

Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España

García-Haro, F.J.*¹, Campos-Taberner, M.¹, Sabater, N.¹, Belda, F.², Moreno, A.¹, Gilabert, M.A.¹, Martínez, B.¹, Pérez-Hoyos, A.¹, Meliá, J.¹

¹Unitat de Investigació en Teledetecció, Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, 46100 Burjassot, València, España.

²AEMET, C/ Leonardo Prieto Castro, 8. 28040 Madrid, España.

Resumen: Los extremos climáticos se han incrementado en España a los largo del último siglo; por ello, su análisis se ha convertido en una línea prioritaria de conocimiento con objeto fundamental de diseñar planes para la gestión y mitigación de sus efectos. Los datos de satélite permiten analizar las variaciones en la actividad de la vegetación a varias escalas temporales y su respuesta a la variabilidad climática. En este trabajo se pone de manifiesto la vulnerabilidad de la vegetación en España ante condiciones ambientales extremas a través de las correlaciones entre índices meteorológicos de sequía (SPI) y variables biofísicas extraídas de datos MODIS/EOS y SEVIRI/MSG. Las anomalías en la vegetación, como indicadores de las condiciones de humedad de la misma, pueden ayudar a cuantificar y gestionar episodios meteorológicos extremos y hacer un seguimiento de la misma. Las mayores correlaciones se han obtenido en las regiones áridas y semiáridas y durante los meses de máxima actividad de la vegetación, generalmente entre mayo y junio.

Palabras clave: sequía, vegetación, clima, SPI, teledetección.

Vegetation vulnerability to drought in Spain

Abstract: Frequency of climatic extremes like long duration droughts has increased in Spain over the last century. The use of remote sensing observations for monitoring and detecting drought is justified on the basis that vegetation vigor is closely related to moisture condition. We derive satellite estimates of bio-physical variables such as fractional vegetation cover (FVC) from MODIS/EOS and SEVIRI/MSG time series. The study evaluates the strength of temporal relationships between precipitation and vegetation condition at time-lag and cumulative rainfall intervals. From this analysis, it was observed that the climatic disturbances affected both the growing season and the total amount of vegetation. However, the impact of climate variability on the vegetation dynamics has shown to be highly dependent on the regional climate, vegetation community and growth stages. In general, they were more significant in arid and semiarid areas, since water availability most strongly limits vegetation growth in these environments.

Key words: drought, vegetation cover, climate, SPI, remote sensing.

1. Introducción

El análisis de los extremos climáticos en España a lo largo del último siglo se ha convertido en una

línea prioritaria de conocimiento con el objeto fundamental de diseñar planes para la gestión y mitigación de sus efectos. La teledetección, gracias a la homogeneidad espacial y alta frecuencia temporal,

* Autor para la correspondencia: j.garcia.haro@uv.es

nos permite hacer un seguimiento de la estructura y condición de la vegetación, y analizar así la influencia de la variabilidad climática sobre los ecosistemas.

Numerosos estudios han evidenciado recientemente la existencia de una relación directa entre la precipitación acumulada y los índices de vegetación. Dicha relación, que suele ser compleja, depende principalmente de las condiciones climáticas de la región, de las características de la vegetación y suelo, del estado fenológico y de la escala espacial (Paruelo y Lauenroth, 1995; Ji y Peters, 2003; Wang et al., 2003; Vicente-Serrano, 2007). Además, la relación puede estar influenciada por otros factores (presencia de plagas, incendios forestales, prácticas agrícolas y ganaderas, etc.). La vegetación puede influir sobre el régimen de precipitación a diferentes escalas temporales y comportarse como una memoria biofísica que actúa sobre la precipitación a través de retro-alimentaciones retardadas. Este poder predictivo de variables que recogen la evolución de la cubierta vegetal (índices de vegetación o variables biofísicas) ha permitido recientemente mejorar la modelización de la precipitación a varias escalas temporales (Liu et al., 2006; Moreno-Martínez et al., 2010).

En este trabajo se analizan las relaciones entre parámetros biofísicos de la vegetación e índices de sequía meteorológica. Para caracterizar la vegetación se ha utilizado la cobertura vegetal (*Fractional Vegetation Cover*, FVC) a partir de datos del sensor MODIS. Para cuantificar la sequía meteorológica se ha utilizado el Índice Estandarizado de Precipitación (*Standardized Precipitation Index*, SPI), que proporciona déficits de precipitación a varias escalas temporales. La utilización de series temporales de observaciones de la vegetación, de más de diez años, proporciona una significación adecuada de las relaciones encontradas.

Dada la gran variedad de tipos de cubierta y condiciones climáticas que existen en España, se ha realizado un análisis estratificado, atendiendo al tipo de cubierta y al régimen de precipitaciones, con el fin de identificar regiones especialmente sensibles a la sequía. Asimismo, dado el carácter fuertemente estacional de las relaciones entre la humedad del suelo y el desarrollo de la vegetación, se han considerado diferentes periodos y retardos temporales.

2. Datos

2.1. El seguimiento de la cubierta vegetal

La necesidad de sintetizar información espectral en el seguimiento de la cubierta vegetal ha llevado al desarrollo de los índices de vegetación. Sin embargo, el hecho de que los índices de vegetación dependan con frecuencia de las características de la escena y del sensor ha motivado en los últimos años el desarrollo de algoritmos para la obtención de parámetros biofísicos. Actualmente, gracias al desarrollo tecnológico de los programas de Observación de la Tierra como el *Earth Science Enterprise* (ESE) de NASA, el *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) de la Comisión Europea, *Living Planet* de ESA, o el *Satellite Application Facilities* (SAF) de EUMETSAT, podemos caracterizar cada vez mejor la cubierta vegetal de la superficie gracias a una constelación de sensores ópticos (MODIS/EOS, VEGETATION/SPOT, MERIS/ENVISAT y SEVIRI/MSG) que observan el planeta simultáneamente.

En este trabajo se utiliza la cobertura vegetal (FVC) para reflejar la evolución estacional e interanual del estado de la vegetación. La metodología para estimar la cobertura vegetal se basa en un modelo de mezclas espectrales probabilístico (García-Haro et al., 2005). El algoritmo modela la reflectividad de la superficie a partir de la contribución de la señal de interés (vegetación) y del suelo de fondo. Ambas componentes vienen caracterizadas de una forma estadística a partir de una suma de funciones gaussianas. Se recoge así, de una forma más adecuada, la variabilidad de la cantidad de vegetación y del suelo presente en la escena. La metodología se ha aplicado para obtener una serie temporal de cobertura vegetal de la Península Ibérica durante un periodo de 12 años (2000-2011). Los mapas se han generado a una resolución espacial (1 km) y temporal (16 días, 23 observaciones/año) a partir de datos MODIS (producto MOD13A2). La Figura 1 muestra la distribución espacial de valores medios de FVC en la península Ibérica durante dos periodos relevantes del ciclo anual de la vegetación. Se observa un fuerte gradiente norte-sur en la fracción de cubierta vegetal al inicio del verano, muy relacionado con la disponibilidad hídrica (Figura 1b).

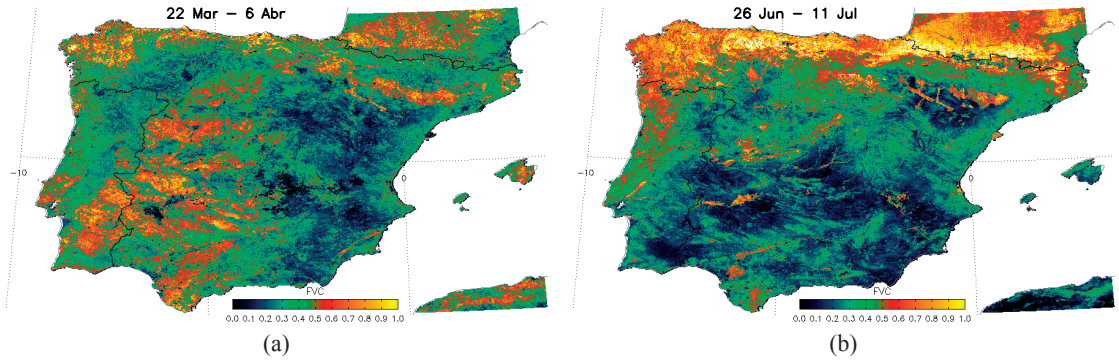


Figura 1. Valores medios de la cobertura vegetal (FVC) a lo largo de 11 años (2000-2010), correspondiente a los periodos de inicio de primavera (a) y verano (b).

La fenología de la vegetación presenta patrones complejos asociados a la variabilidad climática, la composición del paisaje y las prácticas agrícolas (Peñuelas *et al.*, 2004). Así, en el suroeste el crecimiento de la vegetación está influenciado por las lluvias de otoño y se alcanza el máximo valor de cobertura vegetal al final del invierno (Figura 1a).

2.2. La caracterización de la sequía

Los datos de precipitación utilizados en este estudio son los registrados por la red de observatorios de la AEMET, y corresponden a las variables de precipitación mensual acumulada y temperatura media mensual. Las medidas de la red de estaciones se han interpolado espacialmente utilizando técnicas de *kriging* ordinario (García-Haro *et al.*, 2008). Esto ha permitido generar una base de datos de imágenes de precipitación mensual acumulada durante 62 años (1950-2011) con una resolución de 2 km.

Para caracterizar la sequía se ha utilizado el *Índice Estandarizado de Precipitación* (SPI), que permite cuantificar el déficit de precipitación en base al concepto de sequía meteorológica. El SPI se ha calculado a partir de datos de precipitación interpolada utilizando el método desarrollado por McKee (McKee *et al.*, 1993).

Las principales ventajas son su flexibilidad y la posibilidad de cuantificar la sequía a varias escalas temporales. SPI-*i* (típicamente para $i=1, 3, 6, 9, 12$ y 24 meses) cuantifica la desviación respecto a los valores típicos acumulados en los *i* meses previos. Valores positivos de SPI indican una

precipitación superior a la media, mientras que los valores negativos nos muestran un déficit en las precipitaciones registradas durante ese periodo de tiempo.

2.3. Zonificación del área de estudio: clasificación de la cubierta y regionalización climática

Dada la gran variedad de tipos de cubierta y condiciones climáticas que existen en España, se ha realizado un análisis estratificado, con el fin de identificar regiones especialmente sensibles a la sequía. La clasificación de la cubierta se basó en técnicas de clasificación mediante redes neuronales y explotando la trayectoria temporal de la cobertura vegetal (García-Haro *et al.*, 2010). Ello ha permitido discriminar los principales ecosistemas utilizando una leyenda generalizada de 14 clases (Figura 2). Esta clasificación es compatible con los productos más representativos y comúnmente usados (CORINE, GLC2000, GLOBCOVER, IGBP). Su principal ventaja es que reduce los principales errores e inconsistencias que presentan dichos productos globales (Pérez-Hoyos *et al.*, 2014), los cuales no han sido validados convenientemente a escala regional. La clasificación indica el predominio de zonas cultivables de secano (20%) y vegetación herbácea (17%) en las llanuras centrales. Las principales masas boscosas incluyen coníferas (9%) en las regiones norte y franja mediterránea, frondosas de hoja caduca, como robles y hayas, en la franja septentrional (4,5%) y frondosas de hoja perenne (4,8%) en el Oeste. Las

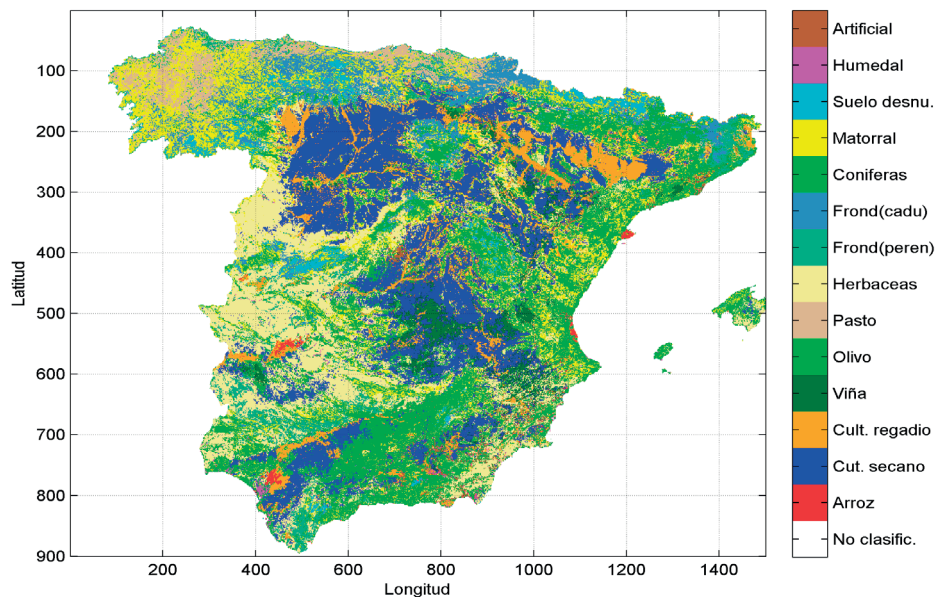


Figura 2. Clasificación de la vegetación con una leyenda de 14 clases.

áreas de matorral (12%) incluyen landas y vegetación esclerófila Mediterránea.

Para el análisis de los resultados se ha llevado a cabo una regionalización climática de España utilizando diferentes variables climáticas. A partir de la temperatura media mensual durante el periodo

de estudio se ha obtenido la evapotranspiración potencial (ETP) utilizando el método empírico Thornthwaite (Thornthwaite *et al.*, 1948). El balance anual entre ETP y la precipitación nos ha permitido obtener los índices de humedad (I_h) y aridez (I_a) anuales. Su combinación lineal, $I_h - 0,6 I_a$, da lugar al índice hídrico anual correspondiente

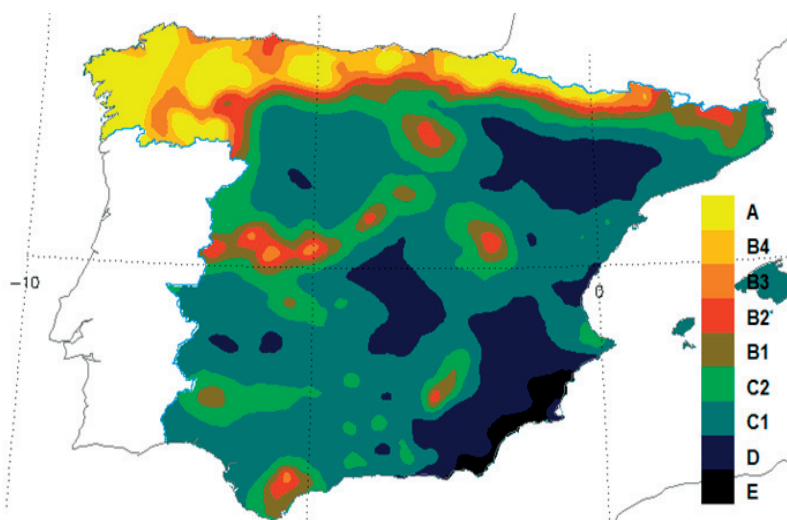


Figura 3. Regionalización climática de España en 9 regiones climáticas, en base al índice hídrico anual (1950-2011): A: muy húmedo (>100); B: húmedo [20,100]; C: subhúmedo [-20,20]; D: semiárido, [-20,-40]; E: árido (<-40).

al periodo 1950-2011, el cual nos ha permitido realizar una regionalización climática de España diferenciando 9 regiones de humedad (Figura 3).

España presenta un fuerte contraste entre las regiones húmedas y muy húmedas del Norte (índice de humedad superior a 80) y las regiones desérticas del Sur-Este (valores inferiores a -40). Las áreas áridas y semiáridas ocupan un 15% (provincias de Almería y Murcia, Valle del Ebro y meseta central). Una limitación de esta clasificación es que no tiene en cuenta algunos factores locales, entre los que destacan la latitud, la proximidad al mar y la orografía, la cual juega un papel esencial en la precipitación (Poquet *et al.*, 2008).

3. Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía

A continuación se utilizan series temporales de las variables obtenidas para analizar la respuesta de la vegetación a situaciones meteorológicas extremas.

3.1. Impacto de la sequía sobre la vegetación

Entre los periodos de sequía acentuados, cabe destacar los de 1980-84 y 1990-95, además del más reciente, 2004-2007. Al objeto de analizar la respuesta de los diferentes tipos de vegetación a la sequía hemos centrado el estudio al periodo 2004-2007, distinguiendo entre zonas forestales y de cultivo. Las figuras 4 y 5 muestran, en color rojo, la evolución de la cobertura vegetal (FVC) correspondiente al año 2005 para los tipos de vegetación que se indican. Como valor de referencia se representa en azul el valor medio del periodo 2000-2011 y las barras de error representan la variabilidad interanual para este periodo. Prácticamente en todas las zonas húmedas la vegetación no presenta grandes desviaciones respecto del valor de referencia (Figura 4).

Sin embargo, para las regiones subhúmedas (C1), semiáridas (E), y áridas (D), se observaron variaciones para todos los tipos de cubierta. Las anomalías se dan con valores fuertemente negativos en formaciones herbáceas, zonas cultivables no irrigadas, matorral y frondosas (Figura 5). La vegetación es especialmente sensible al déficit

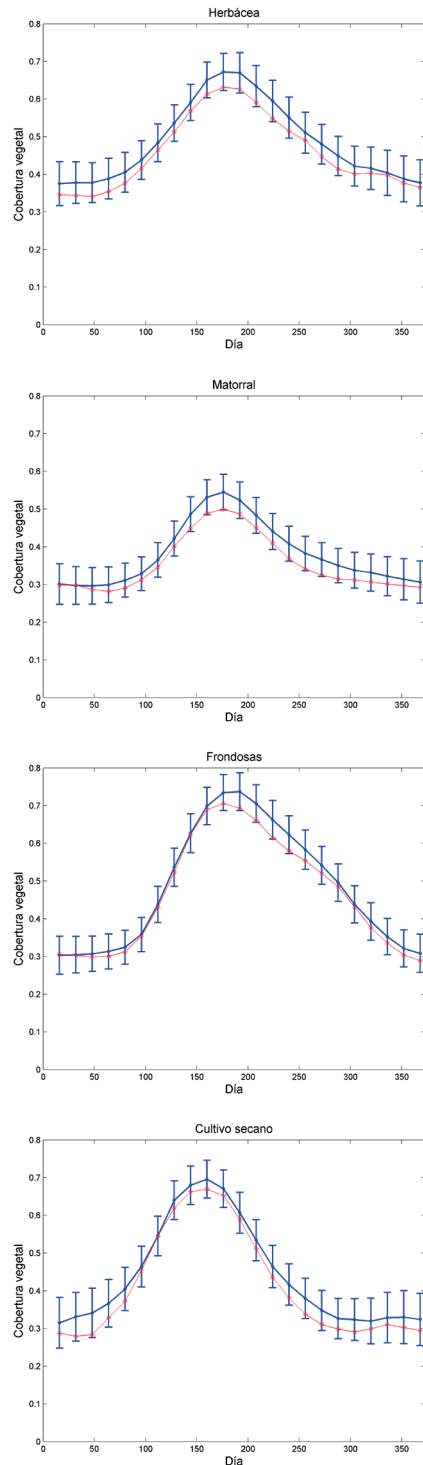


Figura 4. Evolución anual de la cobertura vegetal, FVC, para las clases húmedas, A y B (24.6% del total). En azul se representan los valores medios para el periodo 2000-2011 y en rojo para el año 2005. Las barras de error representan la desviación estándar de cada periodo.

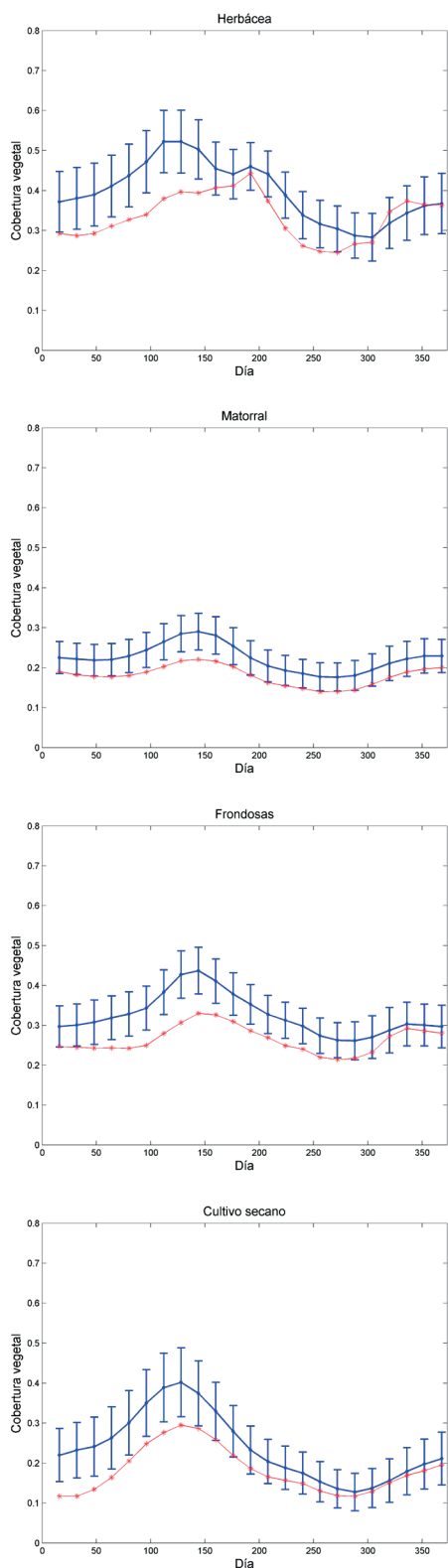


Figura 5. Evolución anual de la cobertura vegetal, FVC, para las clases más secas, aquellas con valores negativos del índice de humedad: E, D y C1 (59.9 % del total).

hídrico en los periodos de mayor actividad, como es la fase de crecimiento, que se produce habitualmente durante la primavera. Por contra, las anomalías son muy poco significativas durante los meses de otoño. El largo episodio de sequía parece afectar también a la fenología en algunas clases, con un retraso de aproximadamente un mes del periodo de máximo desarrollo, siendo incluso superior en el caso de las formaciones herbáceas.

Para la mayoría de los tipos de vegetación, las anomalías en la cubierta vegetal están muy influenciadas por la precipitación acumulada durante los tres meses precedentes. En la Figura 6 se representan los valores del SPI-3 por intervalos de anomalías del FVC en el mes de mayo. En este periodo, la influencia de la sequía ha resultado ser especialmente significativa. Los resultados revelan que las formaciones herbáceas y el matorral esclerófilo manifiestan una fuerte relación lineal entre la anomalía y el déficit hídrico. En el caso de las clases arbóreas, las frondosas evidencian también una alta sensibilidad a la sequía, mientras que las coníferas y el bosque mixto son mucho menos sensibles a la sequía de los 3 meses precedentes. Diferentes estudios sugieren que estas clases son poco sensibles a sequías de corta duración aunque las sequías intensas y duraderas pueden afectar a su estructura, limitando de ese modo su capacidad para recuperar su actividad normal (Vicente-Serrano, 2007).

Los mapas autoorganizativos de Kohonen (*Self-Organizing Maps*, SOM) (Kohonen et al., 1996) nos han permitido identificar las regularidades, correlaciones o relaciones más frecuentes entre las anomalías en la cubierta vegetal y las variables climáticas analizadas. Se observó que las anomalías negativas de FVC más fuertes ($<-0,06$) se presentan alrededor de agosto (fracción de año $t=0,7-0,8$) en zonas muy secas, y al inicio de la primavera ($t=0,3$) en zonas subhúmedas. En ambos casos están acompañadas por fuertes sequías en los meses previos ($SPI<-1$).

3.2. Análisis de correlaciones temporales

Tanto la humedad del suelo como la actividad de la vegetación responden a los extremos meteorológicos en una escala temporal relativamente

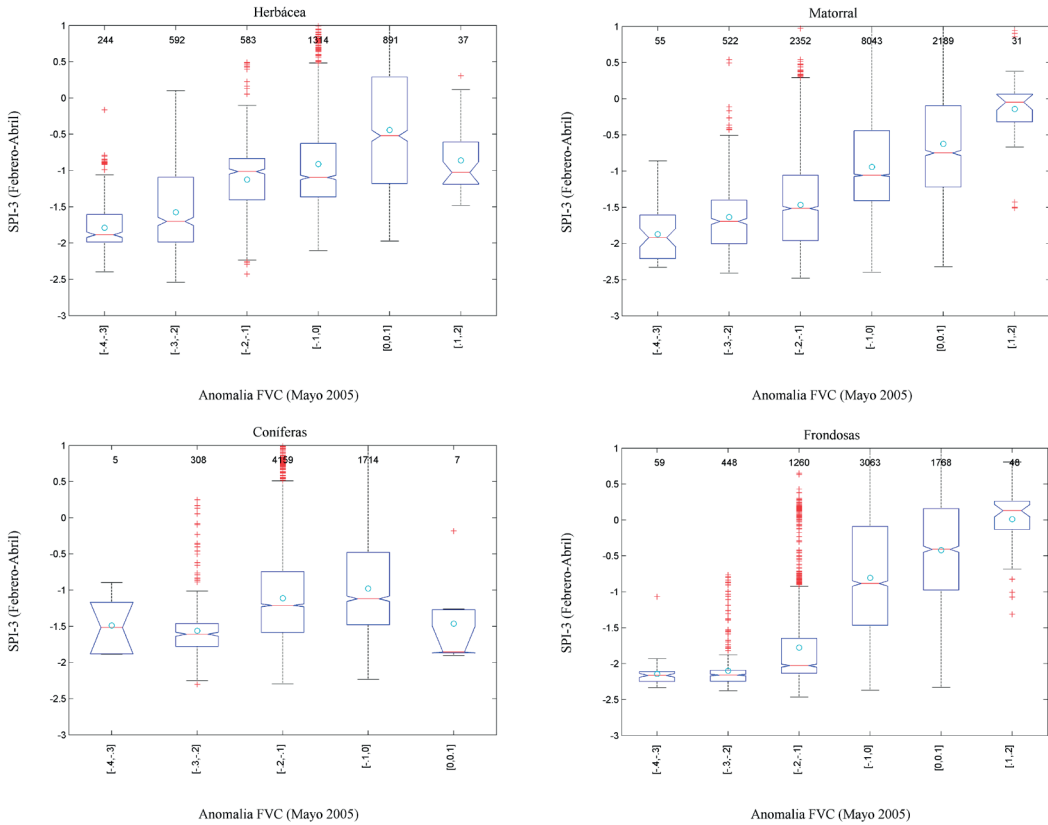


Figura 6. Distribución de los valores de SPI-3 (febrero-abril) en función de la anomalía en la cobertura vegetal (FVC) del mes de mayo, para varios tipos de cubierta diferente. Las cajas identifican los percentiles 25, 50 y 75, y el símbolo (+) valores anómalos. La cifra en la parte superior indica el número de píxeles en cada clase.

corta. Sin embargo, esta respuesta es altamente dependiente de la estación. Por este motivo, se analizaron diferentes ventanas temporales de 4 meses, con el fin de identificar periodos en los que la vegetación es más vulnerable a la sequía. Se han utilizado técnicas de regresión lineal introduciendo variables categóricas (*dummy*), para considerar las diferencias mensuales en los coeficientes del modelo lineal, desechando las variables poco significativas ($p > 0,05$). En numerosas regiones se han obtenido correlaciones muy significativas entre las anomalías en la cobertura vegetal y el SPI para diferentes retardos y periodos temporales, que sin embargo dependen fuertemente del tipo de cubierta y del régimen de precipitaciones. Las correlaciones mayores se obtuvieron para el periodo mayo-agosto. Como se observa en la Figura 7, en este periodo las regiones áridas (E) y semiáridas (D)

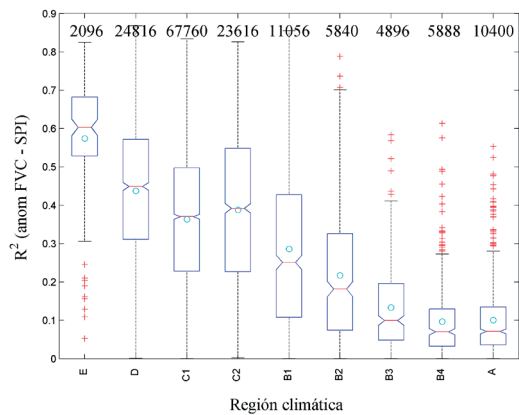


Figura 7. Distribución de los valores del Coeficiente de determinación (R^2) de la regresión lineal con variables *dummy* entre SPI-3 meses (retardado 1 mes) y anomalía mensual de FVC (periodo mayo-agosto).

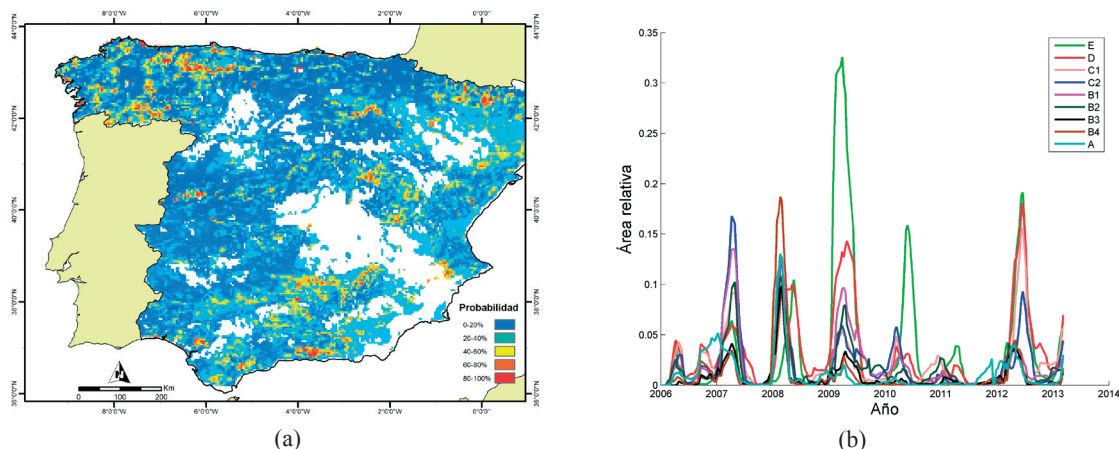


Figura 8. a) Distribución de la probabilidad de alteraciones asociadas a la sequía, para enero de 2008. Las zonas con escasa vegetación se han enmascarado. b) Fracción de zonas con desarrollo anómalo en función del tiempo, para las 9 regiones climáticas (Figura 3).

muestran una gran sensibilidad al estrés hídrico (R^2 entre 0,4 y 0,7). Por el contrario la relación lineal es poco significativa en el caso de las regiones más húmedas, en las que la precipitación tiene poca incidencia en la actividad vegetal durante el verano.

3.3. Seguimiento de alteraciones en tiempo real

Se demuestra a continuación el potencial de una metodología para detectar en tiempo real anomalías en el desarrollo de la vegetación (Verbesselt *et al.*, 2012; García-Haro *et al.* 2013), explotando la alta frecuencia temporal y continuidad los productos de la vegetación LSA SAF (<http://landsaf.meteo.pt>) a partir del sensor SEVIRI/MSG. Para ello se ha modelado en cada píxel la serie temporal de FVC mediante un desarrollo de Fourier. El ajuste de los residuos a una función de distribución estadística nos ha permitido, con la significación deseada, identificar los residuos anormalmente elevados y expresarlos en términos de probabilidad de alteraciones en el desarrollo de la vegetación (ver ejemplo en Figura 8a). Las zonas con alta probabilidad se asocian frecuentemente a episodios de sequía (valores bajos de SPI-3). Otra ventaja de esta metodología es que permite analizar retrospectivamente la distribución de zonas afectadas por alteraciones. La Figura 8b muestra

la evolución temporal de dichas zonas. Se observa cómo las regiones áridas (E) y semiáridas (D) suelen ser las más sensibles a los efectos de la sequía.

4. Conclusiones

Los datos de satélite permiten analizar las variaciones en la actividad de la vegetación a varias escalas temporales y su respuesta a la variabilidad climática. En este trabajo se han analizado las correlaciones entre índices meteorológicos de sequía (SPI) y variables biofísicas como la cobertura vegetal (FVC) extraídas a partir de datos MODIS y SEVIRI. Estas correlaciones son muy dependientes del periodo estacional, del tipo de vegetación y de las características climáticas de cada región. Las formaciones herbáceas han mostrado una gran vulnerabilidad a la sequía, especialmente durante la fase estacional de crecimiento. Asimismo, la mayor parte de ecosistemas presentes en las zonas más secas han mostrado una gran sensibilidad al déficit hídrico. Esto confirma el impacto de la disponibilidad hídrica en los periodos estivales para estas zonas y pone de manifiesto que las anomalías de la cubierta vegetal proporcionan una descripción representativa del estado de humedad y que pueden ser una fuente importante de información para detectar situaciones de sequía y a la vez hacer un seguimiento de la misma.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en los proyectos DULCINEA (CGL2005-04202), RESET CLIMATE (CGL2012-35831), LSA SAF (EUMETSAT) y ERMES (FP7-SPACE-2013, Contract 606983).

Referencias

- García-Haro, F.J., Sommer, S., Kemper, T. 2005. A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA). *International Journal of Remote Sensing*, 26(10): 2135-2162. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160512331337817>
- García-Haro, F.J., Belda, F., Poquet, D. 2008. Estimation of climatological variables in Spain during the 1950-2008 period using geostatistical techniques. En: *8th Annual Meeting of the EMS / 7th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*. Amsterdam, Holanda, 29 septiembre-3 octubre. EMS2008-A-00319.
- García-Haro, F.J., Pérez-Hoyos A. 2010. Land cover classification in Spain from seasonal trajectories of MODIS data. En: *Proceedings of the RAQRS2010, 3rd Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Torrent, España, 27 septiembre - 1 octubre. pp 562-567.
- García-Haro, F.J., Camacho, F., Gilabert, M.A., Meliá, J. 2013. Monitoring of vegetation properties. Products overview and applications: drought assessment. En: *8th APMG Symposium on Meteorology and Geophysics*. Ericeira, Portugal. 18-21 marzo.
- Ji, L., Peters A.J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 85-98. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J., Laaksonen, J. 1996. SOM_PAK: The Self-Organizing Map Program Package. Technical Report A31, Helsinki University of Technology.
- Liu, Z., Notaro, M., Kutzbach, J., Liu, N. 2006. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *Journal of Climate*, 19: 787-814. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3658.1>
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*. Anaheim, EE.UU. 17-22 enero. pp 179-184.
- Moreno-Martínez, A., Soria-Olivas, E., García-Haro, F.J., Martín Guerrero, J.D., Magdalena, R. 2010. Neural models for rainfall prediction. Capítulo 21 en "Soft Computing Methods for Practical Environmental Solutions: Techniques and Studies", pp 353-369. New York: Gestal, M. y Rivero, D.
- Paruelo, J.M., Lauenroth, W.K. 1995. Regional Patterns of Normalized Difference Vegetation Index in North American Shrublands and Grasslands. *Ecology*, 76(6): 1888-1898. <http://dx.doi.org/10.2307/1940721>
- Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P., Estiarte, M., Terradas, J. 2004. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161(3): 837-846. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.x>
- Pérez-Hoyos, A., García-Haro F.J., Valcárcel, N. 2014. Incorporating sub-dominant classes in the accuracy assessment of large scale land cover products: Application to GlobCover, MODISLC, GLC2000 and CORINE in Spain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 187-205. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2258659>
- Poquet, D., Belda, F., García-Haro, F.J. 2008. Regionalización de la sequía en la península ibérica desde 1950 hasta 2007 a partir del SPI y una modelización digital terreno. En: *XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española "Agua y Cambio Climático"*, IX Encuentro Hispano-Luso de Meteorología y XII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Zaragoza, España. 5-7 de mayo.
- Thorntwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review*, 38(1): 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>
- Verbesselt, A., Zeileis, A., Herold, M. 2012. Near Real-Time Disturbance Detection Using Satellite Image Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 123: 98-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>
- Vicente-Serrano, S.M. 2007. Evaluating the Impact of Drought Using Remote Sensing in a Mediterranean, Semi-arid Region. *Natural Hazards*, 40(1): 173-208. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-0009-7>
- Wang, J., Rich, P.M., Price, K.P. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11): 2345-2364. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160210154812>