

# Sistema de información geográfica agrometeorológico para el seguimiento de la vegetación en Castilla y León: diseño y primeras aplicaciones

P. Illera, J. A. Delgado, A. A. Fernández-Manso y A. Fernández-Unzueta  
*Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid LATUV  
Departamento de Física Aplicada I.  
E.T. S. de Ingenierías Agrarias. Avda. de Madrid 57, 34004 Palencia*

## RESUMEN

En el trabajo presentamos el diseño y algunas aplicaciones del Sistema de Información Geográfica Agrometeorológico desarrollado en el LATUV con objeto de llevar a cabo un seguimiento de la vegetación en Castilla y León. Su primera fuente de información es la Teledetección: imágenes Meteosat y NOAA que recibimos y procesamos diariamente mediante los equipos instalados en el LATUV. El canal visible de las imágenes Meteosat nos permite calcular la radiación solar global; las imágenes NOAA-AVHRR se utilizan para calcular el índice de vegetación NDVI y la temperatura del suelo. En el SIG hemos integrado también datos de la red de estaciones termopluviométricas del Instituto Nacional de Meteorología en la que se miden temperatura del aire y precipitación. Estos datos se han interpolado a la resolución espacial de las imágenes A VHRR. Por último, hemos incluido la cartografía digital CORINE. El SIG se está aplicando para llevar a cabo estudios de vegetación siguiendo tres líneas: estimación de rendimientos de cosechas de cereal, vigilancia de zonas forestales y estimación del peligro de incendios forestales debido al estrés hídrico de la vegetación. En este trabajo presentamos las dos primeras.

**PALABRAS CLAVE:** Teledetección y SIG, Agrometeorología, NDVI, Aplicaciones Agroforestales.

## ABSTRACT

In this paper we present the design and some results of the GIS developed in the Remote Sensing Laboratory to be used for vegetation monitoring in the region of Castilla y León. The first source of information is Remote Sensing: Meteosat and NOAA-AVHRR images received and processed daily in the OUT laboratory. Meteosat visible images allow for the calculation of global solar radiation; NOAA-AVHRR data are used to calculate both the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface temperatures. The system includes meteorological data provided by the Spanish Meteorological Institute (INM). Air temperature and rainfall recorded by the regional network have been available and then interpolated to the AVHRR images spatial resolution. Finally, digital vegetation mapping derived from the CORINE land cover program has also been used. The system is being applied for vegetation monitoring following three lines: cereal crop yield estimation, monitoring of forest areas and estimation of the forest fire danger due to hydric stress of the vegetation. Here, the two first applications are presented.

**KEY WORDS:** Remote Sensing and GIS, Agrometeorology, NDVI, Agriculture and Forestry Applications.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento y la comprensión de la evolución dinámica de los ecosistemas terrestres en respuesta a los factores naturales y antropogénicos resulta de gran importancia para su conservación y explotación. En particular, el seguimiento de la evolución de la vegetación a escala regional es una tarea básica desde el punto de vista de la gestión y planificación en el campo de los recursos naturales.

Los datos de Teledetección y, en concreto, los satélites del tipo de los de la serie NOAA, resultan útiles para llevar a cabo este tipo de tareas. La zona amplia captada por los satélites y su buena

resolución temporal, de varias imágenes al día, resultan muy adecuadas para llevar a cabo estudios de dinámica de la vegetación a escala regional. Los satélites proporcionan datos de la radiación solar reflejada por el suelo en el rojo e infrarrojo próximo, lo que permite el cálculo de índices de vegetación.

Además, los canales térmicos, combinados con los índices de vegetación, hacen posible la estimación de la temperatura del suelo, todo ello con una resolución espacial aproximada de 1 x 1 km.

La gran cantidad de factores con influencia en la evolución de la vegetación hace conveniente complementar la información proporcionada por los satélites NOAA con otros datos temáticos. La

tecnología de los Sistema de Información Geográfica resulta muy apropiada para realizar análisis combinados de distintas bases de datos de información sobre el territorio. Además, hoy día existen SIG que se pueden implementar en un ordenador personal y resultan relativamente sencillos de manejar.

Entre los factores con influencia en el desarrollo de la vegetación se incluyen los meteorológicos. Su importancia está fuera de todo comentario. Entre ellos se pueden citar la precipitación, la temperatura del aire, la radiación solar, la humedad relativa; el viento y la evapotranspiración. El problema se centra en la disponibilidad de medidas de todos estos factores en zonas de interés agroforestal y con una resolución espacial adecuada.

Nosotros nos hemos planteado el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica que integre datos de satélite y variables meteorológicas con objeto de llevar a cabo estudios de dinámica de la vegetación en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Partimos de imágenes NOAA-AVHRR, ya que disponemos de ellas en tiempo prácticamente real a través del equipo de recepción con que contamos en el LATUV y de los procedimientos de tratamiento de la información que hemos desarrollado. En cuanto a las variables meteorológicas hemos elegido la radiación solar, que podemos estimar a partir de imágenes Meteosat que también captamos y procesamos en el LATUV, la temperatura del suelo, derivada de las imágenes NOAA, y la precipitación y la temperatura del aire medidas por el "Instituto Nacional de Meteorología en la red de estaciones termopluviométricas, que es la más densa disponible. Además de la información de tipo meteorológico, hemos integrado en el sistema cartografía digital: un modelo digital del terreno y el mapa de vegetación elaborado a través del programa CORINE. El desarrollo de las distintas aplicaciones requiere también contar con otros datos de "verdad terreno". En la primera parte del trabajo se detallan los datos de partida y la estructura del SIG.

Consideramos que los datos introducidos en el SIG son adecuados para llevar a cabo un seguimiento del desarrollo de la vegetación. Como es conocido, el NDVI está relacionado con la radiación fotosintéticamente activa absorbida y con diversas variables fisiológicas tales como el índice de área foliar, la producción neta primaria y la fitomasa. La radiación solar resulta importante a la hora de determinar el balance de energía, fundamental tanto en términos de crecimiento como de rendimiento. La temperatura del aire, junto con la del suelo, afecta al tiempo disponible para el crecimiento de los cultivos, así como a la velocidad de algunos procesos. Las temperaturas también determinan los flujos de calor en el suelo. En cuanto a la precipitación, resulta fundamental para el desarrollo de la vegetación, sobre todo en épocas críticas. Es un dato esencial para conocer el balan-

ce hídrico, que, junto con el de calor, proporcionan la clave para entender la influencia de la meteorología en el desarrollo de la vegetación. Las variables meteorológicas de interés restantes no se miden con una resolución que nos permita extrapolar a todo el territorio. La de mayor importancia es la evapotranspiración, que se puede estimar a través de la combinación de datos de satélite y medidas de suelo, por lo que nos planteamos su futura inclusión en el SIG.

Pasando ya al campo de las aplicaciones, la primera es la estimación de rendimientos de cosechas de cereal. Los cereales son los cultivos de mayor importancia en nuestra región y la estimación de rendimientos de cosechas a través de procedimientos objetivos resulta de interés tanto para los agentes económicos que intervienen en la cadena alimentaria como para diseñar la política agrícola. Nosotros hemos desarrollado un modelo empírico que incluye datos de satélite y variables meteorológicas y nos proporciona buenos resultados a niveles provincial y regional.

La segunda aplicación se centra en el campo forestal. Tratamos de establecer un procedimiento de vigilancia de la vegetación de Castilla y León. Para ello pretendemos caracterizar la evolución "normal" del índice de vegetación diferencia normalizada NDVI para las distintas clases forestales que aparecen en nuestra cartografía digital. Sin embargo, un análisis de los valores del NDVI no resulta suficiente para determinar el estado de los bosques, ya que el índice está ligado a la evolución climática anual. Para determinar la evolución normal, resulta útil establecer su relación con variables meteorológicas. En el trabajo presentamos resultados de nuestros primeros análisis.

## SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

Dividimos la descripción del Sistema de Información Geográfica en dos partes. En primer lugar abordaremos los datos de partida, así como los distintos procedimientos utilizados para derivar la información que se introduce en el sistema. En un segundo paso tratamos la estructura del SIG.

### Datos NOAA-AVHRR, NDVI y temperatura del suelo

Utilizamos las imágenes NOAA-AVHRR que captamos diariamente mediante el receptor de transmisiones HRPT de que disponemos en el LATUV. Las imágenes se calibran (Kaufmann y Holben, 1993), se georreferencian a proyección UTM (Illera et al, 1996) Y se detectan las zonas despejadas mediante un procedimiento de umbrales.

Los canales rojo e infrarrojo próximo de las imágenes AVHRR se combinan para calcular el índice de vegetación diferencia normalizada

NDVI. Utilizamos las imágenes de mediodía, con lo que disponemos de imágenes de NDVI diarias correspondientes a toda la Península Ibérica con resolución espacial aproximada de  $1 \times 1 \text{ km}^2$ . Para reducir la cantidad de información y eliminar efectos atmosféricos y de geometría de iluminación y observación, hemos recurrido a combinar las imágenes en compuestos de valor máximo correspondientes a periodos de diez días.

A partir del NDVI y de los canales térmicos del AVHRR obtenemos la temperatura del suelo con precisión de un grado empleando un procedimiento de split-window desarrollado en la Universidad de Valencia (Coll, 1994). Dado que utilizamos las imágenes del paso próximo al mediodía, las temperaturas son representativas de las máximas diarias. La combinación en los periodos de diez días nos permite disponer de imágenes de máximas decenales y de medias de máximas, también para toda la Península y con la misma resolución espacial que el NDVI.

### Datos Meteosat y radiación solar global

Las imágenes Meteosat se reciben también en el LATUV. En este caso disponemos de datos cada hora. Los del canal visible se utilizan para calcular la radiación solar global horaria a partir de un modelo estadístico desarrollado y validado por nuestro grupo de trabajo (Illera et al., 1995). Los

valores se obtienen para toda la Península con una resolución espacial aproximada de  $5 \times 7 \text{ km}$  y el modelo proporciona errores del 19% a nivel de radiación horaria y del 9% si se realiza la acumulación de valores en un dato de radiación diaria. En nuestro caso, para reducir el volumen de información a manejar, hemos diseñado un procedimiento de integración que utiliza únicamente datos de las 10, 12 y 14 h. La pérdida de precisión no es muy grande y se ve compensada al aumentar el periodo de acumulación, ya que finalmente calculamos la radiación solar global media diaria correspondiente a periodos de diez días. Como último paso, georreferenciamos las imágenes Meteosat a proyección UTM con resolución de  $1 \times 1 \text{ km}$ , para superponerlas a los datos de NDVI y temperatura del suelo. Para ello, tenemos en cuenta las características del barrido del satélite (Mera, 1990). El procedimiento de cálculo de la radiación solar global se esquematiza en la Figura 1. En la Figura 2 presentamos el mapa correspondiente a Castilla y León, para el periodo del 1 al 10 de abril de 1994.

### Datos meteorológicos

Aunque las imágenes de satélite nos permiten obtener datos de NDVI, temperatura del suelo y radiación solar para toda la Península Ibérica, el SIG se ha aplicado en Castilla y León, donde disponemos de datos de temperatura y precipitación de la red de estaciones termopluviométricas del

## METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS IMÁGENES DE RADIACIÓN MEDIA DIARIA

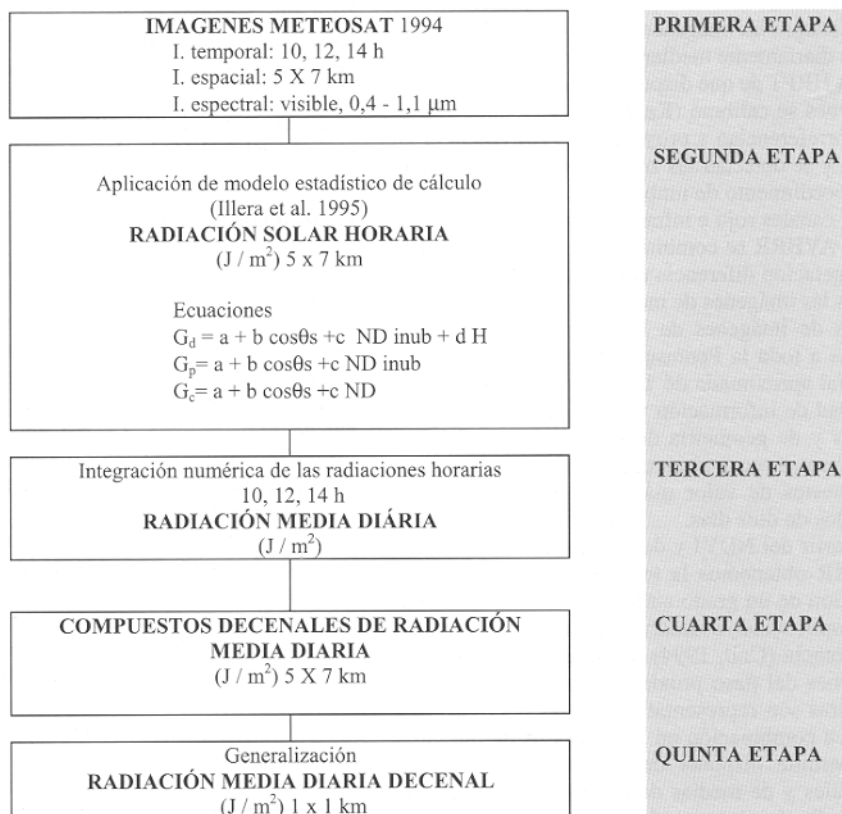


Figura 1. Esquema del procedimiento de cálculo de la radiación solar

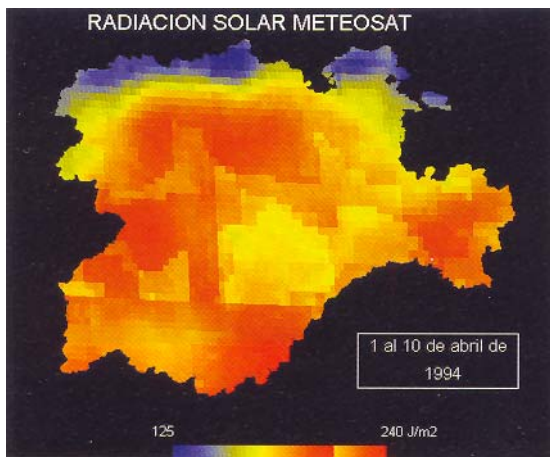


Figura 2. Radiación solar correspondiente al periodo del 1 al 10 de abril de 1994.

Instituto Nacional de Meteorología. La red aporta aproximadamente 240 puntos con datos diarios de temperaturas del aire máximas y mínimas y en tomo a 740 con precipitación diaria.

Para superponer la información meteorológica y los datos de satélite hemos recurrido a procedimientos de interpolación. La temperatura se interpola de acuerdo con la inversa de la distancia pero teniendo en cuenta la elevación que se introduce a través de un modelo digital del terreno que hemos adaptado a la resolución de 1 x 1 km. Los errores estimados son del orden de 1°C. En cuanto a la precipitación, hemos utilizado un procedimiento de polígonos de Thiessen. Como datos finales disponemos de mapas de temperaturas medias ((Tmax+ Tmin)/2), máximas, mínimas, medias de máximas

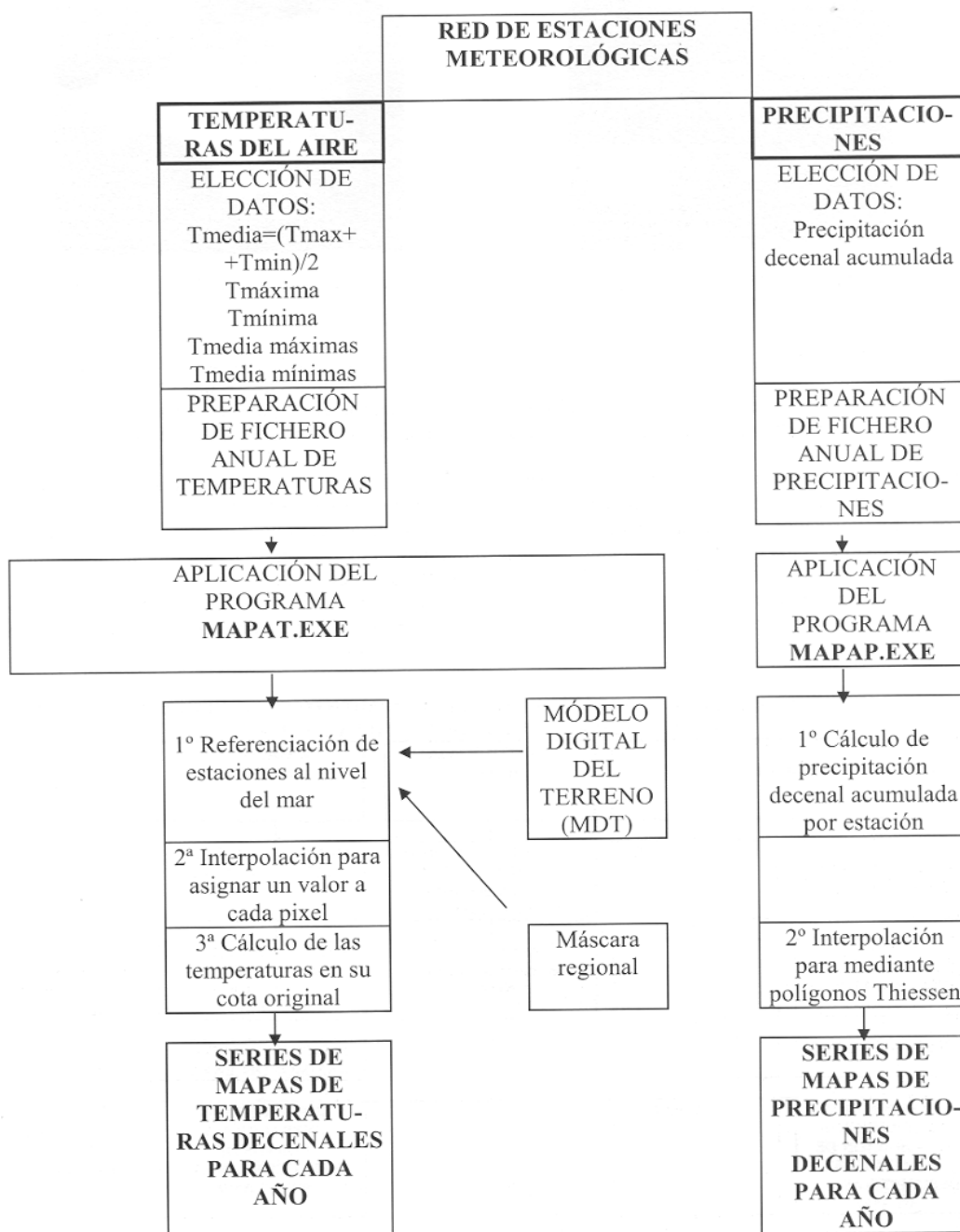


Figura 3. Esquema de cálculo de temperaturas del aire y precipitaciones

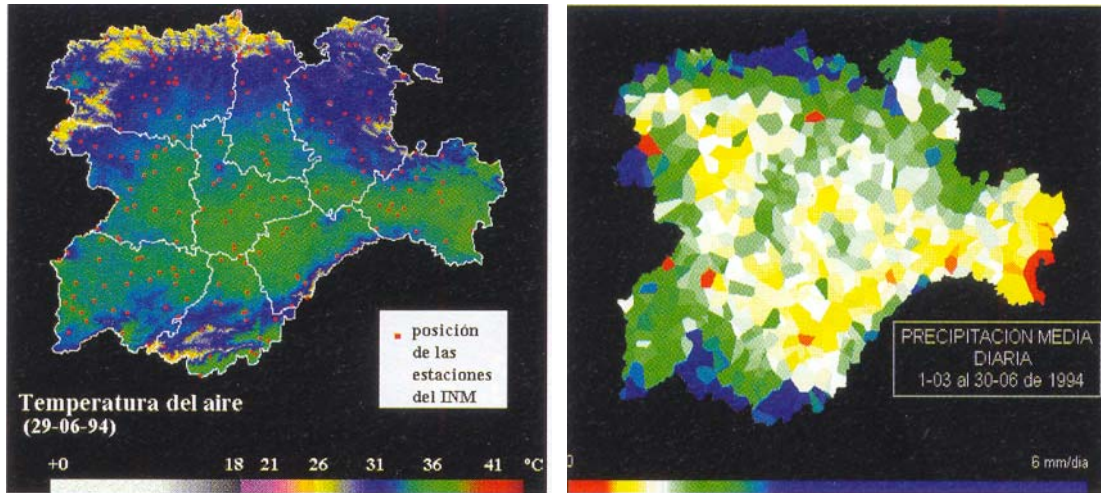


Figura 4. Temperatura máxima del aire y precipitación correspondientes al día 29 de junio de 1994 y al periodo del 1 al 10 de enero de 1993 respectivamente

y mínimas y precipitación acumulada, correspondientes a periodos de diez días. Los datos, como todos los descritos anteriormente, están en formato raster (proyección UTM, 1 x 1 km).

En la Figura 3 mostramos el esquema de cálculo de temperaturas y precipitación, mientras que en la Figura 4 podemos ver los mapas correspondientes al día 29 de junio de 1994 y a la época del 1 al 10 de enero de 1993 respectivamente. Sobre el mapa de temperatura máxima del aire se ha marcado la red de estaciones utilizadas para llevar a cabo la interpolación de datos termométricos.

### Cartografía Digital

Además del modelo digital del terreno comentado en el apartado anterior, hemos utilizado la cartografía digital del programa CORINE. Disponía-

mos de ella en formato vectorial (Arc-Info) y la convertimos a formato raster con resolución de 1 x 1 km. Cubre toda España y tiene setenta y seis clases, treinta clasificadas como zonas agrícolas y treinta y cinco como forestales o zonas húmedas.

### Otros datos

Para desarrollar las distintas aplicaciones del sistema disponemos de otras fuentes de datos. En este trabajo hemos utilizado los de las encuestas de superficies y rendimientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación que nos han sido proporcionados por la Consejería de Agricultura, Ganadería y Montes de la Junta de Castilla y León. Las encuestas se llevan a cabo desde 1990 y se determinan superficies cultivadas y rendimientos en zonas de 700 x 700 m, llamadas segmentos.

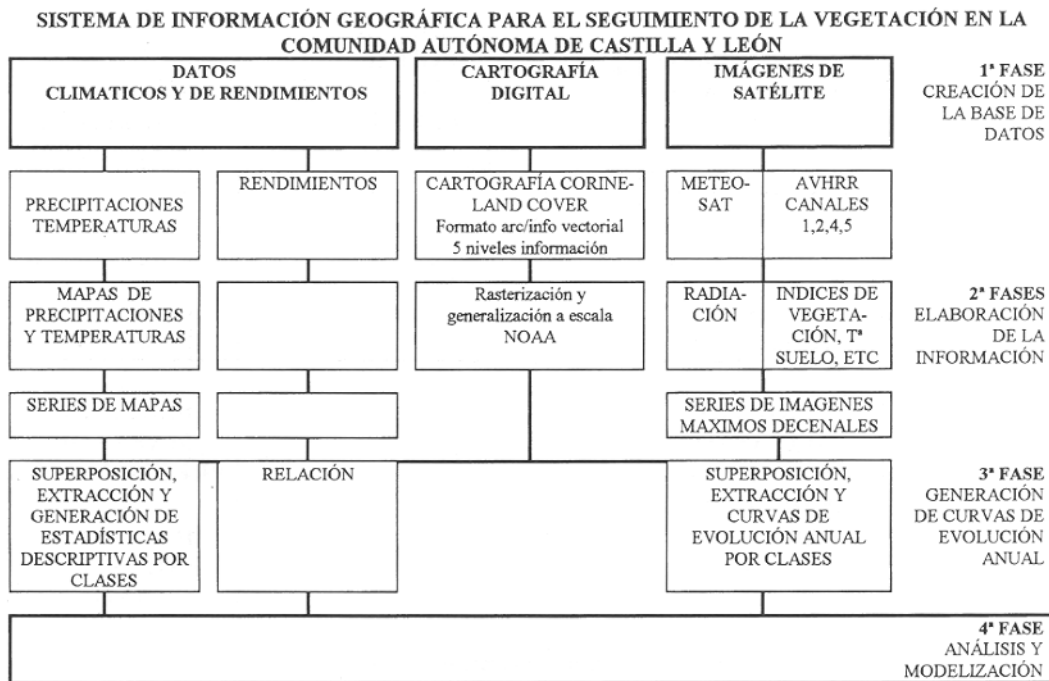
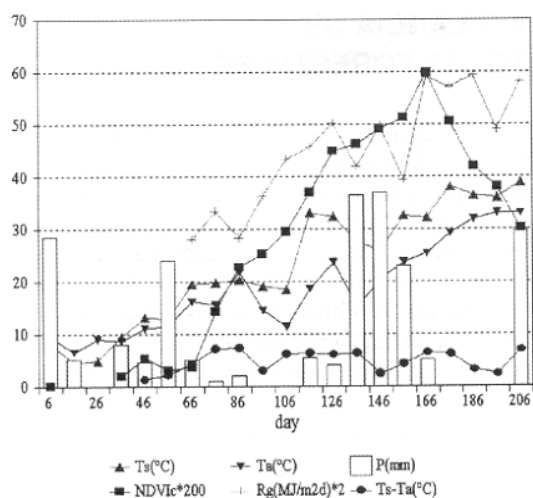


Figura 5. Esquema del Sistema de Información Geográfica



**Figura 6.** Evolución del NDVI y de las variables meteorológicas para un segmento con un 100% de uso de cereal. Los datos corresponden al año 1994 y se muestra únicamente el periodo de mayor interés para el desarrollo del cultivo

Estos segmentos cubren todo el territorio y están situados a intervalos de 10 km. Nosotros hemos dispuesto de datos de superficies y rendimientos de cereal (trigo, cebada, avena y centeno) en aproximadamente 550 segmentos.

### Estructura del SIG

Toda la información descrita se ha integrado en el SIG Idrisi, que resulta muy apropiado para el tratamiento de información en formato raster. La estructura del sistema se muestra en la Figura 5. Disponemos de datos desde 1993 hasta el momento actual. Los datos derivados de las imágenes se pueden integrar en el sistema en tiempo prácticamente real aunque, de momento, no podemos decir lo mismo de los datos meteorológicos o de las encuestas de superficies y rendimientos.

Como primer resultado del sistema, elaboramos las series temporales de los datos de NDVI y variables meteorológicas para una clase de nuestra cartografía digital o una zona donde dispongamos de datos de suelo. En la Figura 6 mostramos un ejemplo de las series correspondientes a 1994 para un segmento con un 100% de uso de cereal. Se muestra únicamente el ciclo del cultivo y se ha añadido también la evolución de la diferencia entre temperaturas del suelo y aire.

Finalmente, indicar que, exceptuando la interpolación de datos de precipitación mediante polígonos Thiessen, que se ha llevado a cabo mediante el SIG Idrisi, el resto de la información utilizada para alimentar el SIG se ha generado mediante software de elaboración propia. Asimismo, se han incluido en el SIG algunos procedimientos de obtención de resultados de forma más directa o apropiada que la que supone utilizar directamente los módulos proporcionados por el sistema.

### ESTIMACION DE RENDIMIENTOS DE COSECHAS DE CEREAL

Dentro de las posibles aplicaciones del SIG desarrollado es de gran interés, tanto para la política agraria europea como desde el punto de vista puramente científico, la estimación y predicción de los rendimientos de cosechas agrícolas. Tanto por la mayor sencillez como por la clara repercusión para la comunidad de Castilla y León hemos iniciado esta línea de trabajo con la estimación de la cosecha de cereal (trigo y cebada) (Terrab,1997).

Siguiendo la línea de numerosos trabajos previos (Rasmussen, 1992; Benedetti, 1993; Delgado, 1995) iniciamos el estudio con un análisis de la relación lineal entre la suma acumulada de la curva evolutiva del NDVI y el rendimiento de cereal. Los resultados nos permitieron considerar que es precisamente la acumulación en el periodo de maduración (parte descendente de la curva del NDVI en el ciclo de desarrollo del cultivo) la que permite mejores estimaciones, con coeficientes de correlación del orden de 0,7. Manteniendo la misma estrategia, hemos realizado un análisis de la relación del rendimiento con diferentes variables agrometeorológicas como: temperatura del aire, temperatura del suelo, precipitación, radiación solar y otras derivadas como son (TsTa) o TS2. Así hemos determinado el periodo de acumulación de cada variable que mejor correlaciona con el rendimiento y las relaciones cruzadas entre dichas variables. En la Tabla 1 mostramos los periodos óptimos de acumulación y las correlaciones obtenidas para las variables más significativas. Todos los resultados corresponden a los años 1993 y 1994.

Correlación	$\Sigma NDVI_c$ índice/día	$\Sigma Pr$ (mm)/día	$\Sigma Ts-Ta$ (°C)/día	$\Sigma Ts^2$ (°C) <sup>2</sup> /día	$\Sigma R_g$ (MJ/m <sup>2</sup> )/día
Período de acumulación	1 Junio ↓ 31 Julio	1 Marzo ↓ 30 Junio	20 Abril ↓ 10 Julio	20 Abril ↓ 10 Julio	1 Mayo ↓ 10 Julio
Rendi (kg/ha)	0,75	0,68	-0,66	-0,80	-0,65
$\Sigma NDVI_c$	1,00	0,04	-0,28	-0,42	-0,38
$\Sigma Pr$	*	1,00	-0,68	-0,74	-0,49
$\Sigma Ts-Ta$	*	*	1,00	0,78	0,39
$\Sigma Ts^2$	*	*	*	1,00	0,76

**Tabla 1.** Periodo de acumulación de las variables agrometeorológicas con mayor relación con el rendimiento final. Correlaciones entre dichas variables acumuladas y rendimiento

Hemos obtenido la ecuación de estimación del rendimiento de cereal por medio de un modelo de regresión múltiple utilizando la estrategia de introducción de las variables significativas paso a paso. Durante el proceso de ajuste se han utilizados los datos correspondientes a los segmentos con un uso de cereal de al menos del 70%. El resultado final se presenta en la ecuación y la Tabla 2 con los parámetros estadísticos obtenidos:

evolución "normal" del índice de vegetación diferencia normalizada NDVI para las distintas clases forestales que aparecen en nuestra cartografía digital. Esto nos permitiría detectar zonas en las que se estén produciendo cambios debidos a plagas, retroceso de las masas forestales, etc. El problema surge debido a que un análisis aislado de los valores del NDVI no resulta suficiente para determinar el estado de los bosques, ya que el índice

$$\text{Rendim (kg / ha)} = \alpha + \beta \cdot \overline{\text{NDVI}}_E + \gamma \overline{\text{Ts}^2} + \delta \overline{(\text{Ts}-\text{Ta})} + \varepsilon \overline{\text{R}_G}$$

$$\overline{\text{NDVI}}_E = \frac{\sum_{1 \text{ jun}}^{31 \text{ jul}} (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{enero}})}{\text{num dias (1 ju - 31 jl)}} \quad \overline{\text{R}_G} = \frac{\sum_{1 \text{ may}}^{10 \text{ jul}} \text{R}_G}{\text{num dias (1 may - 10 jul)}}$$

$$\overline{\text{Ts}^2} = \frac{\sum_{20 \text{ abr}}^{10 \text{ jul}} \text{Ts}^2}{\text{num dias (20 abr - 10 jul)}} \quad \overline{(\text{Ts}-\text{Ta})} = \frac{\sum_{20 \text{ abr}}^{10 \text{ jul}} (\text{Ts}-\text{Ta})}{\text{num dias (20 abr - 10 jul)}}$$

Como un control de la ecuación obtenida para ser utilizada como estimador del rendimiento final en toda Castilla y León la hemos aplicado para todos los puntos con más de 10% de uso de cereal. Los resultados a nivel provincial y regional se muestran en la Tabla 3. En general se pueden considerar óptimos los valores a nivel regional y a nivel provincial no exceden, en el peor de los casos, de una diferencia con los datos oficiales del 12%. Una de las grandes ventajas de trabajar con un SIG es la posibilidad de generar productos como el mapa de rendimiento (ver Figura 7) estimado sobre el territorio con un uso agrícola de secano según la cartografía digital del programa Corine.

## VIGILANCIA DE ZONAS FORESTALES

Como segunda aplicación presentada en este trabajo, nos hemos planteado la vigilancia de zonas forestales. Como ya hemos indicado, tratamos de establecer un procedimiento de vigilancia de la vegetación de Castilla y León caracterizando la

está ligado a la evolución climática anual. Por lo tanto, para determinar la evolución normal resulta útil establecer su relación con variables meteorológicas, en particular con la precipitación y la temperatura del aire que son las que se suelen medir en redes de mayor densidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos por otros autores, la relación depende sobre todo de la climatología de la zona. La mayor parte de los trabajos se refieren a la relación NDVI-precipitación en Africa donde aparecen correlaciones apreciables (Hielkema et al., 1986; Malo and Nicholson, 1990; Davenport and Nicholson, 1993). En zonas frías, el NDVI parece estar más correlacionado con la temperatura del aire (Deblonde and Cihlar, 1993). En zonas templadas, se sugiere que ambas variables pueden influir en la evolución del índice (Schultz and Halpert, 1993). Nosotros pretendemos establecer la relación en áreas de tipo mediterráneo. Incluimos además la radiación solar entre las variables meteorológicas a considerar.

Coefficiente	valor	Error Standard	t-Student	Nivel sig.
$\alpha$	8970	698	12,8	0,0000
$\beta$	3590	1090	3,3	0,0017
$\gamma$	-81	9	-9,0	0,0000
$\delta$	2215	870	2,5	0,0132
$\varepsilon$	63	59	1,1	0,0490
n= 71 R-aju=0,84 SE= 590,69 MAE=479,72 DW=1,89				

Tabla 2. Coeficientes de la ecuación de estimación de rendimiento de cereal

Provincia	Año	Datos Oficiales (kg/ha)	Estimación modelo (kg/ha)	Dif. (%)
Avila	94	1800	1900	+5
	93	3600	3300	-8
Burgos	94	3400	3500	+3
	93	4400	4300	-2
León	94	2700	2800	+4
	93	3900	3800	-3
Palencia	94	2900	3200	+9
	93	3400	3600	+6
Salamanca	94	2600	2300	+12
	93	3400	3200	-6
Segovia	94	2100	2300	+10
	93	3400	3200	-6
Soria	94	2000	2200	+10
	93	3900	4000	+3
Valladolid	94	2600	2700	+4
	93	3500	3600	+3
Zamora	94	2400	2200	-9
	93	2800	2500	-11
<b>Castilla-León</b>	<b>94</b>	<b>2600</b>	<b>2700</b>	<b>+4</b>
	<b>93</b>	<b>3600</b>	<b>3500</b>	<b>+2</b>

Tabla 3. Estimaciones de rendimiento de cereal

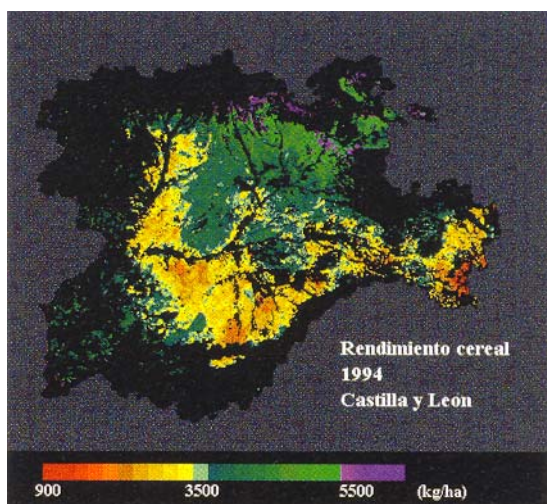


Figura 7. Mapa de rendimiento de cereal estimado para 1994. Se ha estimado sobre el área que se clasifica según Corine Land-Cover como agrícola de secano. El resto del territorio se muestra en negro

Para ello, comenzamos analizando tres clases forestales que hemos denominado pinares, caducifolias y perennifolias. Se han obtenido mediante una agrupación temática de la cartografía CORINE, ya adaptada a escala NOAA. Disponemos de una muestra de 515.700 ha de pinares, que, de acuerdo con los datos del Segundo Inventario Forestal Nacional (Asociación Forestal de Castilla y León, 1997), corresponden al 68% del total de la Comunidad, 336.500 ha de caducifolias -*Fagus sylvatica*, *Quercus spp.*, *Castanea sativa*, aproximadamente el 89% del total regional y 287.300 ha de perennifolias -principalmente *Quercus ilex* que representan el 88% de la superficie que ocupa esta especie en Castilla y León (ver Tabla 4). La distribución de las clases en la Comunidad puede verse en la Figura 8.

Comenzamos analizando la relación entre el NDVI y la temperatura del aire en las tres clases descritas. Presentamos resultados correspondientes a 1993 y 1994. Esto supone utilizar datos NOAA 11 desde enero de 1993 hasta mediados de septiembre de 1994, periodo en que dejó de operar el satélite, produciéndose, debido a la pérdida del NOAA 13, una interrupción del programa hasta 1995 en que comenzó a transmitir datos el NOAA-14.

Como ya hemos indicado, disponemos de datos del NDVI-AVHRR, así como de las temperaturas medias, máximas, medias de máximas, mínimas y medias de mínimas, correspondientes todos ellos a periodos de diez días y cubriendo todo el territorio regional.

CLASES ANALIZADAS	Especies principales	Superficie total* (ha)	Superficie Estudiada (ha)
1. Bosque perennifolio	<i>Quercus ilex</i>	323.470	287.300
2. Bosque caducifolio	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Quercus pyrenaica</i> Castanea sativa Populus spp. Otras frondosas	381.808	336.500
3. Bosque de pinos	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus pinaster</i> <i>Pinus nigra</i> <i>Pinus halepensis</i>	753.074	515.700

\* Resultados Segundo Inventario Forestal Nacional

Tabla 4. Clases forestales analizadas

En la Figura 9 podemos ver la relación NDVI-temperatura máxima para las tres clases en 1993. En un primer análisis se observa una relación aproximadamente lineal, mejor en el caso de las



## MAPA CORINE FORESTAL DE CASTILLA Y LEÓN

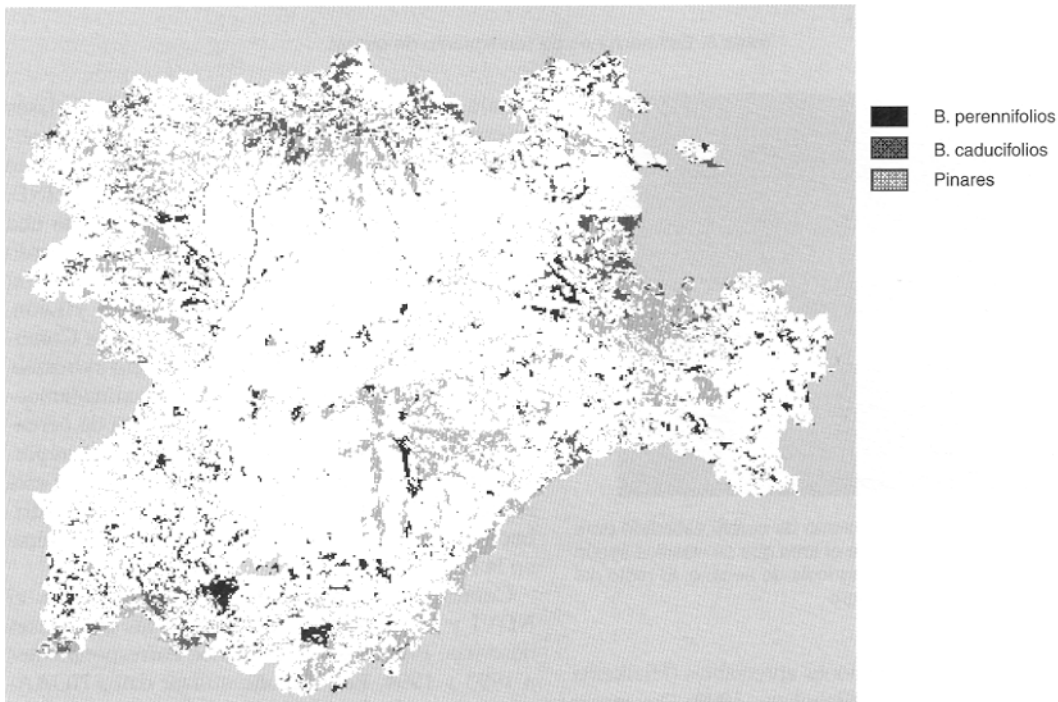


Figura 8. Distribución en Castilla y León de las clases forestales analizadas (ver Tabla 4)

caducifolias  $-r^2 = 0,77$ , que empeora para los pinares  $-r^2 = 0,64$  y claramente deficiente para las perennifolias  $-r^2 = 0,38$ . Si se realiza un ajuste por mínimos cuadrados se obtienen los resultados que se muestran en la primera columna de la Tabla 5. Decir también que los mejores resultados se obtienen relacionando el NDVI con la temperatura máxima y para el mismo periodo de diez días en ambas variables.

Para llevar a cabo un análisis más detallado, presentamos en la Figura 10 la relación en el caso de las perennifolias, indicando junto a cada punto el correspondiente día del año. Se puede ver que existe una buena relación lineal hasta el día 164. A partir de ahí, la relación lineal deja de ser satisfactoria. Los pinares y caducifolias presentan un comportamiento similar, aunque la relación lineal parece ser válida hasta el día 224 y la desviación del comportamiento lineal para el resto del año no resulta tan evidente (ver Figura 9). En la Tabla 5 se presentan los resultados de las regresiones correspondientes al periodo lineal. Son de destacar los elevados coeficientes de correlación.

Los resultados expuestos parecen indicar que la relación NDVI-temperatura del aire es más fácil de modelizar en periodos de desarrollo de la vegetación en los que no aparecen temperaturas extremas y no existe un importante déficit hídrico. De ahí los mejores resultados obtenidos para las caducifolias, que ocupan zonas montañosas o de ribera. En el caso de los pinares, decir que la clase de la car-

tografía CORINE resulta un tanto heterogénea. Parecería conveniente separar los pinares de montaña o media montaña *-P. sylvestris* o *P. nigra* de los de las zonas centrales de la región, mucho más áridas *-P. pinea*, *P. halepensis* o *P. pinaster*. En ese caso, los del primer grupo podrían seguir una evolución similar a la de las caducifolias y los del segundo tener un comportamiento del tipo de la clase de perennifolias que ocupan también las zonas de mediterraneidad más extrema.

Pasando a analizar la relación NDVI-precipitación, no encontramos resultados claros si se utiliza la precipitación correspondiente al mismo periodo de diez días. Tampoco con la del periodo anterior. Las relaciones mejoran al acumular la precipitación de los periodos anteriores al compuesto de valor máximo del NDVI. En la Figura 11 presentamos los resultados para la precipitación caída desde enero hasta el citado periodo para caducifolias en 1993. La relación lineal es muy buena hasta el día 224. Durante el verano la precipitación cesa. En otoño parece existir de nuevo un periodo lineal creciente, aunque existen pocos datos para llevar a cabo un análisis. Los pinares y las perennifolias muestran un comportamiento similar, aunque en este último caso la precipitación cesa a partir del día 164. En la Tabla 5 vemos los resultados de la regresión para el periodo en que la relación es claramente lineal. El mejor coeficiente de correlación vuelve a corresponder a las caducifolias.

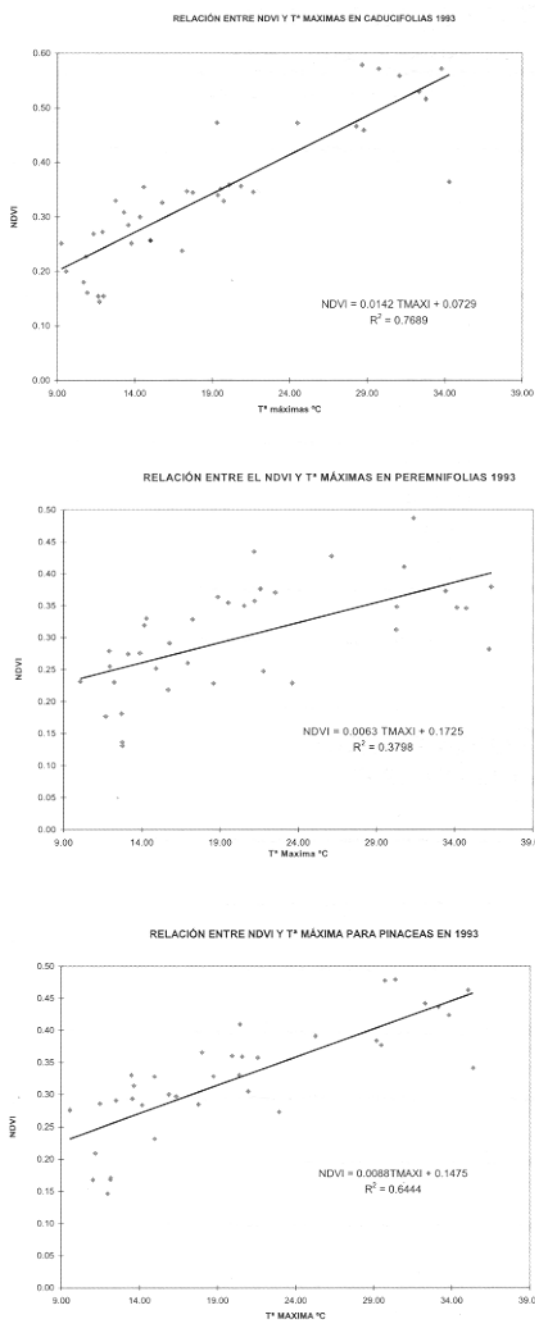


Figura 9. Relación NDVI-temperatura máxima del aire para las tres clases forestales analizadas. Los datos corresponden al año 1993

Si se analizan los datos de 1994 nos encontramos con resultados similares. Además, se mantienen bastante estables los valores de los coeficientes a y b para el "periodo lineal". La diferencia es que la precipitación fue mucho menor y dicho periodo es más reducido.

Para modelizar el año completo se puede pensar en el uso conjunto de ambas variables, pero en la Figura 11 se puede ver que la precipitación acumulada no supone una buena elección. Esta variable es constante, y por lo tanto no adecuada, en épocas en que no existe precipitación. Para tratar en conjunto los datos de todo el año, es necesario buscar

una variable capaz de reflejar el estrés hídrico del verano. Si se toman únicamente los periodos en que el NDVI muestra una tendencia creciente, el introducir ambas variables sí da lugar a una buena modelización.

En lo que se refiere a la radiación solar, decir que hemos analizado únicamente el año 1994 y obtenemos para las tres clases resultados muy similares a los ya descritos con la temperatura.

Para mejorar los resultados de los modelos, nos planteamos llevar a cabo una zonificación con arreglo a criterios biogeoclimáticos que nos permitan una estratificación de las distintas formaciones forestales en función de factores que pueden condicionar su NDVI como son los climáticos, litológicos y fisiográficos. Para ello hemos introducido en el SIG la Clasificación Biogeoclimática Territorial de España CLATERES (Elena, 1997) desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.

El considerar distintas zonas en la Comunidad Autónoma nos permitirá además subsanar deficiencias de la clasificación CORINE como la comentada para el caso de los pinares. Asimismo, para modelizar los periodos con mayor estrés hídrico es necesario buscar nuevas variables más significativas, en especial en los aspectos relacionados con el balance hídrico. Ambas líneas de trabajo creemos que ayudarán a buscar modelos adecuados para todas las zonas de nuestra Comunidad Autónoma.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro Zonal del Duero del Instituto Nacional de Meteorología el habernos facilitado los datos de las estaciones termopluviométricas utilizados en este trabajo. Asimismo agradecemos a la Consejería de Agricultura, Ganadería y Montes de la Junta de Castilla y León el que nos haya proporcionado los datos de rendimientos de cereales. Este trabajo se ha realizado en base a los Proyectos V A94/96 y V A06/97 de la: Junta de Castilla y León.

## BIBLIOGRAFIA

- ASOCIACIÓN FORESTAL DE CASTILLA y LEÓN. 1997. Resultados del Segundo Inventario Forestal en Castilla y León. *Boletín Informativo n° 1*.
- BENEDETTI, R. and ROSSINI, P. 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: a case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. *Remote Sens. Environ.* 45: 311-326.
- COLL, C. 1994. *Un modelo Operativo para determinar la temperatura del suelo mediante satélites*. Tesis Doctoral. Departamento de Termodinámica. Universidad de Valencia.
- DAVENPORT, M. L. and NICHOLSON, S. E. 1993. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 2369-2389.

### RELACION ENTRE NDVI Y VARIABLES METEOROLOGICAS

Principales clases forestales de Castilla y León, 1993

		T <sup>o</sup> máxima	T <sup>o</sup> máxima Incompleta	Precipitación Incompleta
Pinares	a	0,1475	0,2307	0,2918
	b	0,0088	0,0078	0,0005
	r <sup>2</sup>	64,44	74,08	75,47
	Periodo		224	224
Perennifolias	a	0,1725	0,1747	0,2895
	b	0,0063	0,012	0,0008
	r <sup>2</sup>	37,98	82,95	76,93
	Periodo		164	164
Caducifolias	a	0,0729	0,1666	0,2664
	b	0,0142	0,014	0,0007
	r <sup>2</sup>	76,89	85,12	94,32
	Periodo		224	224

**Tabla 5.** Relación entre el índice de vegetación DNVI, la temperatura máxima del aire y la precipitación acumulada. Los resultados corresponden al año 1993

- DELGADO, J. A., ILLERA, P. and FLÓREZ, M. 1995. *Cereal yields estimation in Spain using the NDVI AVHRR*. Proc. The 1995 Meteorological Satellite Data Users' Conference. Winchester, UK. Ed. EUMETSAT. pp. 467-471.
- DEBLONDE, G. and CIHLAR, J. 1993. A multiyear analysis of fue relationship between surface environmental variables and NDVI over fue Canadian landmass. *Remote Sensing Reviews*. 7: 151-177.
- ELENA, R. 1997. *Clasificación Biogeoclimática de España Peninsular y Balear*. Ed. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. 446 pp.
- HIELKEMA, J. U. , PRINCE, S. D. and ASTLE, W. L. 1986. Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna Zone of fue Democratic Republic of Sudan using fue NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1499-1513.
- ILLERA, P. 1990. *Utilización de una estación secundaria Meteosat para el cálculo de parámetros superficiales*. Tesis Doctoral. Departamento de Física Aplicada I. Universidad de Valladolid.
- ILLERA, P., FERNÁNDEZ, A. and PÉREZ, A. 1995. A simple model for fue calculation of global solar radiation using geostationary satellite data. *Atmospheric Research*. 39: 79-90.
- ILLERA, P., DELGADO, J. A. and CALLE, A. 1996. A navigation algorithm for satellite images. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 577-588.
- KAUFMANN, Y. J. and HOLBEN, B. N. 1993. Calibration of fue AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 21-52.
- MALO, A. R. and NICHOLSON, S. E. 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in fue African Sabel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arids Environments*. 19: 1-24.
- RASMUSSEN, M. S. 1992. Assesment of millet yield and production in Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*. 13: 3431-3442.
- SCHULTZ, P. A. and HALPERT, M. S. 1993. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances on Space Research*. 5: 227-280.
- TERRAB, R. 1997. *Estimacion de cosechas de cereal mediante imágenes de satélites y datos meteorológicos*. Tesis Doctoral. Departamento de Física Aplicada I. Universidad de Valladolid.

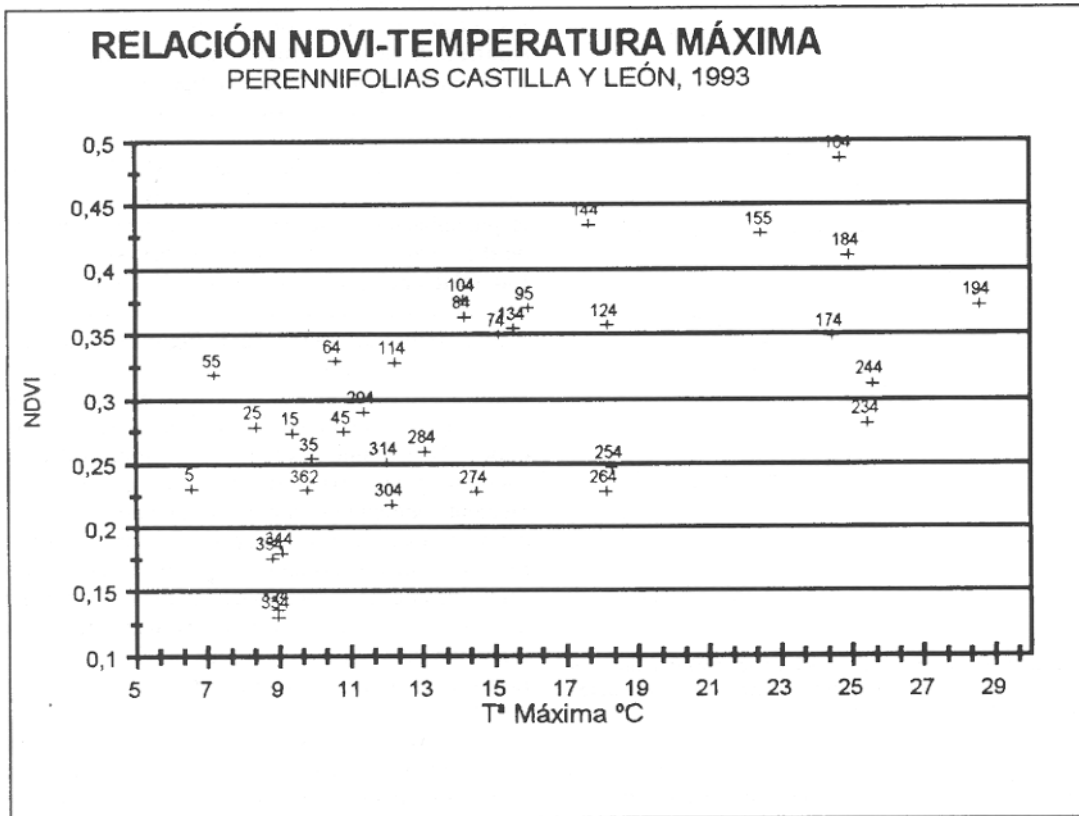


Figura 10. Relación NDVI-temperatura máxima del aire para la clase de perennifolias en 1993. Aliado de cada punto se indica el día del año correspondiente

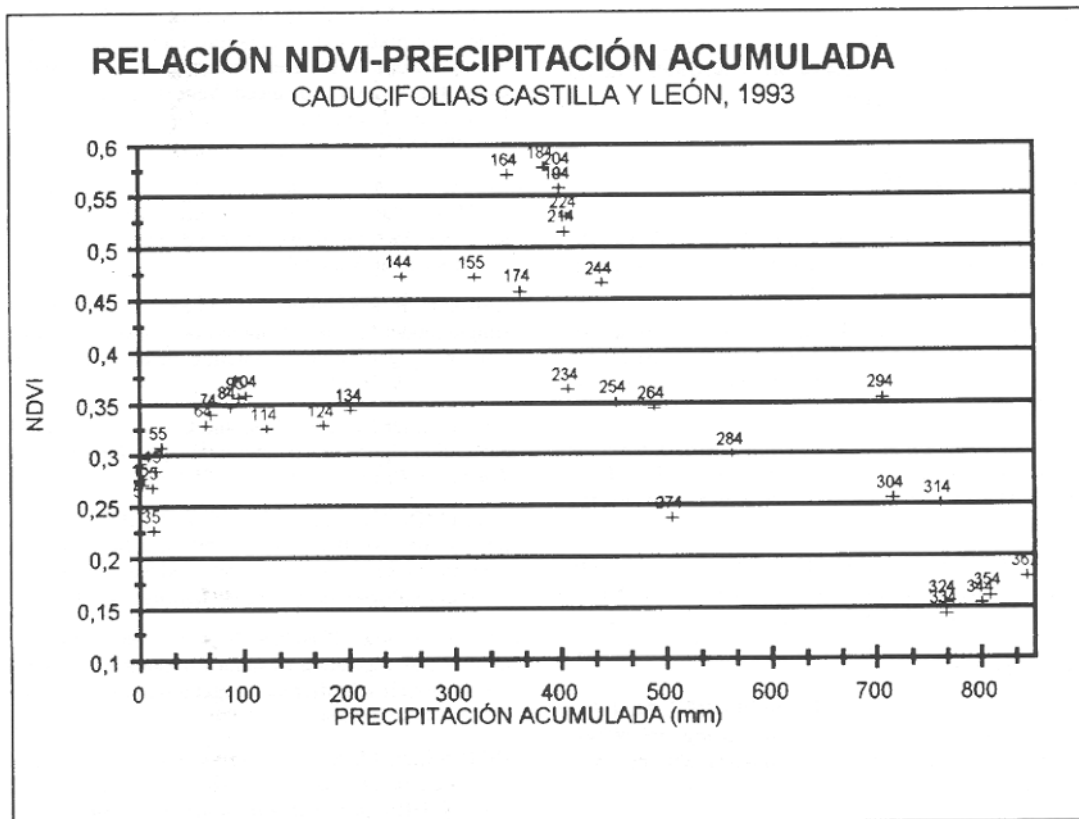


Figura 11. Relación NDVI-temperatura acumulada desde enero para la clase de caducifolias en 1993. Aliado de cada punto se indica el día del año correspondiente