

## ESTIMACION DEL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES A PARTIR DE IMAGENES NOAA-AVHRR

M. Alonso Mantrana, E. Chuvieco Salinero, A. Camarasa Belmonte, I.A. Kyun, M.P. Martín Isabel y F.J. Salas Rey

*Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá de Henares. Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares, Madrid. Telf.: (91) 885 44 29 - Fax: (91) 885 44 39. email: ggecs@geogra.alcala.es*

**RESUMEN.-** Este trabajo, financiado por el ICONA y la Unión Europea, pretende evaluar las posibilidades que ofrece la teledetección espacial como apoyo a los actuales sistemas de predicción del peligro de incendios. Para ello, un punto de partida es el estudio de las correlaciones entre la humedad del combustible medida en el terreno - un indicador del estrés hídrico - y distintas variables generadas a partir de imágenes del sensor AVHRR-NOAA, el más idóneo para este tipo de estudios por la alta resolución temporal que posee. El área de estudio elegida fue la Comunidad Autónoma de Andalucía. En los resultados obtenidos, existe una relación lineal entre la humedad del combustible de algunas especies mediterráneas y variables generadas a partir de la información del sensor, derivadas del NDVI y la temperatura de superficie.

**ABSTRACT.-** This paper presents the first results of a test study being developed under the European project Minerve-2 with partial funding by the Spanish Forest Service. We are trying to explore the possibility of using remote sensing techniques to help the traditional systems that evaluate fire danger. To do so, a starting point is to study the correlations between fuel moisture measures in the field - which are a good indicator of plant stress - and some satellite variables derived from AVHRR-NOAA data. The Andalusian region, located in the south of Spain, was selected as study area. Our results show a linear correlation between the fuel moisture of some mediterranean species and satellite variables obtained from NDVI and surface temperature.

### 1.- INTRODUCCION

En ciertos ecosistemas terrestres, como es el mediterráneo, los incendios forestales resultan un proceso natural; sin embargo, en los últimos años la acción del hombre ha reducido los ciclos de recurrencia, lo que implica un aumento de los efectos negativos del fuego. Este trabajo presenta los resultados obtenidos en un proyecto cofinanciado por el ICONA y la Unión Europea, cuyo objetivo último es evaluar el empleo de la teledetección para mejorar los sistemas actuales de predicción de incendios forestales. Como es sabido, los incendios forestales son muy dinámicos en el tiempo y dependen fuertemente tanto de factores meteorológicos como de características de la vegetación, muy variables en función del entorno geográfico. Los índices de peligro tradicionales se basan en variables meteorológicas (temperatura, precipitación y velocidad del viento) obtenidas en los observatorios de primer orden o en estaciones automáticas. Se asume que estas variables meteorológicas estiman indirectamente el estrés hídrico de la vegetación, ya que resulta muy complicado medir el contenido de humedad en el terreno. Sin embargo, la densidad de la red de meteorológicos es aún muy baja y, al haber sido diseñada para múltiples fines, no resulta idónea para aplicaciones forestales. Además, como la información que se toma es puntual, se precisa

aplicar procedimientos de interpolación para extender la valoración del peligro a todo el territorio, lo que origina imprecisiones, sobre todo cuando el terreno es montañoso.

Por estos motivos, resulta de gran interés el estudio de las posibilidades que ofrecen las imágenes de satélite como complemento a la información proporcionada por métodos más convencionales. Las diferentes bandas espectrales que componen las imágenes de satélite proporcionan información repetitiva y continua sobre el estado de la vegetación, por lo que en teoría también pueden estimar las condiciones dinámicas de riesgo, entre las que se encuentra el estrés hídrico.

Las aplicaciones de la teledetección al estudio de los incendios forestales pueden agruparse en tres grandes líneas:

- Análisis de las condiciones de la vegetación previas al incendio; en esta línea se enmarcan tanto la elaboración e índices de peligro (Vidal et al., 1994; Chuvieco y Martín, 1994a) como la cartografía de riesgo estático (Salas y Chuvieco, 1994).

- Seguimiento y detección del fuego; por un lado, las imágenes de satélite se han empleado en la detección de focos activos en áreas geográficas como las grandes selvas o sabanas ecuatoriales donde, debido a la escasa población y/o a su gran extensión, no existe otra forma más rápida de localización (Kennedy et al., 1994, Setzer y Pereira, 1991), y por otro en el seguimiento de la evolución del incendio (Chuvieco y Martín, 1994b).

- Evaluación de las consecuencias del fuego; en esta línea, la teledetección se utiliza para llevar a cabo inventarios y cartografía del área quemada (Martín y Chuvieco, 1994; Kasischke et al., 1993).

El objetivo de este proyecto se sitúa dentro de la primera línea de investigación citada. En general, los estudios llevados a cabo hasta el momento han intentado evaluar las condiciones hídricas del combustible con el fin de prever situaciones críticas de cara al inicio del fuego. Esta evaluación se ha realizado a través de los índices espectrales de vegetación (IV), y la temperatura de superficie; en el caso de los IV se ha utilizado de manera especial el NDVI, definido como:

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R}$$

donde  $\rho_{IR}$  y  $\rho_R$  indican la reflectividad en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo respectivamente.

Se ha demostrado que existe una clara relación entre los índices de vegetación y algunos parámetros vitales de las plantas (Sellers, 1989), como la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) o absorbida (APAR) por la planta (Cihlar et al., 1991; Baret y Guyot, 1991), su contenido en clorofila y la evapotranspiración (Running y Nemani, 1988), suponiendo que no existan condiciones de estrés; la radiación fotosintéticamente absorbida por la planta está asociada a la productividad neta de la vegetación, por lo que el uso de índices de vegetación en series multitemporales ha permitido el establecimiento de modelos a escala global de productividad vegetal (Box et al., 1989). Por su parte, la relación del NDVI y el índice de área foliar (LAI) no resulta tan clara, pues éste se satura en los cultivos a partir de 3-5 y en los bosques de 4-6.

Los ya aludidos trabajos de Sellers demuestran que los índices de vegetación se hallan influenciados por otra serie de factores, como pueden ser el ángulo de las hojas con respecto a la incidencia de los rayos solares (el NDVI es máximo en el caso de las hojas horizontales), la proporción de materia muerta en la masa vegetal y el ángulo de observación del sensor (Sellers, 1987).

Este trabajo ensaya el empleo de los índices de vegetación y de la temperatura de superficie en la estimación de la humedad del combustible, a partir de una serie de datos de humedad

de la vegetación recogidos en una campaña de campo a lo largo del verano de 1994; el área de estudio elegida fue la Comunidad Autónoma de Andalucía.

## 2.- METODOLOGIA

### 2.1.- Recogida de las muestras de humedad

El estado de la vegetación es una de las variables que más inciden en el riesgo de incendio forestal. La estimación de la humedad del combustible a partir de los datos proporcionados por sensores remotos nos proporcionaría un dato fundamental en la construcción de modelos de riesgo de forma rápida; la información multispectral proporcionada por los sensores remotos está muy relacionada con el estado fenológico de la vegetación que, a su vez, depende fuertemente del contenido de humedad. Así pues, puede abordarse la estimación de la humedad del combustible a partir de la relación que pueda tener con los datos proporcionados por el sensor. La verificación numérica de esta relación se abordó en este trabajo en la forma de correlaciones entre la información que proporciona el satélite y la humedad del combustible medida en campo.

La humedad de la vegetación puede definirse como la cantidad de agua que esta contiene expresada como porcentaje de su peso seco, según la expresión:

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

donde H es la humedad del combustible vivo, Ph es su peso en gramos y Ps es el peso tras la desecación del combustible.

Para el cálculo de la humedad del combustible se diseñó una campaña de recogida de muestras de vegetación viva en el área de estudio (buscando áreas forestales representativas), muy condicionada por las características del sensor y de la plataforma espacial que utilizamos, concretamente por la extensión del área cubierta por un píxel AVHRR y por la hora de paso del satélite.

Dadas las características del sensor AVHRR, las parcelas elegidas debían aproximarse en lo posible a las siguientes características:

- Homogeneidad en cuanto a la cubierta forestal, para garantizar una medición representativa.
- Cada una de las parcelas debía tener una extensión igual o mayor a 9 km<sup>2</sup>, el tamaño correspondiente a un área de 3x3 píxeles del sensor AVHRR-NOAA.
- En lo posible, debían ser representativas de los distintos tipos de combustible a analizar: materia muerta, pasto y distintos tipos de matorral y arbolado, a fin de obtener correlaciones significativas entre especies típicas de la vegetación mediterránea y la señal captada por el sensor.
- La topografía tenía que ser lo más suave posible, ya que los fuertes desniveles influyen mucho en la señal recibida por el sensor debido al efecto de sombra.
- Era necesario que las parcelas estuviesen próximas, pues la recogida de las muestras debía realizarse alrededor de la hora de paso del satélite, es decir hacia las 14,30 - 15,00 horas. Finalmente, por dificultades logísticas, la banda horaria elegida fue la que se encontraba entre las 12,00 y las 17,00 horas, a fin de permitir la toma de muestras en un número suficiente de parcelas cada día.
- Por último, era preciso que las parcelas se encontrasen próximas a estaciones meteorológicas, a fin de relacionar los datos proporcionados por éstas con los de humedad del combustible.

El diseño del trabajo de campo comenzó con la selección de las áreas que cumplieren las características citadas, mediante la superposición de la red de estaciones meteorológicas (en total 154) sobre el Mapa de Uso y Vegetación de Andalucía a escala 1:400.000 (De la Rosa y Moreira, 1987), a fin de seleccionar áreas idóneas para la toma de muestras. Se eligieron cuatro zonas: la Sierra de Aracena, al norte de la provincia de Huelva, el entorno del Parque Nacional de Doñana, el Campo de Gibraltar y un sector de Sierra Morena al norte de la ciudad de Andújar; en cada uno de estos sectores del área de estudio, se seleccionaron entre 5 y 7 parcelas que contuviesen los tipos de combustible más representativos.

La recogida de muestras de vegetación comenzó el 1 de julio de 1994, prolongándose hasta finales de septiembre; las parcelas fueron visitadas una vez cada diez días. Además de las muestras de vegetación, se tomaron medidas in situ de la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa. Se recogieron tres muestras de la vegetación más representativa en cada parcela, que fueron pesadas en el terreno con una balanza de bolsillo "Kern 466-45" (pesada máxima: 250 g.; error:  $\pm 0,1$  g.); el peso de la muestra debía ser superior a 100 gramos, a fin de conseguir una precisión en la medida del 5%. Para evitar separar el combustible recogido para una misma muestra en función de su diámetro, se recogieron solamente hojas y acículas en el caso de los árboles (encina, alcornoque, quejigo, pinos) en diferentes partes del mismo individuo; para el matorral, las muestras fueron tomadas de distinto modo en función de la fisonomía de la planta: en la jara, lentisco, juagarzo y coscoja se tomaron las hojas de distintos individuos próximos entre sí, mientras que en el caso del brezo y la sapina (formación de marisma de influencia mareal) fueron recogidos los extremos de las ramillas laterales y terminales de distintos individuos. En cuanto al pasto, fue arrancado a tirón y desprovisto de la tierra que acompaña a las raíces. Por último, la materia muerta fue recogida de la capa más aireada. Las muestras eran introducidas en sobres de papel de peso conocido para su traslado al laboratorio.

El tratamiento de las muestras en el laboratorio consistió en su secado durante 5 horas a una temperatura de  $100 \pm 5$  °C en una estufa de desecación "Selecta 200210" con una estabilidad de  $\pm 0,75\%$  y una capacidad de 80 litros (50 cm. x 40 cm. x 40 cm.). Tras su secado, las muestras volvían a ser pesadas en la misma balanza utilizada para el trabajo de campo, obteniéndose la humedad del combustible según la expresión mostrada al comienzo de este epígrafe.

## **2.2.- Adquisición y tratamiento de las imágenes AVHRR**

### **2.2.1.- Corrección geométrica, atmosférica y generación de CMV**

Se han utilizado para este trabajo imágenes diarias del sensor AVHRR, todas ellas pertenecientes a la pasada diurna de la plataforma NOAA-11, cuya hora de paso era aproximadamente las 15,00 horas. La secuencia de imágenes comprende el período 20 de marzo - 10 de septiembre. De los meses de primavera (marzo, abril y mayo) sólo se adquirieron imágenes de los diez últimos días, mientras que se contó con imágenes diarias del período 20 de junio - 10 de septiembre (ese mismo día, el satélite NOAA-11 dejó de funcionar, por lo que no fue posible la adquisición de imágenes del resto del mes de septiembre). Eliminando aquéllas con total cubierta de nubes contamos con 72 imágenes, todas ellas adquiridas por la estación universitaria de Valladolid.

La estación receptora aplicó una corrección geométrica a cada imagen mediante la utilización simultánea de un modelo orbital y de una serie de puntos de control, utilizando como base la proyección UTM (huso 30 extendido); la utilización de los puntos de control es necesaria debido al amplio ángulo de barrido del sensor AVHRR, que genera deformaciones en el

borde de las imágenes aun tras la aplicación de la corrección orbital.

Los objetivos y metodología de este trabajo exigen que todas las imágenes puedan superponerse entre sí; por este motivo, fue necesario llevar a cabo una nueva corrección geométrica mediante puntos de control (entre 10 y 15 por imagen) tomando una imagen como referencia. El remuestreo de las imágenes se realizó por el método del vecino más próximo, a fin de alterar lo menos posible la información original. Esta corrección geométrica se aplicó también a la información auxiliar disponible en formato digital (Mapa de Ocupación del Suelo).

Para cada imagen se generó el NDVI a partir de los valores digitales convertidos a albedos, utilizando los coeficientes propuestos por Holben et al. (1990). El resultado (entre -1 y +1) se escaló al rango 4-255 para generar imágenes de 8 bits y facilitar su manejo y visualización evitando los decimales. Asimismo, para cada una de las imágenes se obtuvieron las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del sensor, mediante la conversión de los valores digitales de las dos bandas en radiancias y la inversión de la fórmula de Planck.

A partir de los canales visible e infrarrojo térmico se obtuvo una máscara de nubes para cada imagen, que se aplicó a los NDVI generados previamente. La señal recibida por el sensor se encuentra afectada, además de por las nubes, por la dispersión de aerosoles, del vapor de agua y por el amplio ángulo de observación del sensor, siendo precisa una corrección atmosférica que elimine en lo posible este ruido de la señal. La estación receptora llevó a cabo una corrección aplicando coeficientes de transmitancias aportados por el modelo 5S (Tanré et al., 1990). Además, se aplicó la técnica conocida como Compuestos del Máximo Valor (CMV), que consiste en obtener una imagen sintética del NDVI tomando para cada píxel el máximo valor de una serie temporal determinada. Esta técnica se basa en la comprobación de que la dispersión atmosférica causa un descenso en los valores del NDVI, por lo que puede asumirse que el valor máximo de la serie temporal se encuentra menos afectado por el efecto de la atmósfera y el ángulo de observación (Holben, 1986). El procedimiento tiene la ventaja de eliminar la pérdida de información que suponen las nubes, aunque a costa de perder los datos estrictamente diarios, ya que una serie de imágenes pertenecientes a varios días se sintetiza en una sola. Los Compuestos del Máximo Valor se generaron tanto para el NDVI como para las dos bandas de Temperatura de Brillo, en este último caso para evitar la cubierta nubosa.

La mayor parte de los autores recomiendan construir los CMV a partir de períodos de diez días (Holben, 1986). Para el período de estudio planteado en este trabajo, se juzgó oportuno construir los CMV con este período de tiempo, dando como resultado 11 compuestos: de marzo a junio, para los diez últimos días de cada mes; en julio y agosto, tres compuestos por mes, y en septiembre, uno más que sintetiza los diez primeros días. De estos once períodos, tan sólo fue posible la utilización de siete (desde el 1 de julio hasta el 10 de septiembre) en la búsqueda de correlaciones con la humedad del combustible, ya que las muestras de vegetación se tomaron sólo en ese período de tiempo. Los cuatro CMV restantes se utilizaron en la elaboración de las variables derivadas de la información del sensor.

### **2.2.2.- Generación de las variables de satélite**

Una vez calculados los CMV, se disponía por tanto de once imágenes sintéticas del NDVI, y once para cada una de las temperaturas de brillo. Desde este punto, se procedió a la generación de variables derivadas de esta información que de alguna manera tuviesen relación con el estado de la vegetación.

A partir de los compuestos de NDVI, se generaron imágenes de verdor relativo; esta variable representa la relación existente en cada píxel de un CMV concreto con el máximo y mínimo

valor de ese mismo píxel en los once períodos considerados. Para ello, se deben generar dos nuevas imágenes sintéticas que contengan el valor máximo y mínimo en cada píxel de los once períodos considerados; finalmente, el verdor se calcula como:

$$VERDOR_i = \frac{CMV_i - CMV_{MIN}}{CMV_{MAX} - CMV_{MIN}}$$

donde  $VERDOR_i$  es el verdor relativo para el período  $i$  en un píxel,  $CMV_i$  indica el valor del CMV para ese período en el mismo píxel, y  $CMV_{MAX}$  y  $CMV_{MIN}$  los valores máximo y mínimo para ese píxel en toda la serie considerada (desde marzo a septiembre).

A partir de los CMV se generó una nueva variable, denominada decremento del CMV, que pone en relación el valor del CMV de un período con el del anterior. Para su cálculo, se utilizó la expresión:

$$DECREV_i = CMV_i - CMV_{i-1} + DECREV_{i-1}$$

A partir de las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del sensor, se procedió al cálculo de la temperatura de superficie mediante el algoritmo propuesto por Coll et al. (1994), con alguna pequeña modificación (Caselles, 1995, comunicación personal), que resulta adecuado para latitudes medias. La fórmula de cálculo de la temperatura de superficie es la siguiente:

$$TS = T_4 + 2,13 (T_4 - T_5) + 0,18 + 40 (1 - \epsilon) - 75 \Delta \epsilon$$

donde  $TS$  es la temperatura de superficie de un píxel,  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5,  $\epsilon$  es la emisividad media del píxel, y  $\Delta \epsilon$  la diferencia de emisividad de ese píxel en los canales 4 y 5 del sensor. De los datos que precisa el cálculo, los de obtención más compleja son las emisividades, porque dependen del tipo de cubierta presente en el suelo; el tamaño del píxel AVHRR (1 km<sup>2</sup>) añade más problemas, ya que las cubiertas contenidas en esa superficie pueden ser muy heterogéneas. El método seguido por Kerr et al. (1992) ofrece una solución a este problema basándose en que el mayor contraste de emisividades es el que se produce entre el suelo desnudo y el que está completamente cubierto de vegetación; por tanto, una forma de estimar la emisividad media es conocer qué porcentaje del píxel está cubierto de vegetación (porcentaje de cubierta verde) mediante los valores de MVC (NDVI) que se obtengan en áreas completamente descubiertas y completamente cubiertas de vegetación. En nuestro caso, el primer valor se obtuvo de un píxel situado en un área semidesértica de Almería (NDVI = 0,16), y el segundo en una zona de cultivos de regadío en el bajo valle del Guadalquivir (NDVI = 0,76). Para obtener el porcentaje de cubierta verde en cada píxel utilizamos la expresión:

$$PVER_i = \frac{CMV_i - MIN}{MAX - MIN} * 100$$

donde  $MAX$  y  $MIN$  corresponden a los valores máximo y mínimo del NDVI para todo el área de estudio y todos los períodos (0,16 y 0,76 respectivamente). Una vez conocido el porcentaje de cubierta verde, se obtuvieron las emisividades de los canales 4 y 5 a partir de (Sobrino et al., 1993):

$$\epsilon_4 = 0,982 PVER_i + 0,956 (1 - PVER_i)$$

$$\epsilon_5 = 0,986 PVER_i + 0,967 (1 - PVER_i)$$

Por último, la diferencia de emisividades se calcula como sigue:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$$

Una vez obtenida la temperatura de superficie en cada píxel de los 11 Compuestos de Máximo Valor, se procedió a generar dos variables derivadas de ella (temperatura de superficie relativa y decremento / incremento de temperatura de superficie) del mismo modo que se hizo para el NDVI.

Por último, se obtuvo una variable sintética, resultado del cociente entre el NDVI y la temperatura de superficie para cada píxel; ambas variables están inversamente relacionadas,

puesto que a mayor vigor vegetal mayor NDVI y menor temperatura, ya que la evapotranspiración supone liberación de calor y, en consecuencia, un enfriamiento de la planta. Del resultado del cociente se esperaba una correlación positiva con las medidas de humedad del combustible, ya que el cociente deberá ser necesariamente mayor cuanto mayor sea el vigor vegetal.

### 3.- RESULTADOS

Los resultados que presentamos a continuación se refieren a las correlaciones lineales (coeficiente  $r$  de Pearson) entre las diferentes variables de satélite y la humedad de combustible que se midió en el campo. Estas correlaciones se han abordado de dos formas diferentes: a) correlaciones espaciales, es decir, la relación para cada período considerado de la humedad del combustible medida en las 24 parcelas y los datos de las variables de satélite para esas parcelas, y b) correlaciones temporales, que analizan la relación entre la evolución en el tiempo (a lo largo de los siete períodos de los que existen datos tanto de humedad como de satélite, es decir, entre el 1 de julio y el 10 de septiembre) de la humedad del combustible y de las distintas variables de satélite.

Es necesario destacar, antes de analizar los resultados, que era de esperar un alto nivel de "ruido" en los datos; la razón se encuentra en que los valores de humedad del combustible son puntuales, y se han extrapolado a parcelas cuya extensión es de 9 km<sup>2</sup>, ya que la información recibida por el satélite es un valor medio de áreas de ese tamaño, donde el comportamiento de las especies puede variar notablemente.

En las correlaciones espaciales, las muestras de humedad de combustible y las variables de satélite no mostraron ninguna relación significativa, y de hecho no existió ninguna coherencia en los signos esperados teóricamente.

La tabla I muestra los índices de Pearson obtenidos en las correlaciones temporales por especies. En los casos del alcornoque, quejigo, romero y lentisco sólo se contó con 7 datos para las correlaciones (uno por período), puesto que para esas especies sólo se disponía de datos en una parcela. Puede observarse que no existe coherencia en los signos para el pino piñonero, el pasto y la materia muerta; la explicación puede encontrarse en dos circunstancias:

- Por un lado, los valores de humedad medidos en el terreno para el pasto y la materia muerta eran muy bajos (al inicio del mes de julio, se situaban ya por debajo del 10%), y no experimentaron prácticamente ninguna variación a lo largo del verano.

- En el caso del pino piñonero, las parcelas donde se recogieron muestras de esta especie (área de Doñana) estaban constituidas por un bosque no muy denso, donde la señal del sensor está notablemente influenciada por el sustrato forestal. Esta afirmación se apoya en el hecho de que la pinocha (materia muerta compuesta por las acículas del pino), cuyas muestras fueron recogidas en las mismas parcelas que las del pino piñonero, presenta los signos de la correlación coherentes con lo esperado.

En el resto de las especies tratadas, existe una coherencia clara en los signos, aunque esto no ocurre así para todas las parcelas donde fueron tomadas muestras de esas especies; en concreto, en el caso de las frondosas (encina, alcornoque), donde habitualmente la formación es de dehesa abierta, los datos de satélite no correlacionan bien con la humedad del combustible, debido probablemente a la composición de las parcelas (existe en ellas más de una especie dominante).

Si el análisis se lleva a cabo parcela a parcela, la jara, romero, halimium y pinocha son las especies que ofrecen mejor correlación entre humedad y variables de satélite. Parece evidente que la homogeneidad de la parcela es el factor más importante a la hora de explicar las

correlaciones calculadas en este trabajo.

	NDVI	TS	VR	Dec. NDVI	Dec. TS	TS rel.	NDVI/TS
Encina	0,541	-0,207	0,522	0,466	-0,441	-0,340	0,528
Alcornoque	0,382	-0,225	0,385	0,382	-0,225	-0,225	0,457
Quejigo	0,103	-0,584	0,109	0,103	-0,584	-0,584	0,265
Piñonero	-0,364	0,420	0,158	0,318	0,325	0,225	-0,501
Jara	0,390	-0,268	0,494	0,627	-0,300	-0,026	0,389
Romero	0,780	-0,431	0,802	0,723	-0,483	-0,460	0,788
Brezo	0,264	-0,161	0,015	0,313	-0,436	-0,252	0,367
Lentisco	0,245	-0,205	0,320	0,213	-0,171	-0,121	0,242
Halimium	0,408	-0,378	0,418	0,392	-0,390	-0,405	0,529
Pinocha	0,632	-0,612	0,530	0,327	-0,636	-0,619	0,804
Mat. muerta	-0,593	-0,690	0,500	0,668	-0,720	-0,533	0,090
Pasto	-0,364	-0,105	0,440	0,520	-0,325	-0,020	-0,241

Tabla I.- Correlaciones lineales (r de Pearson) entre humedad del combustible y variables de satélite.

#### 4.- CONCLUSIONES PRELIMINARES

El proyecto que presentamos se encuentra todavía en fase de desarrollo, por lo que las conclusiones que podemos presentar no son aún definitivas. De los resultados que hasta el momento se han obtenido, puede deducirse que existe una buena correlación entre la evolución temporal de la humedad de ciertas especies mediterráneas (especialmente de matorral) y las variables de satélite derivadas del NDVI y de la temperatura de superficie, siempre que la vegetación posea una homogeneidad suficiente. En las parcelas mixtas, donde se combinan dos o más especies, se ha observado que la mediana de la humedad del combustible calculada para todas las especies presentes en la parcela ofrece también una buena correlación con las variables de satélite.

El mayor interrogante que se plantea en el futuro del trabajo se encuentra relacionado con el esquema de muestreo espacial utilizado, es decir, si es realmente posible extrapolar medidas puntuales de humedad del combustible a un área tan amplia como la contenida dentro de un píxel AVHRR. Aunque los resultados obtenidos hasta el momento para parcelas y especies con la suficiente homogeneidad parecen indicar que sí, es conveniente continuar explorando en este sentido, quizá comparando los resultados obtenidos con el sensor AVHRR con los que se deriven de otros sensores con mayor resolución espacial.

Las líneas de investigación futuras del proyecto pueden resumirse en tres: a) en primer lugar, se pretende explorar la utilización de correlaciones multivariantes, b) en relación al período de estudio, se ampliará éste hasta la primavera a fin de aumentar el rango de variabilidad de la humedad y de los valores de las variables de satélite, ya que la falta de correlación observada para algunas especies podría deberse a la extrema sequía que sufrió el sur de la península Ibérica en el verano de 1994, y c) en cuanto a la elección de parcelas, se intentará

que exista una mayor homogeneidad en la vegetación presente en ellas, evitándose la asociación encina-pastos y, en general, las áreas adhesionadas.

## 5.- AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido cofinanciado por el ICONA y la Unión Europea, instituciones a las que agradecemos su apoyo. Queremos también agradecer al Laboratorio de Teledetección del Dpto. de Física Aplicada I de la Universidad de Valladolid el procesamiento de las imágenes, y a Vicente Caselles, de la Universidad de Valencia, su ayuda en el cálculo de la temperatura de superficie.

## 6.- REFERENCIAS

- Baret, F. and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. **35**: 161-173.
- Box, E.O., Holben, B.N. and Kalb, V. 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO<sub>2</sub> flux. *Vegetatio*. **80**: 71-89.
- Cihlar, J., St. Laurent, L. and Dyer, J.A. 1991. Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*. **35**: 279-298.
- Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J.A. y Valor, E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*. **15**: 105-122.
- Chuvieco, E. and Martín, M.P. 1994a. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **60**: 563-570.
- Chuvieco, E. and Martín, M.P. 1994b. A simple method for fire growth mapping using AVHRR channel 3 data. *International Journal of Remote Sensing*. **15**: 3141-3146.
- De la Rosa, D. y Moreira, J.M. 1987. *Evaluación ecológica de recursos naturales de Andalucía. Aproximación al conocimiento necesario para planificar el uso y protección de las tierras*. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. **7**: 1417-1434.
- Holben, B.N., Kaufman, Y.J. and Kendall, J.D. 1990. NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration. *International Journal of Remote Sensing*. **11**: 1511-1519.
- Kasischke, E.S., French, N.H., Harrel, P., Christensen, N.L., Ustin, S.L. and Barry, D. 1993. Monitoring of wildfires in boreal forest using large area AVHRR-NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*. **45**: 61-71.
- Kennedy, P.J., Belward, A.S. and Gregoire, J.-M. 1994. An improved approach to fire monitoring in west Africa using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. **15**:
- Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P., and Imbernon, J. 1992. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sensing of Environment*. **41**: 197-209.
- Martín, M.P. and Chuvieco, E. 1994. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. En *Proceedings of the International Workshop "Satellite technology and GIS for mediterranean forest mapping and fire management"*. pp. 71-83. P.J. Kennedy y M. Karteris (eds). European Commission. DG-XII. Luxembourg.
- Salas, F.J. y Chuvieco, E. 1994. Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la prevención de incendios forestales: un ensayo en el macizo oriental de la sierra de Gredos. *Estudios Geográficos*. **217**: 683-710.
- Sellers, P.J. 1989. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes, en *Theory and applications of optical remote sensing*. G. Asrar (ed.). Wiley. New York. 297-335.
- Setzer, A.W. and Pereira, M.C. 1991. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. *Ambio*. **20**: 19-23.
- Tanré, D. Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y. 1990. Technical note. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, **11**: 659-668.