principalmente en los matorrales (Figura 4.a). En cuanto a los coeficientes de correlación (Figura 4.b) no se apreció ninguna tendencia a lo largo del gradiente térmico. En posteriores estudios se analizarán en más detalle posibles patrones a lo largo de gradientes climáticos.

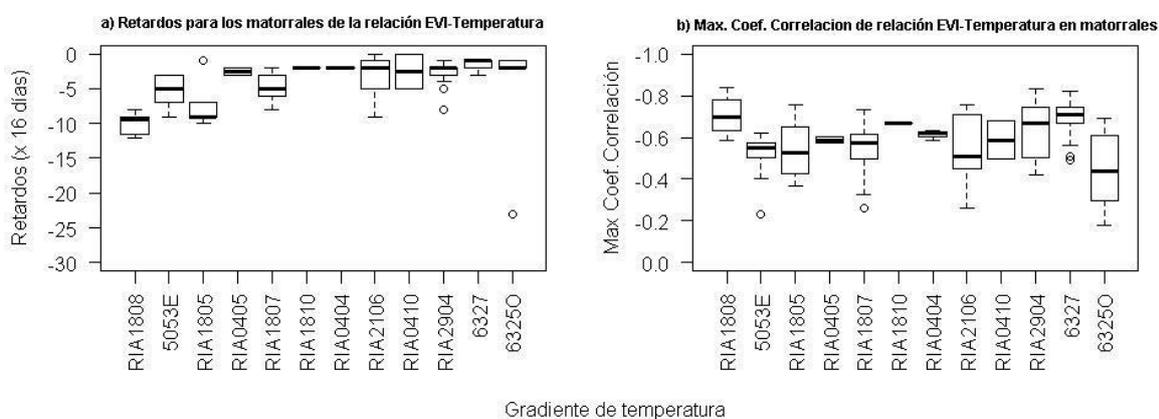


Figura 4. Boxplots de las diferencias en las respuestas del matorral según estaciones climáticas ordenadas conformando un gradiente de temperatura. El eje Y representa los retardos (a) (en números de compuestos de 16 días cada uno) con los máximos coeficientes de correlación (b) obtenidos, mediante la técnica de correlación cruzada, para las relaciones EVI-Temperatura solo para los píxeles de matorral. Los píxeles se agruparon en torno a su estación meteorológica de referencia representadas en el eje x de menor a mayor temperatura anual media. La línea central representa la mediana, las cajas incluyen el 50% de los datos entre los cuartiles primero y tercero y los bigotes incluyen aquellos valores que se alejan del primer o tercer cuartil, una distancia inferior a 1.5 veces la amplitud intercuartil (longitud del intervalo que contiene el 50% central de

los individuos de la distribución). Aquellos valores superiores a 1.5 veces el rango intercuartil se representan como círculos.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Retardos en la respuesta de la producción primaria a las variables climáticas en ecosistemas mediterráneos

Los modelos de cambio climático para la Cuenca mediterránea predicen a lo largo del siglo XXI una disminución de las precipitaciones, en torno al 12% (invierno) y al 24% (verano), y un calentamiento substancial de 3.8°C (invierno) a 6°C (verano) (Fundación Biodiversidad, 2013). Conocer como los tipos funcionales de plantas responden a las variables climáticas y a sus variaciones supone un gran reto científico especialmente en un escenario de cambio climático. Sin embargo, esta respuesta es compleja y varía entre comunidades vegetales según su capacidad de memoria. Cabello et al (2012a) encontraron que hay factores tanto abióticos (e.g. litología) como bióticos (e.g. estructura de la vegetación) que influyen en la disponibilidad de los recursos hídricos para las plantas y por tanto afectarán a su capacidad de memoria. Además se ha comprobado que las respuestas varían espacialmente por lo que es necesario su estudio en diferentes regiones climáticas (Paruelo y Laueronth, 1998; Fang et al, 2001).

Los análisis de correlaciones cruzadas de series temporales resultaron ser en este estudio una buena herramienta para caracterizar el grado de influencia de las variables climáticas sobre el índice EVI (utilizado como un proxy de la productividad primaria) y el retardo en la respuesta en ecosistemas mediterráneos de Andalucía. Para todos los píxeles estudiados se observó que los retardos del EVI con la precipitación (Me = -3 compuestos ~1.5 meses) y la temperatura (Me = -2 compuestos ~1 mes) son similares (Figura 2.a), indicando una respuesta temporal corta del EVI a las variables climáticas. En cuanto a la intensidad de la respuesta, expresada mediante los coeficientes de correlación pueden hacerse dos observaciones. Por un lado el signo positivo de las relaciones EVI-precipitación indicaron el efecto beneficioso de las precipitaciones sobre la productividad primaria, mientras que la relación negativa EVI-Temperatura mostraron el importante efecto limitante que sobre la productividad ejercen las altas y bajas temperaturas en la zona de estudio. Por otro lado los coeficientes de correlación fueron ostensiblemente superiores para la relación EVI-Temperatura (Me= -0.60) que para la relación EVI-Precipitación (Me=0.34). Esto puede ser explicado por el hecho de que las plantas obtienen del suelo el agua de las precipitaciones, lo que provoca un mayor retardo y mayor variabilidad en la relación EVI-precipitación (Eisfelder et al, 2014). La heterogeneidad del suelo hace que fueran necesario considerar otras variables (e.g. litología, textura) para obtener unos coeficientes de correlación más elevados (Cabello et al, 2012a). Por otro lado la temperatura está mediada por la atmósfera, la cual resulta bastante homogénea para las plantas. Esto explicaría que la intensidad de la relación de la temperatura con el EVI fuera cerca de 0.3 puntos superior que con la

precipitación. Así, estos resultados indican que en Andalucía la temperatura es un mejor predictor de la producción primaria que la precipitación.

Los retardos del EVI en relación a la precipitación medidos en este trabajo entran en el rango de valores obtenidos para zonas áridas y semiáridas de Africa (Grist et al, 1997; Malo y Nicholson, 1990; Nicholson et al, 1990; Philippon et al, 2007; Shinoda, 1995) y del Oeste de Norteamérica (Forzieri et al, 2011). En relación a los retardos del EVI con la temperatura son escasos los trabajos realizados. En el último estudio mencionado (Forzieri et al, 2011) si analizaron esta relación en zonas áridas y bosques de montaña de EEUU y su rango de resultados entra dentro de los presentados en este estudio tanto en los retardos como en la relación proporcionalmente inversa de los coeficientes de correlación.

#### 4.2. El papel de los tipos funcionales de vegetación en el retardo en la respuesta de la producción primaria frente a las variables climáticas

En este apartado analizamos la respuesta de diferentes tipos funcionales de plantas que conforman un gradiente de leñosidad a la precipitación y temperatura. En primer lugar analizamos las diferencias entre los diferentes tipos de vegetación mediante los resultados del test de medianas (Tabla 1). Para todos los tipos, excepto los árboles, la vegetación mediterránea mostraba un retardo en la respuesta frente la temperatura de 1-1.5 meses, mientras que a la precipitación responden en un periodo de 1.5-2 meses. Así por ejemplo no encontramos diferencias en las medianas entre herbazales y matorrales, pero el grupo resultante de estos dos tipos de vegetación (mezcla) si presentaba diferencias con estos grupos. Por otro lado, las diferencias entre los grupos, a excepción de los árboles, en la relación EVI-precipitación muestran como máximo una unidad. Dentro del mismo grupo de vegetación, la respuesta con la temperatura observada ha sido de una unidad menor que con la precipitación.

Por otro lado en la figura 3 se mostraron la distribución y amplitud de las respuestas para las relaciones EVI-precipitación (a) y EVI-temperatura (b) según grupos de vegetación ordenados de menor a mayor porte leñoso. Aunque también se apreciaron las escasas diferencias en las medianas indicadas anteriormente, se observó además que el rango intercuartil aumentaba a lo largo del gradiente de leñosidad, indicando que la respuesta tiende a hacerse más lenta y heterogénea. Esto puede explicarse en el caso de la precipitación debido a que a mayor porte leñoso las plantas poseen mayores sistemas radiculares y por tanto pueden profundizar más y explorar más volumen de suelo en busca de agua, mientras que los herbazales pueden presentar respuestas fenológicas más plásticas a la variabilidad de las precipitaciones (Jenerette et al, 2011). En relación a la temperatura, igualmente a mayor porte leñoso los grupos funcionales de plantas poseen mecanismos más eficientes de transpiración y de conductancia hidráulica para regular el efecto de las altas temperaturas (Lipiec et al, 2013).

Estos resultados tienen especial interés ya que ponen de relieve que existen unos tipos de biomas con mayor independencia de la variabilidad climática en términos de producción. Así, los

herbazales podrían ser más susceptibles a los efectos del cambio climático que los otros tipos de vegetación. En este tipo de ecosistemas una medida apropiada para luchar contra los efectos del cambio climático sería favorecer los procesos de sucesión vegetal para que pudieran instalarse matorrales. Esto aumentaría la resiliencia de los ecosistemas (Nippert et al, 2013), ya que se producirían cambios en la distribución vertical de las raíces (Schenk y Jackson, 2002), alterándose los balances de agua y carbón en los ecosistemas (Scott et al, 2009).

En relación a la intensidad de la respuesta todos los grupos se diferenciaban entre sí según el test de medianas y además se observaba que los coeficientes disminuían a lo largo del gradiente de leñosidad (Figura 3.c y 3.d) siendo igualmente mayores para la relación EVI-temperatura que para la relación EVI-precipitación. Esto último podía explicarse, como se ha indicado en el apartado anterior, por las interacciones atmósfera planta y suelo planta en la temperatura y precipitación respectivamente. Además, el hecho de que los coeficientes de correlación disminuyan a lo largo del gradiente de leñosidad refuerza lo comentado anteriormente acerca de que las plantas con más grado de leñosidad pueden independizarse más de las variables climáticas.

En definitiva la respuesta de la producción primaria de los diferentes tipos funcionales de plantas a la precipitación y temperatura está claramente influenciada por el gradiente de leñosidad. En cuanto al retardo en la respuesta se observó un aumento de la variabilidad tendente a retrasar la respuesta a medida que los tipos funcionales de plantas presentaban más porte leñoso. En cambio la intensidad de la respuesta disminuyó a lo largo de dicho gradiente. Esto puede explicarse porque a medida que las plantas tienen más porte leñoso presentan raíces de mayor porte unidas a partes aéreas más desarrolladas lo que les permite a las plantas conseguir más reservas hídricas y refrigerarse mejor lo que les permiten no ser tan dependientes de las variables climáticas a corto plazo ni ser tan influidos por las mismas.

#### 4.3. Respuesta de la producción primaria de los diferentes tipos de vegetación en diferentes localizaciones estableciendo gradientes de temperatura y precipitación.

En este apartado se estudió las variaciones en las respuestas del EVI a las precipitaciones y temperaturas a lo largo de gradientes climáticos establecidos a partir de localizaciones con diferentes precipitaciones y temperaturas medias anuales. Este análisis pretendía servir como un experimento para estudiar los posibles efectos del cambio climático sobre la producción primaria en los ecosistemas. Sin embargo, en los boxplot no encontramos ningún patrón definido para los tipos funcionales de planta a lo largo del gradiente de precipitación. Una posible explicación a este comportamiento podría encontrarse en que la vegetación alrededor de cada estación climática se encuentre adaptada a las condiciones particulares de aridez de cada zona (Chaves et al, 2003), lo que hace que la respuesta sean específicas en cada localización.

En el caso del gradiente de temperatura parecía observarse una tendencia hacia la disminución en el retardo de la respuesta en algunos tipos de vegetación, especialmente en los matorrales,

conforme se incrementaba la temperatura media anual de las localizaciones (Figura 4.a). Consideramos que esta tendencia era más apreciable en los matorrales debido a la alta diversidad de especies que se agrupan bajo este grupo de vegetación y que podía estar provocada por el efecto que la temperatura tiene sobre la evapotranspiración, disminuyendo los recursos hídricos para las plantas (Thavorntam y Tantemsapya, 2013), y por tanto éstas necesitan responder más rápidamente a las variables climáticas. En un estudio de Gea-Izquierdo y Cañellas (2014) en encinares de la península ibérica distribuidos a lo largo de gradientes climáticos han comprobado que desde 1970, coincidiendo con incrementos en las temperaturas, la producción de los bosques comenzó a disminuir excepto en las zonas más frías donde los valores de evapotranspiración son menos elevados.

## 5. CONCLUSIONES

La evaluación del impacto del cambio climático sobre los ecosistemas representa un desafío para la investigación ecológica en la actualidad. El 5º Informe del IPCC enfatiza en la distribución heterogénea de los efectos del cambio climático a lo largo del planeta, lo que da lugar a una diversidad de respuestas en los ecosistemas frente a éste impulsor de cambio global. Dicha diversidad se debe a que los cambios en el clima sobre la biodiversidad y los ecosistemas varían en función de la magnitud y la temporalidad de los cambios en la precipitación y temperatura, y de la capacidad de los ecosistemas para amortiguarlos. En este trabajo hemos caracterizado el control que la precipitación y la temperatura, y los tipos funcionales de vegetación ejercen en el retardo y la intensidad de la respuesta de la dinámica temporal de la producción primaria en ecosistemas mediterráneos. Nuestros resultados sugieren que dichos retardos y su intensidad difieren entre la precipitación y la temperatura. Así, mientras que en el primer caso hemos identificado retardos de 1 a 1.5 meses e intensidades (coeficientes de correlación) de -0.48 a -0.68, en el segundo lo fueron de 1.5 a 2 meses y de 0.26 a 0.37. Esta diferencia en la respuesta, y por tanto, en el papel de la memoria del ecosistema, puede ser explicada en función del medio en el que tiene lugar la interacción entre las plantas y las variables físicas que definen el clima de una región. Mientras que la interacción con la temperatura se ejerce fundamentalmente a nivel de hoja en la atmósfera, el efecto de las precipitaciones tiene lugar a nivel de raíz, y está mediado por la disponibilidad de agua útil para la planta en el suelo. El resultado es un mayor retraso y una reducción en la intensidad de la respuesta de los ecosistemas mediterráneos frente a la precipitación que frente a la temperatura. En ambos casos, la leñosidad de la vegetación parece desempeñar un papel fundamental, sin embargo, no hemos encontrado cambios en la respuesta de la producción primaria a lo largo de un gradiente climático. Como resultado, podemos concluir que a corto plazo, la temperatura puede considerarse un mejor predictor de la producción primaria que la precipitación, lo que debería ser tenido en cuenta para modelizar la respuesta de los ecosistemas frente a los efectos del cambio climático. Consideramos que estos resultados pueden guiar las políticas de conservación y ordenación del territorio a escala regional, así como ayudar a la construcción de modelos dinámicos de la respuesta de la vegetación frente al cambio climático, y del control éste sobre la dinámica del carbono.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiada por los proyectos “Controles ambientales de la variabilidad espacial y temporal de la dinámica de la producción primaria en ecosistemas mediterráneos: una aproximación basada en índices espectrales de vegetación” del Plan Nacional I+D del Ministerio de Ciencia y Tecnología, los Fondos FEDER a través del proyecto “SEGALERT P09–RNM-5048” de la Consejería de Innovación y Ciencia, y el programa de la Consejería de Medio Ambiente para el Desarrollo de indicadores para el seguimiento del cambio global en ecosistemas semiáridos del Levante Andaluz (Proyecto GLOCHARID) de la Junta de Andalucía.

## 7. REFERENCIAS

Cabello, J.; Alcaraz-Segura, D.; Ferrero, R.; Castro, A.J. y Liras, E. (2012a). 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 Environment*, 79, pp. 76-83.

Cabello, J.; Fernández, N.; Alcaraz-Segura, D.; Oyonarte, C.; Altesor, A.; Piñeiro, G.; Delibes, M. y Paruelo, J. (2012b). The ecosystem functioning dimension in conservation biology: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, 21, pp. 3287-3305.

Camberlin, P.; Martiny, N.; Philippon, N. y Richard, Y. (2007). Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sens. Environ.*, 106, pp.199– 216.

Chaturvedi, R.K.; Gopalakrishnan, R.; Jayaraman, M.; Bala, G.; Joshi, N.V.; Sukumar, R.; Ravindranath, N.H. (2011). Impact of Climate Change on Indian Forests: A dynamic vegetation modeling approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(2), pp. 119-142.

Chaves, M.M.; Maroco, J.P. y Pereira, J.S (2003). Understanding plant responses to drought. From genes to the whole plant. *Funct Plant Biol*, 30(3), pp.239–264.

Consejería de medio ambiente (2007). *Cartografía y evaluación de la vegetación de la masa forestal de Andalucía a escala de detalle 1:10.000, año 1996-2006*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Eisfelder, C.; Klein, I.; Niklaus, M. y Kuenzer, C (2014). Net primary productivity in Kazakhstan, its spatio-temporal patterns and relation to meteorological variables. *Journal of Arid Environments*, 103, pp. 17-30.

Fang, J. Y.; Piao, S. L.; Tang, Z. Y.; Peng, C. H. y Ji, W. (2001), Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 293, pp.1723.

Foley, J. A.; Levis, S.; Prentice, I. C.; Pollard, D.; y Thompson, S. L. (1998). Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 4, pp. 561–579.

Foley, J.; Levis, S.; Costa, M.; Cramer, W. y Pollard, D. (2000). Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications*, 10, pp. 1620-1632.

Forzieri, G.; Castelli, F. y Vivoni E.R. (2011). Vegetation Dynamics within the North American Monsoon Region. *J. Climate*, 24, pp. 1763–1783.

Forzieri, G.; Vivoni, E.R. y Feyen, L. (2013) Ecosystem biophysical memory in the southwestern North America climate system. *Environmental Research Letters*, 8, 044016 (8 pp).

Fundación Biodiversidad, Oficina de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, Centro Nacional de Educación Ambiental (2013). *Cambio climático bases físicas: guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC: Grupo de trabajo I*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid. 44p.

Garbulski, M.F.; Filella, I.; Verger, A. y Peñuelas, J. (2014). Photosynthetic light use efficiency from satellite sensors: from global to Mediterranean vegetation. *Environmental and Experimental Botany*, 103, pp. 3–11.

Gea-Izquierdo, G. y Cañellas I. (2014). Local climate forces instability in long-term productivity of a Mediterranean oak along climatic gradients. *Ecosystems*, 17, pp. 228-241.

Grist, J.; Nicholson, S.E. y Mpolokang, A. (1997). On the use of NDVI for estimate rainfall fields in the Kalahari of Botswana. *Journal of Arid Environment*, 35(2), pp. 195-214.

Gualdi, S.; Somot, S.; Li, L.; Artale, V.; Adani, M. y Bellucci, A. (2013). The circe simulations: Regional climate change projections with realistic representation of the mediterranean sea. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, pp. 65-81.

Jantsch, M.C.; Fischer, A.; Fischer, H.S. y Winter, S. (2013). Shift in Plant Species Composition Reveals Environmental Changes During the Last Decades: A Long-Term Study in Beech (*Fagus sylvatica*) Forests in Bavaria, Germany. *Folia Geobotanica*, 48, pp. 467-491.

Jenerette, G.D.; Barron-Gafford, G.A.; Guswa, A.J.; McDonnell, J.J. y Villegas, J.C. (2012). Organization of complexity in water limited ecohydrology. *Ecohydrology*, 5, pp.184-199

Jobbagy, E.G.; Sala, O.E. y Paruelo, J.M. (2002). Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach. *Ecology*, 83, pp. 307-319.

Lipiec, J.; Doussan, C.; Nosalewicz, A.; Kondracka, K. (2013). Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics*, 27(4) , pp. 463-477.

Liras, E. (2010). *Funcionamiento ecosistémico: Controles y patrones espacio-temporales en el SE Ibérico*. Tesis Doctoral (Edición Electrónica). Universidad de Almería. 160 pp.

Martiny, N.; Richard, Y. y Camberlin, P. (2005). Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24403 (4 pp).

Myneni, R.B.; Hall, F.G.; Sellers, P.J. y Marshak, A.L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indices, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33, pp. 481 – 486.

Nippert, J.B.; Wieme, R.A.; Ocheltree, T.W. y Craine, J.M. (2012). Root characteristics of C4 grasses limit reliance on deep soil water in tallgrass prairie. *Plant and Soil*, 355, pp. 385-394.

Ogle, K.; Barron-Gafford, G. A.; Bentley, L.P.; Cable, J.M.; Lucas, R.W.; Huxman, T.E.; Loik, M.E.; Smith, S.D.; Tissue, D.T. *Quantifying ecological “memory” of plant and ecosystem processes in variable environments*. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, CA.

Paruelo, J.M. y Lauenroth, W.K. (1995). Regional patterns of Normalized Difference Vegetation Index in North American shrublands and grasslands. *Ecology*, 76, pp.1888-1898.

Paruelo, J.M. y Lauenroth, W.K. (1998) Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 25, pp. 721-733.

Paruelo, J.M.; Lauenroth, W.K.; Burke, I.C. y Sala, O.E. (1999). Grassland Precipitation Use Efficiency across a resource gradient. *Ecosystems*, 2, pp. 64-69.

Paruelo, J.M.; Piñeiro, G.; Oyonarte, C.; Alcaraz, D.; Cabello, J. y Escribano, P. (2005). Temporal and Spatial Patterns of Ecosystem Functioning in Protected Arid Areas in Southeastern Spain. *Applied Vegetation Science*, 8(1), pp. 93-102.

Philippon, N.; Jarlan, L.; Martiny, N.; Camberlin, P. y Mougin E. (2007) characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982-2002 by means of NOAA-AVHRR NDVI data. *Journal of Climate*, 20, pp. 1202-1218.

- Prasad, V.K.; Anuradha, E. y Badarinath, K.V. (2005). Climatic controls of vegetation vigor in four contrasting forest types of India-evaluation from National Oceanic and Atmospheric Administration's Advanced Very High Resolution Radiometer datasets (1990–2000). *Int. J. Biometeorol.*, 50(1), pp. 6–16.
- Richard, Y.; Martiny, N.; Fauchereau, N.; Reason, C.; Rouault, M.; Vigaud, N.; y Tracol, Y. (2008). Interannual memory effects for spring NDVI in semi-arid South Africa. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13704 (6 pp).
- Rivas-Martínez, S (1987). *Memoria del mapa de series de vegetación de España 1: 400.000*. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. 268 pp.
- Romero, D.; Gil, Y.; Ortega, E.; Domínguez, M.C.; Navas, P.; Patiño, M.; Vicent, C.; Santos, M.; Quijada, J.; Giménez de Azcárate, F.; Cáceres, F. y Moreira, J.M. (2010): Actualización SIOSE en Andalucía 2009. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 348-361.
- Rui, L.; Atsushi, T. y Mitsuru, T. (2014). Index-based assessment of agricultural drought in a semi-arid region of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Land*, 6 (1), pp. 3-15.
- Sardans, J. y Peñuelas, J. (2013). Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change. *Plant and Soil*, 365 (1-2), pp. 1-33.
- Schenk, H.J. y Jackson, R.B. (2002). Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90, pp 480–494.
- Scott, R.L.; Jenerette, G.D.; Potts, D.L. y Huxman, T.E. (2009). Effects of seasonal drought on net carbon dioxide exchange from a woody-plant encroached semiarid grassland. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 114, 114:G04004.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), pp. 1335 - 1372.
- Shao, H.Y.; Wu, J.H.; Liu, M. y Yang W.N. (2014). Responses of vegetation changes to climatic variations in Panxi area based on the MODIS multispectral data. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(1), pp. 167-71.
- Thavornatam, W. y Tantemsapya, N. (2013) Vegetation greenness modeling in response to climate change for Northeast Thailand. *Journal of Geographical Sciences*, 23(6), pp. 1052-1068.

Vitousek, P.M. y Matson, P.A. (1991). Gradient analysis of ecosystems. En: Cole, J.J.; Lovett, G. y Findlay. S. (Eds.). *Comparative Analysis of Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Theories*. Springer-Verlagp. pp. 287-298.

Wiegand, T.; Snyman, H.A.; Kellner, K. y Paruelo, J.M. (2004). Do grasslands have a memory: modelling phytomass production of a semiarid South African grassland. *Ecosystems*, 7 (3), pp 243-258.

Woodward, F.I. (1987). *Climate and plant distribution*. Cambridge: Cambridge University Press