

PAUTAS DE ESTRÉS HÍDRICO EN ZONAS FORESTALES DE CATALUÑA: UNA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA SU DETECCIÓN MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT Y TERRA-MODIS

C. Domingo (*), J. Cristóbal (*), M. Ninyerola (**) y X. Pons (*) (***)

(*)Dep. Geografía. Ed. B Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra. cristina.domingo@uab.es

(**) Dep. Biología Animal, Vegetal y Ecología. Ed. C Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra.

(***) CREA. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Ed. C. Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona).

RESUMEN

Según el informe de síntesis del Cambio climático del IPCC de 2007, el calentamiento global evidencia un aumento de temperatura del aire y del océano (IPCC, 2007). Estos hechos se traducen directamente en la falta de recursos hídricos, fenómeno de alta importancia en el caso de la Península Ibérica. En el presente trabajo, se analiza el efecto diferencial del estrés hídrico en zonas con diferente radiación solar para diferentes especies forestales representativas de Cataluña, usando datos diarios TERRA-MODIS y Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+. Los resultados del análisis ANOVA han confirmado unas pautas o tendencias asumidas al estrés hídrico, en función de la radiación solar recibida. Mientras *Pinus sylvestris* presenta estrés a un déficit hídrico en zonas donde recibe una alta radiación solar, *Quercus humilis*, contra pronóstico indica una tendencia a la adaptabilidad en zonas altamente irradiadas para el mismo período. Los resultados también muestran el grado de eficiencia de los índices utilizados.

ABSTRACT

According to the Climatic Change report of the IPCC of 2007, the global warming makes evident an increase of air and ocean temperature (IPCC, 2007). These facts directly mean the lack of water resources, a high importance phenomenon in the case of the Iberian Peninsula. In the present work, the differential effect of water stress is analyzed in areas with different solar radiation for different representative Catalanian forest species, using daily data TERRA-MODIS and Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+. The results of the analysis ANOVA have confirmed some trends of water stress, according to the received solar radiation. While *Pinus sylvestris* presents water stress in areas with a high solar radiation, *Quercus humilis*, against prediction, it indicates a trend to the adaptability in areas highly irradiated for the same period. The results also show the efficiency of the indexes used.

Palabras clave: sequía, estrés hídrico, índices de vegetación, TERRA-MODIS, Landsat.

INTRODUCCIÓN

Durante esta última década, uno de los acontecimientos más importantes ha sido la aceptación del cambio climático como una realidad. La importancia del clima en torno a la sociedad viene estrechamente ligada a los efectos que este tiene sobre la vegetación y por lo tanto sobre el entorno natural en general. El clima es uno de los factores que influyen más sobre las especies vegetales, especialmente en referencia a los requerimientos hídricos de cualquier comunidad vegetal. Cataluña se caracteriza entre otros, por tener un clima mediterráneo de veranos con restricciones hídricas y por tener un 60% del territorio ocupado por comunidades forestales las cuales están sometidas a periodos de sequía. Desde un punto de vista climatológico, la sequía puede definirse como la presencia de un déficit de

humedad relativa y un aumento de temperatura durante un período de tiempo determinado. Las consecuencias se manifiestan con un desequilibrio entre la precipitación u la evapotranspiración potencial provocando un déficit hídrico sobre las especies vegetales. El hecho que la evapotranspiración de las plantas sea prácticamente igual a la precipitación que reciben, provoca una tensión hídrica tal que se manifiesta con un decaimiento. Este proceso, directamente observable, podría verse acentuado en función de la cantidad de radiación solar que reciben las comunidades forestales según su orientación. Desde esta perspectiva se presenta el siguiente análisis con los objetivos de distinguir dichas pautas de estrés hídrico a través del cálculo de varios índices, de vegetación y otros, y poner de relevancia el papel que tiene la radiación solar en tres (en el resumen solo se hace mención a dos especies) especies

características de Cataluña. Un segundo objetivo es mostrar el grado de eficiencia de los índices utilizados como indicadores de estrés hídrico en zonas mediterráneas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología utilizada se ha centrado en la integración en una base de datos de ciertas variables que pueden ser indicativas del estado fenológico de la vegetación para posteriores análisis. Para ello se ha usado el Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IFEC) y el Mapa de Hábitats de Cataluña (MHC) como referentes de situación de comunidades forestales. También se han utilizado imágenes TERRA-MODIS del producto de Reflectancias (*MOD09 Surface Reflectance*) y del producto de Temperatura de Superficie Terrestre (TST) (*MOD11A1 Land Surface Temperature and Emissivity*), tomadas entre abril del 2000 y diciembre de 2006, cuyas resoluciones espaciales son de 500m y 1000m respectivamente. Dichas imágenes de baja resolución ya tienen aplicada una primera corrección geométrica y una corrección atmosférica. En cuanto a imágenes de alta resolución espacial (30m) se ha usado una serie de Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ para el período 2002-07.

Las imágenes TERRA-MODIS han sido descargadas desde el servidor de la USGS (United States Geological Survey) e importadas a formato MiraMon y se les ha aplicado una reproyección a la vez que recortadas por el ámbito de estudio. También se les ha aplicado una máscara de nubes, calculada a partir de la TST y otra de nieves, extraída del cálculo del *Normalized Difference Snow Index* (NDSI). Han sido revisadas para descartar aquellas que presentan una distorsión debido al *bow tie effect* o bien una cubierta de nubes mayor al 50% de la imagen, seleccionando un total de 702 imágenes TERRA-MODIS para el período 2001-06. Las imágenes Landsat también han sido importadas a formato MiraMon y posteriormente se han descartado aquellas con una cubierta nubosa mayor al 70%. Se han georeferenciado y corregido radiométricamente y se ha pasado una máscara de nubes y sombras para cada una de las 130 imágenes del período 2002-07.

La radiación solar ha sido extraída del Atlas Climático Digital de Cataluña (ACDC). Una vez preparadas las imágenes se ha calculado el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), el *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), el *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Liu *et al.* 1995) y los tres componentes de la Transformación del *Tasseled*

Cap, Brightness, Wetness, Greenness. (Zhang *et al.* 2002)

La selección de las áreas de estudio se ha llevado a cabo mediante la combinación de los polígonos del MHC, donde la especie principal tiene un recubrimiento igual o mayor al 70%, con los puntos del IEFC, donde el recubrimiento de la especie principal también es mayor o igual al 70% y el porcentaje del área basal es mayor o igual al 70%. Se han seleccionado aquellos polígonos coincidentes en el campo especie para poder obtener un alto grado de homogeneidad.

En el caso de Landsat, estos polígonos se han combinado directamente con los índices y con el mapa de radiación solar obteniendo un promedio de esta para cada polígono. Por lo que se refiere a MODIS se ha creado una malla regular del mismo tamaño que un pixel de MODIS (500m) la cual se ha combinado con la capa de polígonos seleccionados anteriormente. Al nuevo vector de polígonos se le ha aplicado un criterio de área mínima representativa, descartando todos aquellos polígonos con un área menor al 70% del total. Posteriormente se han combinado con cada una de las imágenes viables de cada uno de los seis índices y con el mapa de radiación solar.

Una vez todo el material preparado se ha escogido tres especies representativas de Cataluña. *Pinus sylvestris* (pino albar) es una especie aciculifolia que forma bosques eurosiberianos, siendo presente en un 18% del total de la masa forestal catalana. *Quercus humilis* (roble pubescente), especie marcescente, es representativa de zonas más submediterráneas de transición. Como tercera especie se ha elegido el *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* (carrasca) por formar comunidades con un carácter mediterráneo continental. Se han seleccionado todos los polígonos de dichas especies, clasificándolos entre aquellos que presentan una alta o baja radiación solar en función de la media, desviación estándar y el primer y tercer cuartil del mapa de radiación solar (mediana anual constante) del ACDC.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Cogiendo como referencia el año 2003, como uno de los más críticos en cuanto a condiciones de sequía en Cataluña (Gobron *et al.* 2005), se han escogido los años 2001-02-04 para hacer el análisis con MODIS y los años 2002-04 para el análisis con Landsat debido a la limitación con el banco de imágenes. En el caso de las imágenes TERRA-MODIS se ha analizado el efecto

de la presencia de un año de sequía sobre los índices comparando las diferencias entre 2001-02 y 2001-04, a través de un análisis de la variancia (ANOVA) utilizando una distribución gaussiana, con una significación de $\alpha=0.05$. Para ambos casos, se ha analizado las posibles diferencias significativas entre las zonas de alta y baja radiación para los años 2002-04 en el caso de Landsat y 2001-04 en el caso de MODIS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pinus sylvestris (pino albar)

Si observamos los resultados de la comparación entre zonas de baja y alta radiación para ambos sensores, se aprecia que las diferencias son mucho más significativas cuando esta especie se encuentra altamente irradiada (Tabla 1 y 2).

Los resultados de MODIS demuestran que esta especie no presenta diferencias debidas a estrés hídrico observables a través de los índices en zonas de poca radiación. En cambio, en zonas de alta radiación solar se puede ver que, pasado el período de sequía, los índices NDVI y *Greenness* incrementan su sig-nificancia (Tabla 3). *P. sylvestris* se adapta favo-rambente a períodos de sequía siempre y cuando se encuentre en zonas de baja radiación solar.

Así se confirma la definición de *P. sylvestris* como una especie que soporta muy bien la sombra pero muy exigente respecto a los requerimientos de agua.

Tabla 1.- Nivel de significación (IC=95%) para TERRA-MODIS en función de la radiación solar recibida. En cursiva y rojo, datos significativos.

		TERRA-MODIS	
Índice		Sig. Baja radiación	Sig. Alta radiación
		2001-2004	2001-2004
<i>Pinus sylvestris</i>	Brightness	0.645	0.163
	Greenness	0.615	0.000
	Wetness	0.000	0.000
	EVI	0.879	0.118
	NDVI	0.263	0.044
	SAVI	0.708	0.001
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	Brightness	0.762	0.560
	Greenness	0.980	0.840
	Wetness	0.767	0.207
	EVI	0.663	0.473
	NDVI	0.438	0.068
	SAVI	0.767	0.308
<i>Quercus humilis</i>	Brightness	0.254	0.418
	Greenness	0.043	0.081
	Wetness	0.611	0.981
	EVI	0.008	0.030
	NDVI	0.027	0.466
	SAVI	0.008	0.047

Tabla 2.- Nivel de significación (IC=95%) para Landsat en función de la radiación solar recibida. En cursiva y rojo, datos significativos.

		LANDSAT	
Índice		Sig. Baja radiación	Sig. Alta radiación
		2002-2004	2002-2004
<i>Pinus sylvestris</i>	Brightness	0.000	0.001
	Greenness	0.000	0.000
	Wetness	0.000	0.000
	EVI	0.074	0.000
	NDVI	0.145	0.008
	SAVI	0.153	0.010
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	Brightness	0.006	0.002
	Greenness	0.000	0.000
	Wetness	0.000	0.000
	EVI	0.039	0.002
	NDVI	0.139	0.708
	SAVI	0.144	0.707
<i>Quercus humilis</i>	Brightness	0.122	0.224
	Greenness	0.000	0.000
	Wetness	0.000	0.000
	EVI	0.732	0.003
	NDVI	0.004	0.000
	SAVI	0.004	0.000

Tabla 3.- Nivel de significación (IC=95%) para la comparación con MODIS en función de la radiación solar recibida entre un caso sin sequía (01-02) y un caso con sequía (01-04).

		Sig. Baja radiación		Sig. Alta radiación	
TERRA-MODIS	Índice	2001-2002	2001-2004	2001-2002	2001-2004
<i>Pinus sylvestris</i>	Brightness	0.121	0.645	0.119	0.163
	Greenness	0.337	0.615	0.260	0.000
	Wetness	0.000	0.000	0.000	0.000
	EVI	0.196	0.879	0.350	0.118
	NDVI	0.318	0.263	0.188	0.044
	SAVI	0.367	0.708	0.000	0.001
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	Brightness	0.976	0.762	0.518	0.560
	Greenness	0.682	0.980	0.415	0.840
	Wetness	0.391	0.767	0.952	0.207
	EVI	0.442	0.663	0.227	0.473
	NDVI	0.292	0.438	0.414	0.068
	SAVI	0.324	0.767	0.279	0.308
<i>Quercus humilis</i>	Brightness	0.167	0.254	0.532	0.418
	Greenness	0.531	0.043	0.575	0.081
	Wetness	0.898	0.611	0.634	0.981
	EVI	0.265	0.008	0.763	0.030
	NDVI	0.761	0.027	0.212	0.466
	SAVI	0.409	0.008	0.333	0.047

Quercus ilex subsp. *rotundifolia* (carrasca)

Los resultados para la carrasca no presentan unas diferencias significativas entre zonas de alta o baja radiación para ninguno de los dos sensores (Tabla 1, 2 y 3). El hecho que las pruebas no sean significativas no nos permite afirmar que esta especie no sufra un estrés hídrico en estas condiciones y por lo tanto llevaría a definirla como altamente resistente al déficit hídrico.

Quercus humilis (roble pubescente)

El caso del roble pubescente, viene condicionado por su abundancia, pero en bosques mixtos. Aunque se considera una especie representativa del paisaje catalán, su presencia es

poco dominante debido a la práctica silvícola que ha reducido enormemente esta dominancia en los bosques de Cataluña (IEFC, 2004). Este hecho provoca que para el análisis con MODIS, de baja resolución espacial, se disponga de una muestra menor que para los análisis con Landsat. Los resultados de MODIS muestran la sensibilidad de esta especie a un período de sequía, sea cual sea la radiación solar que recibe, obteniendo unas diferencias significativas entre los años 2001-2004 tal como indica la Tabla 3. En el momento de analizar la influencia de la radiación solar con Landsat (Tabla 2), los resultados indican mayor sensibilidad a la sequía en zonas altamente irradiadas, aunque solo es el índice *EVI* el que destaca significativamente. Los mismos resultados para MODIS (Tabla 1) indican una mayor adaptabilidad en zonas muy irradiadas, situación que podría explicarse por la existencia de una divergencia adaptativa dentro de una misma especie, de una muestra poco representativa o bien a la baja resolución espacial.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN

De la observación de los resultados para los diferentes años y los distintos sensores, es posible evaluar la sensibilidad de los índices y determinar su utilidad. Los índices *Greenness*, *NDVI* y *SAVI* son indicadores de la sensibilidad a la cantidad de radiación solar recibida y al propio déficit hídrico, mientras que *EVI* parecería ser mejor indicador solo en el último caso. Finalmente, los índices *Wetness* y *Brightness*, ambos productos del *Tasseled Cap*, no son interesantes en cuanto a la aportación de información en relación a la sequía porque no muestran ninguna tendencia y por ser un resultado promedio de todas las bandas, sin haber ningún tipo de selección a priori.

RESOLUCIÓN ESPACIAL vs RESOLUCIÓN TEMPORAL

En referencia a la resolución temporal y espacial con la que se ha trabajado, los resultados muestran la importancia de la resolución espacial en contra de la temporal. Cuando se trabaja con medias anuales, la representatividad temporal queda reducida, disminuyendo significativamente el peso que esta puede aportar en el análisis. Una alta resolución espacial permite trabajar con unidades mucho más pequeñas y tener unos resultados más precisos. Se hace notar la importancia de la homogeneidad espacial de las comunidades forestales y el tamaño de estas en el momento de escoger entre los dos tipos de resoluciones. Como se

aprecia en el caso de *Pinus sylvestris*, los resultados son los mismos, pero para el caso de *Quercus humilis* estos difieren. Será pues importante tener en cuenta qué especie es la que queremos analizar y su distribución para poder escoger bien entre resolución temporal o espacial.

CONCLUSIONES

Los análisis de vegetación propuestos permiten detectar las respuestas predichas como consecuencia de un período de estrés hídrico. En función de la especie vegetal y la resolución espacial, los resultados difieren. Para el caso de *Pinus sylvestris*, estos muestran un elevado estrés en zonas de elevada radiación pero parece poco afectado en zonas de radiación baja, poniendo de relevancia la exigencia con respecto al requerimiento de agua de esta especie. En relación *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*, aparentemente poco sensible al período de estrés hídrico tanto en zonas de alta como baja radiación, no podemos afirmar que no se vea afectado por la sequía pero parecería que nos encontramos delante de una especie altamente resistente en cuanto a requisitos de carácter hídrico. En cambio *Quercus humilis* tiene una leve tendencia a indicar una mejor adaptación en zonas con una alta radiación solar, pudiéndose traducir este hecho como un caso de divergencia adaptativa dentro de una misma especie.

Es de destacar la eficacia del índice *SAVI*, como buen indicador de estrés hídrico y del *EVI* como buen indicador de la sensibilidad a la radiación solar. Aunque en general los resultados son satisfactorios se considera necesario el uso de un patrón climatológico espacio-temporal y así poder discriminar a una escala mayor las zonas de diferente radiación solar que han sufrido sequía.

BIBLIOGRAFÍA

- Gobron *et al*, 2005. The state of vegetation in Europe alter following the 2003 drought. *IJRS* 26:2013-20.
- Liu, H. Q., y Huete, A. R. (1995), A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 33:457-465.
- Zhang, X. *et al* (2002): MODIS Tasseled Cap Transformations & its Utility. *Geoscience & R. S. Symposium, 2002. IEEE International*. 2: 1063-65.