

COMPORTAMIENTO DIFERENCIAL DE ESPECIES FORESTALES MEDITERRÁNEAS DURANTE UN PERIODO DE ESTRÉS HÍDRICO MEDIANTE TELEDETECCIÓN

DOMINGO MARIMON, C

Departamento de Geografía. Ed.B.Universitat Autònoma de Barcelona
08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona)
Cristina . Domingo@uab.es

CRISTÓBAL ROSSELLÓ, J

Departamento de Geografía. Ed.B.Universitat Autònoma de Barcelona
08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona)

NINYEROLA CASALS, M

Departamento de Biología Animal, de Biología Vegetal y de Ecología. Ed. C. Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona)

PONS FERNÁNDEZ, X

Departamento de Geografía. Ed.B.Universitat Autònoma de Barcelona
Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), Ed. C. Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Cerdanyola del Vallès (Barcelona).

Palabras Clave: Teledetección de cambios, sequía, estrés hídrico, índices de vegetación, TERRA-MODIS, Cataluña.

RESUMEN

Según los datos del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), el cambio climático provoca un aumento general de las temperaturas y una disminución de la precipitación. Esto puede causar que la evapotranspiración de las plantas sea prácticamente igual a la cantidad de precipitación, manifestándose así un déficit hídrico. Esta acentuación de los periodos de sequía puede llegar a causar, en zonas mediterráneas, efectos directamente observables en las especies vegetales. En Cataluña, región eminentemente mediterránea, el clima se caracteriza por periodos que presentan estrictas restricciones hídricas que condicionan la vida de la vegetación. Los efectos de estas restricciones pueden acabar siendo causa de un cambio observable a nivel de las cubiertas terrestres y detectables a través de la Teledetección.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar, a través de la Teledetección, el efecto diferencial del estrés hídrico en zonas con desigual radiación solar para diferentes especies forestales representativas de Cataluña; las especies analizadas son *Pinus sylvestris* y *Quercus humilis* y la comparación se efectúa, usando datos diarios TERRA-MODIS, entre un período sin sequía (2001-2002) y un período de sequía acentuada (2003-2004). Para el análisis se han seleccionado un total de 446 imágenes, de las que se ha calculado índices como el NDVI, el SAVI, el EVI y los componentes de la transformación *Tasseled Cap* (*Brightness, Wetness, Greenness*). Los resultados del ANOVA muestran diferencias significativas para los diferentes índices utilizados así como entre las diferentes especies analizadas: *P. sylvestris* y *Q. humilis*. En efecto, dichas especies presentan una pauta de estrés hídrico similar en zonas con mucha radiación, pero las pautas en zonas sombrías difieren significativamente, indicando que *P. sylvestris* se adapta mejor a períodos de déficit hídrico. Los resultados también muestran el grado de eficiencia de los índices utilizados, con lo que el presente trabajo también aporta conocimiento sobre qué índices pueden llegar a ser los mejores indicadores del estrés hídrico en zonas mediterráneas.

1 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. Desde un punto de vista climatológico, la sequía presenta un déficit relativo de humedad durante un período determinado donde también aumenta la temperatura, que provoca un desequilibrio entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Estos efectos son directamente observables sobre las especies vegetales, ya que la evapotranspiración de las plantas es prácticamente igual a la cantidad de precipitación y, por tanto, se manifiesta un déficit hídrico.

Aunque desde diciembre de 1993 hasta septiembre de 1994 Cataluña sufrió un fuerte período de sequía que se consideró sumamente significativo [1], el último período de sequía, que aún perdura, se inició en 2003.

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

Una primera parte de este proyecto consiste en 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 sequía (2001 y 2004) mediante un conjunto de imágenes MODIS correspondientes a estos periodos.

El segundo objetivo consiste en detectar los posibles cambios a nivel fenológico que manifieste 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.

2 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 se presenta fragmentada en cordilleras y depresiones y acentuadas orientaciones que 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 amplio 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.

3 MATERIAL Y METODOS

La metodología de este proyecto ha consistido en integrar en una base de datos ciertas variables que pueden ser indicativas del estado fenológico de la vegetación, con la finalidad de poder hacer consultas y posteriores análisis. Para ello se ha utilizado el Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC), el Mapa de Hábitats de Cataluña (MHC) y el Atlas Climático Digital de Cataluña [2], como bases de referencia.

También se han utilizado 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, de 500 m de resolución espacial, ya tiene aplicado una corrección geométrica y una corrección atmosférica [3]. Así mismo, se han usado el mismo número de imágenes del producto de Temperatura de Superficie Terrestre (TST) (MOD11A1 *Land Surface Temperature and Emissivity*) para el mismo período, cuya resolución espacial es 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).

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

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

Este sensor presenta un ángulo de escaneo o campo de visión total muy amplio ($\pm 55^\circ$) de modo que la longitud del *swath*, de 10 km en el nadir, pasa a ser de 20 km en los extremos de la imagen [4]. Junto con otros factores, como la curvatura de la superficie terrestre, esto provoca que haya una distorsión panorámica muy acentuada que aumenta cuanto más nos alejamos del nadir de la imagen. Como consecuencia, el tamaño del píxel 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 *bowtie effect* [5] (ver Figura 1).

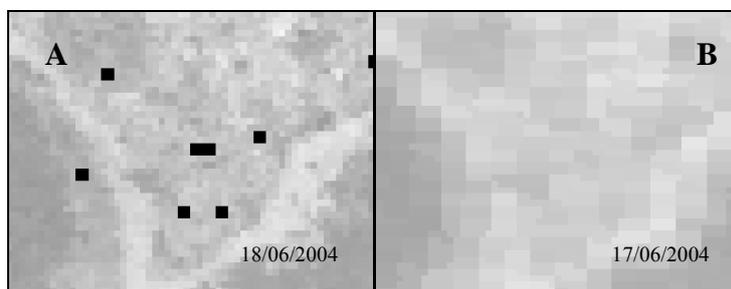


Figura 1: Detalle de la distorsión provocada por el *bowtie effect* y curvatura terrestre de las imágenes TERRA MODIS en una misma zona. A) sin distorsión B) con distorsión.

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

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

Primeramente se han descargado todas las imágenes citadas anteriormente desde el servidor de la USGS (United States Geological Survey) (<http://elpld103.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/index.html>) [6]. A continuación, mediante el desarrollo de una aplicación en IDL, se han importado las imágenes a formato MiraMon [7] 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 [8] y [9].

Debido al *bowtie effect* explicado con anterioridad, las 2343 imágenes se han revisado individualmente y clasificado en distorsionadas o no, descartando aquellas que presentan un efecto muy acentuado. 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 [10] la interpretación visual 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 quedando finalmente el total de imágenes válidas reducido a 702 (ver Tabla 2).

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

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

A partir de los productos TERRA MODIS se ha procedido al cálculo de los siguientes índices de vegetación para todas las fechas:

- *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI): Desarrollado por [11], 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, se sugirió incluir un parámetro L en la fórmula (1) que minimizara el efecto del suelo sobre este índice [12].

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

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 [13]:

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

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 [14]. 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.

3.2 Selección de las áreas de interés para las diferentes especies forestales.

La selección de las áreas de estudio se ha llevado a cabo mediante la combinación del 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%. Paralelamente también se han seleccionado aquellos polígonos del MHC donde la especie principal tiene un recubrimiento mayor o igual al 70%. Se ha creado un tesauro 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, y así obtener un alto grado de homogeneidad en la muestra seleccionada.

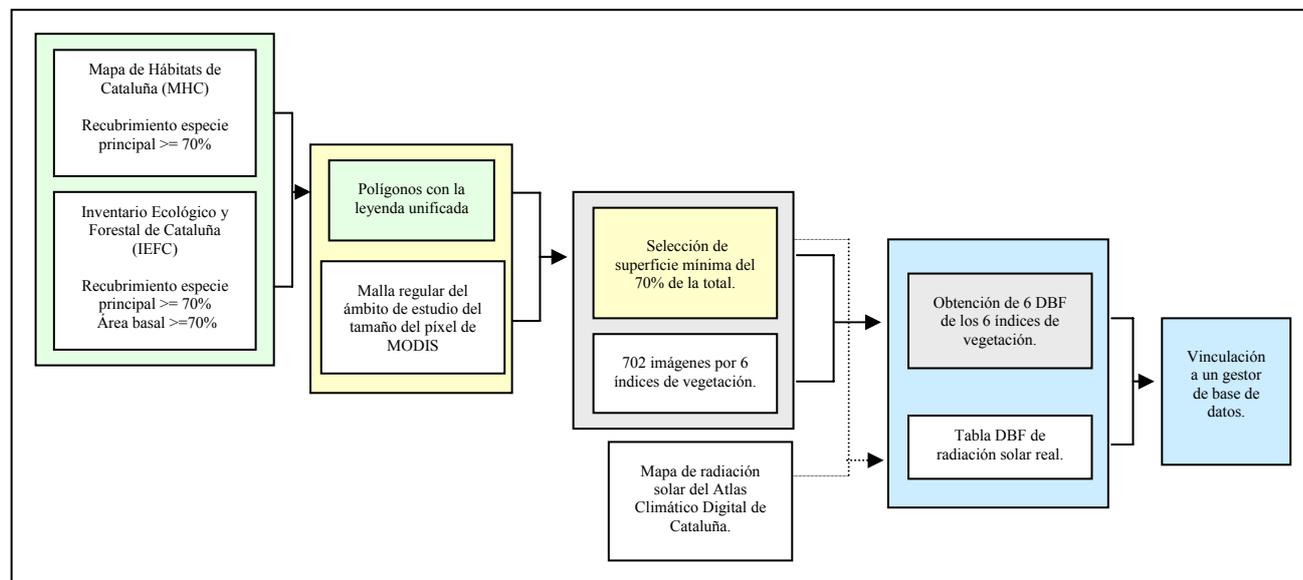


Figura 2: Esquema donde se muestran los procesos y combinaciones utilizados en la metodología.

Seguidamente se ha creado una malla vectorial del ámbito de estudio a partir de las imágenes MODIS, donde cada polígono de la malla corresponde a un píxel de MODIS de 500*500m, 250000 m². 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.

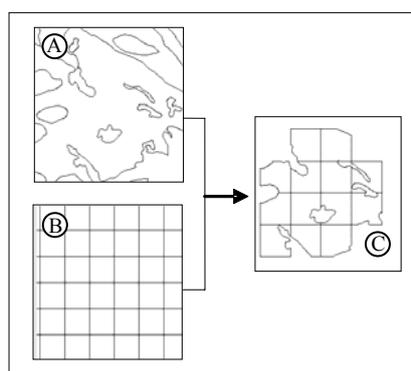


Figura 3: Combinación de la malla con el primer vector de polígonos, obteniéndose el nuevo vector de polígonos irregulares. A) Polígonos con la leyenda unificada, B) Malla regular, C) Resultado finales.

3.3 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 última capa de polígonos irregulares 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 únicas 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 irregular de polígonos (ver Figura 2). Dado 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.

Para el análisis se han escogido 3 especies: *Quercus humilis* (roble pubescente), *Quercus ilex* subsp. *rotundifolia* (carrasca) y *Pinus sylvestris* (pino silvestre). *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.

Mediante una consulta del rango de radiación solar real para cada especie, 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).

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)

Tabla 3: Medias, desviaciones estándar y rangos de radiación solar para cada especie. Unidades: 10 kJ m⁻² día⁻¹

A continuación, sobre un mapa de orientaciones se han seleccionado polígonos que se encuentran en las solanas y polígonos 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).

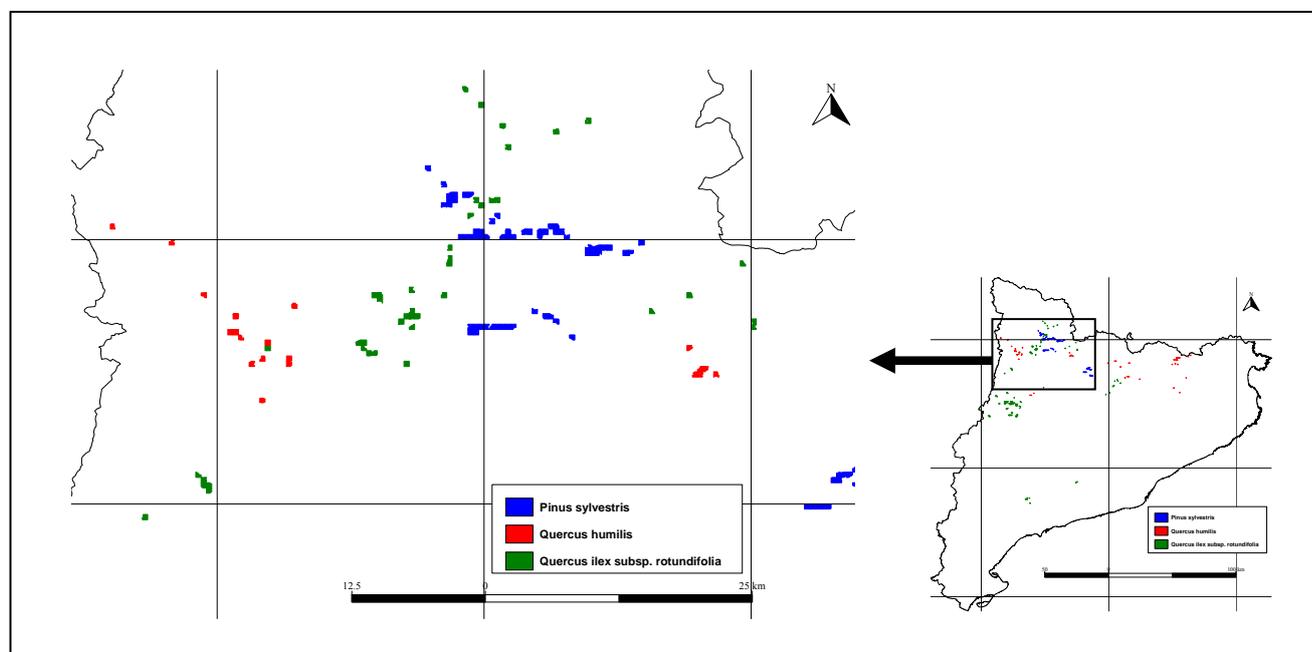


Figura 4: Detalle de la distribución de los polígonos seleccionados para las tres especies de estudio.

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

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

3.4 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, para cada polígono se ha calculado las medias anuales de los índices para dichos años, 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 $\alpha=0.05$.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Pino silvestre (*Pinus sylvestris*)

La muestra seleccionada de *P.sylvestris* corresponde a 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 [15].

4.2 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). Los resultados del análisis ANOVA (ver Tabla 5) no presentan 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.

	Índice de vegetación	Sig. Baja radiación		Sig. Alta radiación	
		2001-2002	2001-2004	2001-2002	2001-2004
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Brightness</i>	0.121	0.645	0.119	0.163
	<i>Greenness</i>	0.337	0.615	0.260	<i>0.000</i>
	<i>Wetness</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>
	EVI	0.196	0.879	0.350	0.118
	NDVI	0.318	0.263	0.188	<i>0.044</i>
	SAVI	0.367	0.708	<i>0.000</i>	<i>0.001</i>
<i>Quercus ilex</i> subsp. <i>rotundifolia</i>	<i>Brightness</i>	0.976	0.762	0.518	0.560
	<i>Greenness</i>	0.682	0.980	0.415	0.840
	<i>Wetness</i>	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>	<i>Brightness</i>	0.167	0.254	0.532	0.418
	<i>Greenness</i>	0.531	<i>0.043</i>	0.575	0.081
	<i>Wetness</i>	0.898	0.611	0.634	0.981
	EVI	0.265	<i>0.008</i>	0.763	<i>0.030</i>
	NDVI	0.761	<i>0.027</i>	0.212	0.466
	SAVI	0.409	<i>0.008</i>	0.333	<i>0.047</i>

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.

4.3 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 [15]. 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.

4.4 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 [16] y, por lo tanto, no hay ningún tipo de selección a priori.

5 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 aumentar 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.

Los resultados 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 las 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 i LANDSAT 7-ETM+ de resolución de 30 m en el visible e infrarrojo y de 120 m en el térmico y 30m y 90m respectivamente. 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.

6 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.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martín, M.P.; Chuvieco, E.; Aguado, I; (1998) La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica*. Vol 7 1998: 23-36. ISSN: 1136-5277.
- [2] Atlas Climàtic Digital de Catalunya (2001) [Página visitada el día 16/08/2007]. <http://magno.uab.es/atles-climatic/index.htm>
- [3] Vermote, E.F., Vermeulen. A. (1999): Atmospheric correction algorithm : spectral reflectances (MOD 09) Version 4.0. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf

- [4] Liu Liangming (2005). An introduction to Satellite Oceanic Remote Sensing. Wuhan University Press. Wuhan. pp. 144-148.
- [5] Yang, W. and L. Di (2004), An accurate and automated approach to georectification of HDF-EOS swath data, *Photogram. Eng. And Rem. Sens.* 70, 397-40
- [6] EOS Data Gateway .Página de descarga imágenes MODIS. [Página visitada el día 06/07/2007]. <http://elpld03.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html>
- [7] Pons, X. (2004) "MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció" Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9
- [8] Dozier. J. (1989) Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*. Volume 28, pp. 9-22, 1989.
- [9] 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*. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007*. IGARSS 2007. IEEE International. 23-28 July 2007 Page(s):4217 – 4220. Digital Object Identifier 10.1109/IGARSS.2007.4423984.
- [10] Cracknell, A.P y Hayes, L.W.B; (1997): *The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. Taylor & Francis, Londres.
- [11] 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
- [12] Huete et al. (1992). Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI *Remote Sensing of Environment, Volume 41, Issues 2-3, August-September 1992, Pages 143-154*
- [13] 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.
- [14] Zhang, X. Schaaf, C.B, Friedl, M.A. Srahler, A.H, Gao. F, Hodges J.C.F. (2002): MODIS Tasseled Cap Transformations and its Utility. *Geoscience and Remote Sensing. Symposium, 2002. IGARSS '02*. 2002 IEEE International. 2: 1063-1065.
- [15] Gracia, C; Burriel, J.A.; Ibàñez, J.; Mata, T. y Vayreda, J.(2004).: *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes*. Bellaterra: CREAF. ISBN: 84-932860-2-8.
- [16] 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 on* Volume GE-22, Issue 3, Page(s): 256 – 263