

Domingo, C.; Cristóbal, J.; Ninyerola, M. y Pons, X. (2008): Detección de pautas de estrés hídrico en tres especies forestales de Cataluña mediante imágenes TERRA-MODIS. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. Pp. 540-551. ISBN: 978-84-96971-53-0.

DETECCIÓN DE PAUTAS DE ESTRÉS HÍDRICO EN TRES ESPECIES FORESTALES DE CATALUÑA MEDIANTE IMÁGENES TERRA-MODIS

Domingo, C.¹; Cristóbal, J.¹; Ninyerola, M.² y Pons, X.^{1,3}

(1) Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. Edificio B, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona). Cristina.domingo@uab.cat

(2) Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y de Ecología. Facultad de Biociencias. Edificio C. Universidad Autónoma de Barcelona, 08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona).

(3) Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF). Edificio C, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona).

RESUMEN

Según los datos del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), el cambio climático provocará un aumento general de las temperaturas y una acentuación de los periodos de sequía en zonas mediterráneas, lo cual puede llegar a causar efectos directamente observables en las especies vegetales. El objetivo de este trabajo consiste en detectar pautas de estrés hídrico en zonas con diferente radiación solar para tres especies representativas a nivel forestal de Cataluña (Pinus sylvestris, Quercus humilis y Quercus ilex subsp. rotundifolia) mediante la comparación entre un período sin sequía (2001-2002) y un período de sequía acentuada (2003-2004) usando datos diarios TERRA-MODIS. Para llevar a cabo el análisis se han seleccionado un total de 346 imágenes, de las que se ha calculado índices como el NDVI, el SAVI, el EVI y los componentes del Tasseled Cap (Brightness, Wetness, Greenness).

El análisis ANOVA muestra que aunque P.sylvestris y Q.humilis presentan una pauta de estrés hídrico similar en zonas con alta radiación, las pautas en zonas sombrías difieren significativamente, indicando que P.sylvestris se adapta mejor a periodos de déficit hídrico. En el caso de Quercus ilex subsp. rotundifolia, el análisis no demuestra que éste se vea afectado por la sequía. Los resultados también muestran el grado de eficiencia de los índices utilizados, concluyendo que el componente Brightness no parece ser un buen indicador del estrés hídrico en zonas mediterráneas.

Palabras Clave: sequía, estrés hídrico, índice de vegetación, imágenes TERRA-MODIS, Cataluña.

ABSTRACT

According to the data of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), the climatic change will cause a general increase of the temperatures and an accentuation of the periods of drought in Mediterranean areas, which can cause directly observable effects in vegetal species. The aim of this paper consists in detecting guidelines of water stress in areas with different solar radiation for three representative forest species of Catalonia (Pinus sylvestris, Quercus humilis and Quercus ilex subsp. rotundifolia) through the comparison between a droughtless period (2001-2002) and a period of remarkable drought (2003-2004) using daily data TERRA-MODIS. To carry out the analysis, a total of 346 images have been selected, and indexes such as NDVI, SAVI, EVI and components of the Tasseled Cap (Brightness, Wetness, Greenness) have been calculated.

The analysis of variance (ANOVA) indicates that although P.sylvestris and Q.humilis present a similar hydric stress response in areas with high radiation, the response in shadowy areas differ significantly, indicating that P.sylvestris has a better adaptation to the period of water deficit. In the case of Quercus ilex subsp. rotundifolia the analysis does not prove that it is affected by the drought. The results also show the efficiency of the used indexes, concluding that the component Brightness does not seem to be a good indicator of the water stress in the Mediterranean areas.

Key Words: drought, water stress, vegetation index, TERRA-MODIS images, Catalonia.

INTRODUCCIÓN

El clima es uno de los factores que influyen más directamente sobre las especies vegetales definiendo los parámetros hídricos de las comunidades forestales. Cataluña se caracteriza por tener un clima mediterráneo con veranos que presentan estrictas restricciones que sobretodo condicionan la vida de la vegetación. Además, no podemos olvidar que el cambio climático está ampliamente aceptado como una realidad, con un aumento general de las temperaturas y una acentuación de los períodos de sequía. Las evidencias de estos periodos cada vez más frecuentes son directamente observables sobre las especies vegetales, ya que un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación provocan que la evapotranspiración de las plantas sea prácticamente igual a la cantidad de precipitación y, por tanto, se manifieste un déficit hídrico.

Desde diciembre de 1993 hasta septiembre de 1994 Cataluña sufrió un fuerte período de sequía que se consideró sumamente significativo (Martín et al., 1998). En 2003 se inicia el último período de sequía que aún perdura.

Es desde esta perspectiva que se plantea el siguiente análisis, el cual pretende evaluar las herramientas de Teledetección usadas para determinar pautas de estrés hídrico. También pretende poder hacer seguimientos temporales de estas pautas para algunas especies en concreto a través del cálculo de diferentes índices de vegetación que ayudan a comprender el estado fenológico de ésta.

Un primer objetivo de este proyecto es utilizar las técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica para poder hacer un análisis comparativo de varios índices de vegetación entre dos años sin sequía (2001 y 2002) y entre un año después de un período álgido del último episodio de sequía y un año sin tanta sequía (2001 y 2004) mediante un conjunto de imágenes MODIS correspondientes a estos periodos.

Un segundo objetivo es analizar los cambios a nivel fenológico que manifiesta una misma especie según si está presente en una zona con alta o baja radiación solar, dado que la situación geográfica en la que se encuentran muchas especies puede ser un factor significativo a tener en cuenta en periodos de sequía.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio en este proyecto es Cataluña, de aproximadamente 32000 km² de superficie y unos 580 km de costa. Las coordenadas en UTM huso 31-N del ámbito de estudio son las siguientes:

Xmín: 244000m Xmáx: 535000m

Ymín: 4481000m Ymáx: 4763000m

Cataluña limita al norte con Francia y Andorra, al sur con Valencia y al oeste con Aragón. Dispone de una gran riqueza climática debido a su orografía cuya altitud media es de unos 640 m cubriendo un rango de 0 m a 3000 m. La orografía fragmentada en cordilleras y depresiones y las acentuadas orientaciones son las causantes de contrastes climáticos, pudiendo así dividir el clima catalán en cinco grandes grupos:

- clima mediterráneo de costa, que abarca gran parte del país, con un verano largo y caluroso y un invierno suave con pocas lluvias;
- clima mediterráneo de interior que cubre todas las comarcas de interior con veranos e inviernos de temperaturas severas;
- clima mediterráneo de montaña que incluye las comarcas pirenaicas (excepto las que tienen clima atlántico) con veranos lluviosos y temperaturas frescas e inviernos fríos que se caracterizan por las inversiones térmicas de los valles;
- zona de transición entre clima mediterráneo y clima atlántico que cubre un área muy pequeña y tiene características de ambos climas;
- y clima atlántico de montaña que incluye la parte del Pirineo aranés con lluvias regulares todo el año.

Esta diversidad climática permite la existencia de una gran diversidad de paisajes naturales, caracterizada por un gran mosaico de comunidades vegetales. Generalmente, en las tierras bajas encontramos matorrales y pinares junto con encinares, carrascales y maquias. A altitudes intermedias conviven bosques caducifolios de robles y hayas con bosques de pino silvestre, mientras que en las zonas alpinas encontramos bosques de pino negro y abetales.

MATERIAL Y METODOS

La metodología de este proyecto ha consistido en la integración de las variables que pueden ayudar a determinar el estado fenológico de la vegetación en una base de datos, con la finalidad de poder hacer consultas y posteriores análisis. El material usado es el siguiente:

- Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC).
- Mapa de Hábitats de Cataluña (MHC).
- Atlas Climático Digital de Cataluña.

Un total de 2343 imágenes TERRA MODIS diarias del producto de Reflectancias (MOD09 *Surface Reflectance*) tomadas entre abril de 2000 y diciembre de 2006. Este producto ya tiene aplicado una corrección geométrica y una corrección atmosférica (Vermote et al. 1999). Estas imágenes tienen una resolución espacial de 500 m.

Un total de 2343 imágenes TERRA MODIS diarias del producto de Temperatura de Superficie Terrestre (TST) (MOD11A1 *Land Surface Temperature and Emissivity*) tomadas entre abril de 2000 y diciembre de 2006. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 1000 m.

El satélite TERRA, que lleva el instrumento MODIS a bordo, es un satélite heliosíncrono, que orbita a una altura de unos 705 km y tiene un *swath* de unos 2330 km. La hora de paso del satélite sobre nuestra zona de estudio se sitúa entre las 10:00 UTC y las 11:00 UTC. El sensor MODIS tiene 36 bandas espectrales que engloban unas longitudes de onda desde 0.4 μm a 14.4 μm . Las dos primeras bandas tienen una resolución espacial de 250 m, de la banda 3 a la 7 la resolución espacial es de 500 m y el resto de bandas tienen una resolución más baja, 1000 m (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resolución espectral, radiométrica y espacial del sensor MODIS

Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)	Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)
1	0.620 - 0.670	250	11	0.526 - 0.536	1000
2	0.841 - 0.876	250	12	0.546 - 0.556	1000
3	0.459 - 0.479	500	13	0.662 - 0.672	1000
4	0.545 - 0.565	500	14	0.673 - 0.683	1000
5	1.230 - 1.250	500	15	0.743 - 0.753	1000
6	1.628 - 1.652	500	16	0.862 - 0.877	1000
7	2.105 - 2.155	500	17	0.890 - 0.920	1000
8	0.405 - 0.420	1000	18	0.931 - 0.941	1000
9	0.438 - 0.448	1000	19	0.915 - 0.965	1000
10	0.483 - 0.493	1000	20-36	3.660-14.385	1000

Podemos estructurar la metodología utilizada en este estudio en tres fases:

Descarga, importación, georeferenciación y procesamiento de las imágenes TERRA-MODIS

Se han descargado un total de 2343 imágenes desde el servidor de la USGS (*United States Geological Survey*) (<http://elpld03.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html>). Se ha desarrollado una aplicación en IDL para importar las imágenes a formato MiraMon y se han georeferenciado, cambiado la proyección y recortado para el ámbito de estudio. Además se 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) con un umbral mayor a 0.4 (Dozier, 1989; Cea et al., 2007). Este sensor presenta un ángulo de escaneo o campo de visión total muy amplio que provoca que haya una distorsión panorámica muy acentuada, en aumento cuanto más nos alejamos del nadir de la imagen. Como consecuencia, el tamaño del pixel varía sensiblemente desde el centro hacia los extremos de la imagen, provocando un efecto de deformación geométrica que puede llegar a crear píxeles hasta 6 veces más amplios y 4 veces más largos. Este efecto se llama *bow tie effect* (Yang, 2004) (ver Figura 1).

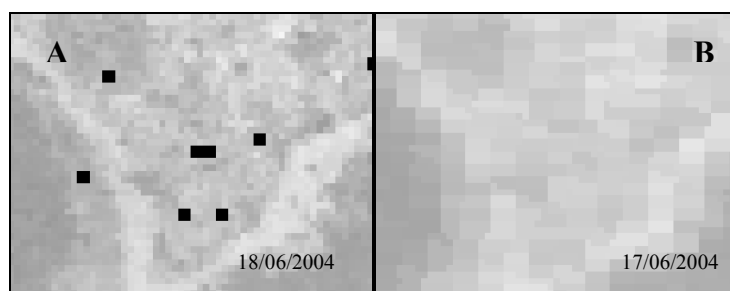


Figura 1.Detalle de la distorsión provocada por el *bow tie effect* de las imágenes TERRA MODIS en una misma zona.A) sin distorsión B) con distorsión.

Debido a eso, las 2343 imágenes se han revisado individualmente y clasificado en distorsionadas o no. Al mismo tiempo se ha evaluado el porcentaje de la cubierta de nubes en base a una interpretación visual ya que es un proceso difícil de automatizar. Según Cracknell y Hayes (1997) es una de las formas más eficaces ya que el intérprete puede incluir una serie de criterios espectrales y espaciales que son complicados de definir en términos algorítmicos. Se ha seleccionado aquellas imágenes no distorsionadas que presentan una cubierta nubosa igual o menor al 50% de la imagen. Finalmente la cantidad de imágenes útiles ha quedado reducida a 702 (ver Tabla 2).

Tabla 2. Selección final de las imágenes MODIS. En cursiva y rojo, las imágenes analizadas.

	Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Total
	Total imágenes disponibles	243	345	319	351	362	363	360	2343
Imágenes filtradas por mes	1	-	9	6	5	7	8	3	
	2	-	13	8	3	7	5	3	
	3	-	11	3	12	6	9	6	
	4	8	15	8	11	9	8	7	
	5	9	11	10	11	9	9	7	
	6	12	7	14	13	13	7	10	
	7	14	13	12	12	7	10	11	
	8	7	10	13	13	10	10	9	
	9	12	14	13	7	9	10	5	
	10	5	12	8	9	10	7	4	
	11	11	11	9	2	10	6	3	
	12	10	6	7	2	6	8	3	
	Total filtrado	88	<i>132</i>	<i>111</i>	100	<i>103</i>	97	71	702

A partir de los productos TERRA MODIS también se han calculado los siguientes índices de vegetación para todas las fechas:

- *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI): Desarrollado por Rouse et al. (1973), se define como:

$$NDVI = (\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + \rho_R) \quad [1]$$

donde la banda IRC es infrarrojo cercano, R es rojo y ρ es reflectancia.

Un aspecto interesante de este índice frente al cociente simple es que toma valores entre -1 y 1, lo cual facilita notablemente su interpretación.

- *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI): Entre los muchos factores que afectan notablemente al comportamiento del NDVI, se encuentra la proporción de vegetación/suelo observada por el sensor. Para incluir explícitamente el factor suelo, Huete et al. (1992) sugirieron incluir un parámetro L en la fórmula [1] que minimizara el efecto del suelo sobre este índice.

$$SAVI = \left\{ (\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + \rho_R) + L \right\} (1 + L) \quad [2]$$

donde L es una constante que depende del tipo de suelo. En nuestro caso se ha fijado a 0.5.

- *Enhanced Vegetation Index* (EVI): Este índice optimiza la señal de la vegetación (Liu y Huete, 1995).

$$EVI = G \left\{ (\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + C1\rho_R - C2\rho_B + L) \right\} \quad [3]$$

donde B es la banda del azul, C1 igual a 6 y C2 igual a 7.5 (coeficientes que intentan corregir los efectos de dispersión atmosférica) y G es un factor de ganancia, en nuestro caso equivalente a 2.5.

- *Transformación Tasseled Cap*: En esta transformación se obtienen nuevas bandas por combinación de las originales, con el fin de acentuar algunos rasgos de interés de las imágenes. Los coeficientes aplicados en la transformación correspondientes al sensor MODIS se pueden consultar en Xiaoyang Zhang et al. (2002). Se distinguen tres componentes:
 - *Brightness*: manifiesta los cambios en la reflectividad total de la imagen. También conocido como índice de brillantez.
 - *Wetness*: relacionado con el contenido de agua de la vegetación y del suelo. También conocido como índice de humedad.
 - *Greenness*: relacionado con la actividad vegetativa. También conocido como índice de verdor.

Selección de las áreas de interés para las diferentes especies forestales

La selección de las áreas de estudio se ha llevado a cabo mediante el MHC y IEFC (ver Figura 2). Primeramente se han seleccionado aquellos puntos del IEFC donde el recubrimiento de la especie principal es mayor o igual al 70% y el porcentaje de área basal es mayor o igual al 70%. Del MHC se han seleccionado aquellos polígonos donde la especie principal tiene un recubrimiento mayor o igual al 70%. Se ha usado este criterio con la finalidad de obtener zonas de vegetación con un alto grado de homogeneidad. Se ha creado un tesoro donde se ha unificado la leyenda del MHC y del IEFC y se han combinado ambas capas para poder seleccionar posteriormente aquellos polígonos que coinciden en el campo especie. Seguidamente se ha creado una malla vectorial

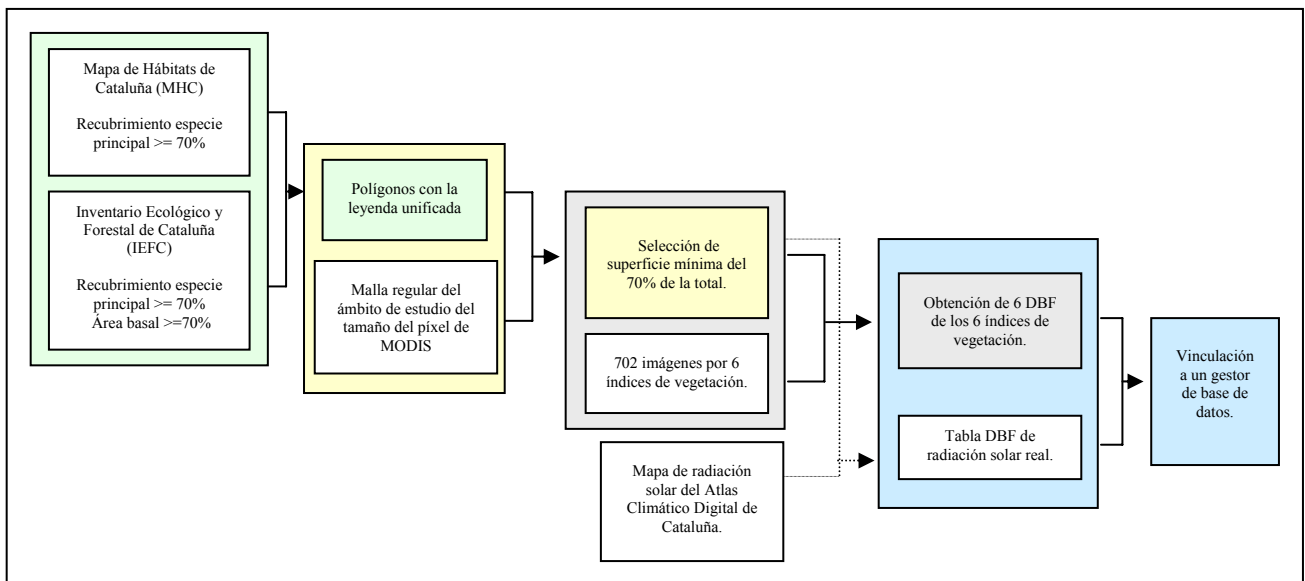


Figura 2. Esquema donde se muestran los procesos y combinaciones utilizados en la metodología.

del ámbito de estudio a partir de las imágenes MODIS, donde cada pixel corresponde a un polígono cuadrado de 500 m por 500 m, 250.000 m² de superficie. Esta malla regular se ha combinado con la selección anterior (ver Figura 3). Para el nuevo vector de polígonos, que ha dejado de ser regular, se ha determinado un criterio de área mínima representativa de polígono del 70% del total de la superficie. De esta manera, todos aquellos polígonos con un área menor a 175.000 m² han sido rechazados por considerarse poco representativos.

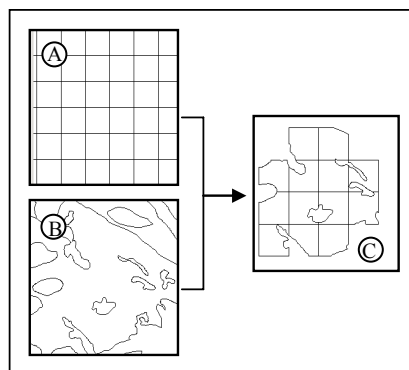


Figura 3. Combinación de la malla con el primer vector de polígonos, obteniéndose el nuevo vector de polígonos irregulares. A) Malla regular, B) Polígonos con la leyenda unificada, C) Resultado finales.

Preparación de la base de datos de los índices de vegetación, de los datos climáticos y selección de las especies

Para preparar la base de datos, ha sido necesario combinar la capa de polígonos con cada una de las imágenes que tenemos para cada índice. Debido a la cantidad de imágenes (702 imágenes por 6 índices) y el tiempo que supone una combinación, este proceso se ha automatizado, obteniéndose como resultado 6 tablas DBF correspondientes a cada índice (ver Figura 2).

Paralelamente, de los productos que ofrece el Atlas Climático Digital de Cataluña se ha descargado el correspondiente a la media anual de radiación solar real. Esta imagen también se ha combinado con la capa de polígonos creada a partir de la segunda combinación explicada en el punto 2 de esta sección (ver Figura 2). Da-

do que la resolución espacial del mapa de radiación solar es de 180 m se ha calculado la media de la radiación solar para cada polígono.

Se ha decidido hacer el análisis para 3 especies: *Quercus humilis* (roble pubescente), *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* (carrasca) y *Pinus sylvestris* (pino silvestre). El *Pinus sylvestris* se ha escogido porque es una especie perennifolia muy representativa en nuestra área de estudio que conforma bosques eurosiberianos en pisos montanos de grandes extensiones. En Cataluña el 18% del total de la masa forestal corresponde a esta especie. Por otra parte, el *Quercus humilis* es una especie también presente en zonas eurosiberianas, pero característica de regiones de transición en zona mediterránea y, a diferencia del pino silvestre, es marcescente. Finalmente, el *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* conforma comunidades forestales de tipo totalmente mediterráneo continental.

Se ha hecho una consulta del rango de radiación solar real para cada especie y se ha calculado la media y la desviación estándar con la finalidad de poder dividir los polígonos entre poco irradiados y muy irradiados, restando o sumando una desviación estándar a la media (ver Tabla 3).

Tabla 3. Medias, desviaciones estándar y rangos de radiación solar para cada especie. Unidades: $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

Especie	Media	Desv. est.	Rango	
			Baja radiación	Alta radiación
<i>Pinus sylvestris</i>	1318.96	170.62	(818 , 1148]	[1489 , 1702)
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	1451.46	120.14	(966 , 1331]	[1571 , 1702)
<i>Quercus humilis</i>	1447.67	143.43	(946 , 1304]	[1591 , 1652)

A continuación, sobre un mapa de orientaciones se han seleccionado manualmente aquellos polígonos que se encuentran en las solanas y aquellos que están en umbría. Para cada especie han sido seleccionados un número de polígonos diferente para un bajo y un alto nivel de radiación solar (ver Tabla 4 y Figura 4).

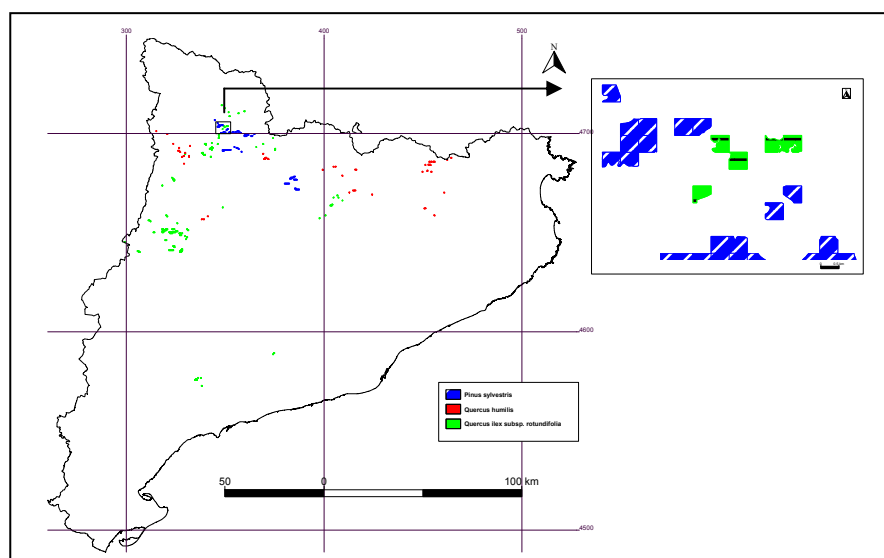


Figura 4. Distribución de los polígonos seleccionados para las tres especies de estudio con una zona en detalle.

Tabla 4. Numero de polígonos seleccionados por especie y extensión de su superficie total en función de la radiación solar.

Especie	Nº. polígonos		Superficie total (ha)
	Baja radiación	Alta radiación	
<i>Pinus sylvestris</i>	47	36	1890
<i>Quercus ilex subsp. rotundifolia</i>	78	52	2842
<i>Quercus humilis</i>	32	19	1064

Análisis estadístico

Durante el 2001 y el 2002 no se registró ningún periodo de sequía intenso, pero en el año 2003, Cataluña sufrió una importante sequía que afectó, entre otras, a la comunidad forestal. Es por esta razón que se ha escogido hacer el análisis para el 2004, un año después de la fuerte sequía, para poder evaluar así los efectos de ésta. Dado que se pretende evaluar pautas de estrés hídrico, se ha escogido las imágenes correspondientes a 2001, 2002 y 2004, un total de 346 de las 702 iniciales.

Así pues, se ha calculado, para cada polígono, las medias anuales de los índices para los años 2001, 2002 y 2004, separándolos entre polígonos con baja radiación solar y alta radiación solar.

Con la ayuda del programa estadístico SPSS, se ha observado si hay una diferencia significativa entre las medias de las zonas de alta y baja radiación entre los años 2001-2002 y 2001-2004 a través de un análisis de la variancia (ANOVA) con una significación de $\alpha=0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pino silvestre (*Pinus sylvestris*)

Los píxeles de *P.sylvestris* que se han seleccionado, tienen una extensión aproximada de unas 2000 ha y un rango de radiación solar que va desde 818 a 1702 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Una vez calculada la media y la desviación estándar, se ha establecido un umbral de baja radiación hasta 1148 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y un umbral de alta radiación a partir de 1489 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (ver Tabla 3).

Tal como se puede consultar en la Tabla 5, en las zonas con baja radiación sólo el índice *Wetness* es significativo tanto para la comparación 2001-2002 como para la comparación 2001-2004. Eso indicaría que esta especie, si se encuentra en zonas sombrías se adapta favorablemente al estrés hídrico causado por una sequía como la del 2003.

Si miramos el resultado en las zonas muy irradiadas, se observa que para los años 2001-2002 y 2001-2004, continúa siendo significativo el índice *Wetness* y, además, el SAVI. Este hecho nos haría pensar que también se adapta favorablemente al estrés en estas zonas si no fuera porque, para los años 2001-2004, hay una diferencia significativa también en los índices *Greenness* y NDVI. Es decir, cuando esta especie se encuentra en zonas con alta radiación solar, la presencia de un año de sequía provoca que sufra un estrés hídrico lo bastante importante para que se vea reflejado en los índices de vegetación y, por lo tanto, detectable mediante Teledetección. Gracias a este análisis, podemos decir que el *P.sylvestris* es una especie sensible a la sequía, especialmente si se encuentra en zonas donde recibe alta radiación solar. Eso confirma el hecho de que se defina el pino silvestre como una especie que soporta muy bien la sombra pero que es muy exigente respecto a los requerimientos de agua (IEFC, 2004).

Carrasca (*Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*)

La selección de la carrasca, de aproximadamente 3000 ha, engloba una radiación solar desde 966 hasta 1702 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Se ha establecido el umbral de baja radiación hasta 1331 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el de máxima radiación desde 1571 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (ver Tabla 3). Si comparamos las medias con una ANOVA (ver Tabla 5), vemos que para ninguno de los índices evaluados hay unas diferencias significativas, ni para los años 2001-2002 ni para el 2001-2004; ni tampoco para las zonas con baja o alta radiación. Aunque en este caso no se han podido detectar unas claras evidencias de estrés mediante Teledetección, no podemos afirmar que esta especie no sufra estrés hídrico en estas condiciones.

Tabla 5. Nivel de significación del análisis de variancia para cada especie y situación para un intervalo de confianza del 95%. Diferencias significativas en cursiva y rojo.

	Índice de vegetación	Sig. Baja radiación		Sig. Alta radiación	
		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

Roble pubescente (*Quercus humilis*)

El roble pubescente es una especie muy presente en el paisaje catalán pero muy poco dominante debido a la práctica silvícola que ha reducido enormemente su dominancia en los bosques de Cataluña (IEFC, 2004). Este hecho nos ha limitado a la hora de seleccionar los polígonos. Para esta especie, pues, el análisis se hace con una extensión de poco más de 1000 ha. El rango de radiación solar donde encontramos esta especie es desde 946 hasta 1652 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Se hace notar que, de entrada, el máximo de radiación es sensiblemente menor que el de las otras especies, mientras que el mínimo es sensiblemente mayor, hecho que disminuye el rango de radiación global para esta especie. El umbral establecido para baja radiación se sitúa en 1304 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el umbral para alta radiación se ha establecido a partir de 1591 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (ver Tabla 3). Esta especie no presenta diferencias significativas entre 2001-2002 ni para baja ni para alta radiación (ver Tabla 5). Contrariamente, si observamos el resultado del análisis entre 2001-2004, los polígonos con baja radiación presentan índices con diferencias más significativas que los polígonos con alta radiación. Este resultado nos indica que, frente a una sequía, esta especie responde mejor en las zonas donde hay más radiación que en las zonas donde hay menos, ya que los índices *Greenness* y NDVI sólo presentan diferencias significativas en las zonas menos irradiadas. Esto

indicaría una divergencia adaptativa dentro de una misma especie, hecho que incrementaría su importancia dentro de nuestros bosques. Este patrón de comportamiento es justo el contrario del que nos encontramos con el pino silvestre. Este resultado podría estar sesgado debido al número de muestras ya que tal como se aprecia en la Tabla 4, el número de muestras en zonas de baja radiación es el doble que en las zonas de alta radiación. Para hacer el análisis más equilibrado, este se podría repetir aumentando el número de datos de la zona de alta radiación.

Análisis de sensibilidad de los índices de vegetación

Si se observa detalladamente la Tabla 5, se puede evaluar la sensibilidad de los índices y determinar la utilidad de éstos. De entre todos, el *Wetness* y el SAVI parecen ser más sensibles a la radiación recibida que al déficit hídrico en sí. Estos índices nos ayudan a determinar en qué zonas la respuesta de cada especie es mejor y también ayudan a establecer posibles divergencias adaptativas. Los índices *Greenness* y NDVI son más sensibles al déficit hídrico entre años y nos ayudan a detectar mejor las señales de estrés hídrico que sufren estas especies. El índice EVI, aunque más débilmente, seguiría esta línea. En cambio el índice *Brightness* en ningún caso presenta significación y la información que nos da no es una clara indicadora de resultados. El índice *Brightness* parecería, pues, poco interesante a la hora de aportar información en relación a la sequía. Esto podría ser debido a que este índice es el resultado del promedio de todas las bandas (Crist y Cicone, 1984) y, por lo tanto, no hay ningún tipo de selección a priori.

CONCLUSIONES

El presente proyecto ha llevado a cabo un estudio de Teledetección aplicado a la detección y seguimiento de pautas de estrés hídrico en tres especies forestales. El propósito ha sido, por un lado, la evaluación de la utilidad de algunos índices de vegetación como indicadores de estrés hídrico, y, por otro lado, el análisis de la influencia de la radiación solar en una misma especie durante un período de sequía.

En primer lugar, la metodología seguida ha permitido simplificar los datos y la coherencia de estos. Usar tanto los datos provenientes del MHC como del IEFM ha contribuido a verificar que los puntos escogidos correspondan realmente a cada especie en cuestión, eliminando así posibles incoherencias. Del mismo modo, la selección inicial de los puntos y polígonos del IEFM y del MHC con recubrimiento mayor o igual al 70% también ha contribuido al filtrado de las zonas de vegetación, obteniendo un alto grado de homogeneidad en estas.

En segundo lugar, la resolución temporal diaria con la que se ha empezado a trabajar ha permitido obtener unas medias anuales de los índices muy representativas, que posteriormente y en futuras líneas de investigación podrían ayudar a tener una clara muestra de la evolución de los índices de vegetación.

En tercer lugar, el hecho de crear una malla del tamaño del píxel de MODIS ha facilitado el tratamiento de los datos. Este método también ha permitido la aplicación del segundo filtro de homogeneidad, estableciendo el criterio de área mínima representativa de polígono para cada especie del 70% de la superficie total.

Las respuestas a los análisis expuestos han determinado una adaptación favorable a las zonas sombrías de *Pinus sylvestris* y la exigencia con respecto al requerimiento de agua de esta especie.

Por otra parte, aunque el análisis no presente diferencias significativas para *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*, no podemos afirmar que ésta especie no se vea afectada por la sequía.

En el caso de *Quercus humilis*, éste presenta unas diferencias más significativas entre los periodos de zonas de baja radiación, hecho que indicaría menor adaptación de la especie en estas zonas.

Finalmente, este análisis también ha enfatizado la utilidad de los índices que se ha examinado. Se ha visto que en ninguno de los resultados, el índice *Brightness* obtenido de la transformación de *Tasseled Cap* ha presentado información significativa. Eso lo nominaría a ser descartado en posteriores análisis. En cambio, los índices *Greenness*, NDVI y EVI son sensibles a las señales de estrés hídrico, mientras que el índice *Wetness* y el SAVI son sensibles a la discriminación de la radiación solar recibida en condiciones de sequía.

A nivel metodológico, se podría mejorar la resolución espacial de las imágenes y trabajar con imágenes LANDSAT 5-TM de resolución de 30 m en el visible e infrarrojo y de 120 m en el térmico. Sin embargo, el beneficio obtenido por una mayor resolución espacial estaría en detrimento de una importante resolución temporal, ya que este satélite tiene un periodo de revisita de la zona de estudio de 16 días, en el mejor de los casos.

El numero de índices usados podría ampliar y incluso cambiar alguno. Un posible índice interesante a analizar sería el Grado de Estrés Diario (GED) calculado a partir de la diferencia entre la TST y la temperatura del aire al paso del satélite.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Laia Núñez por su contribución en este estudio durante el proceso de descarga y selección de imágenes.

REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cea, C; Cristóbal, J y Pons X (2007): An improved methodology to map snow cover by means of Landsat and MODIS imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2007, pp. 4217-4220.
- Cracknell, A.P y Hayes, L.W.B. (1997): *The Avanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. Taylor & Francis, Londres.
- Crist, Eric P.; Cicone, Richard C.; (1984) A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data: The TM Tasseled Cap. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 22 (3): 256-263
- Dozier, J. (1989): Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28: 9-22.
- Dytham, C. (2005): *Choosing and using statistics. A biologist's guide*. Blackwell Publishing, Oxford. 248pp.
- Gracia,C; Burriel, J.A.; Ibàñez, J.; Mata, T. y Vayreda, J. (2004): *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes*. CREAF, Bellaterra, Barcelona.
- Liu, H. Q., y Huete, A. R. (1995): A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy bacground and atmospheric noise. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33: 457-465.
- Martín, M.P.; Chuvieco, E.; Aguado, I. (1998): La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica*, 7: 23-36.
- Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J. (2000): A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation though GIS techniques. *Int. J. of Climatology*, 20: 1823-1841.
- Ninyerola, M. (1997): Modelització climatològica de la radiació solar, la temperatura i la precipitació a través d'un Sistema d'Informació Geogràfica. (Tesina), Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia.

- Pons, X. (2004): MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREA. Bellaterra, Barcelona.
- Pons, X. (1996): Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. En: Juaristi, J. y Moro, I. (eds.), *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Vitoria-Gasteiz.
- Rouse J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W. (1973): Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*. NASA SP-351, I: 309-317.
- Vermote, E.F. y Vermeulen, A. (1999): Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD 09) Version 4.0.: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf
- Yang, W. y Di, L. (2004): An accurate and automated approach to georectification of HDF-EOS swath data, *Photogram. Eng. And Rem. Sens.* 70, 397-40.
- Zhang, X., Schaaf, C.B., Friedl, M.A., Strahler, A.H., Gao, F. y Hodges, J.C.F. (2002): MODIS Tasseled Cap Transformations and its Utility. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02*. IEEE International, 2: 1063-1065.
- Atles Climàtic Digital de Catalunya (2001): <http://magno.uab.es/atles-climatic/index.htm> [Página visitada el día 16/08/2007]
- EOS Data Gateway: <http://elpdl03.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html> [Página visitada el día 06/07/2007]