

Marta Yebra Álvarez · Ángela de Santis · Emilio Chuvieco

Estimación del peligro de incendios a partir de teledetección y variables meteorológicas: variación temporal del contenido de humedad del combustible

Recibido: 10 Setembro 2005 / Aceptado: 7 Outubro 2005
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2005

Resumen Se presentan en este trabajo las relaciones observadas entre el contenido de humedad de diferentes especies Mediterráneas, índices meteorológicos de peligro de incendios e imágenes del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Se observa que ambos tipos de datos permiten realizar buenas estimaciones del contenido de humedad de las especies muestreadas. El subíndice meteorológico del sistema estadounidense, el h1000, así como el subíndice DC (Drought Code) y el índice final FWI (Fire Weather Index) del sistema canadiense, son los mejores estimadores del contenido de humedad de los combustibles vivos, presentando coeficientes de correlación de Pearson con la humedad del pasto de 0,92, -0,82 y -0,85 respectivamente, mientras que el h1 (uno de los subíndices del sistema estadounidense), es mejor estimador de la humedad de los combustibles muertos. En cuanto a los índices derivados de las imágenes, el SM (Site Moisture), NDVI (The Normalized Vegetation Index) y ARND (Vegetation Index Decrements) son los que mejor estiman el contenido de humedad del pasto (con coeficientes de correlación entre (0,91 y 0,98) y del matorral (0,79 a 0,89), mientras que el quejigo no alcanza valores de correlación significativos con ninguno de los índices calculados.

Palabras clave Contenido de humedad · MODIS · Índices de vegetación · Índices meteorológicos de peligro de incendios.

Abstract This paper presents the correlations found between field foliage moisture content measurements, meteorological fire danger indices and indices derived from Terra-MODIS satellite images. Both meteorological indices and those derived from MODIS data provide a good estimation of the moisture content of the Mediterranean species sampled. The meteorological subindex of the US system, h1000, as well as the subindex DC (Drought Code) and the final index FWI (Fire Weather Index) of the Canadian system, better estimate fuel moisture content of live fuels. Computed r values between those meteorological indices and gasland moisture content was 0.92, -0.82 y -0.85, respectively. Regarding the dead fuels the best estimations were found for the h1 moisture code (one of the subindices of the US NFDRS system). Concerning those indices derived from MODIS data, the best estimations of moisture content were observed for the Site Moisture (SM), the normalized vegetation index (NDVI) and vegetation index decrements (ARND). For gaslands, the Pearson correlations computed were between 0.91 and 0.98, while for shrub species the correlations were lower (0.79 to 0.89). For oaks (*Quercus faginea*) the correlations found were not significant with any of the calculated indices.

Key words Fuel Moisture Content · MODIS · Vegetation indices · Meteorological fire danger indices.

Introducción

Los incendios forestales, además de suponer pérdidas humanas y económicas, suponen una importante amenaza para los ecosistemas mediterráneos, degradándolos notablemente cuando, debido a cambios globales y a la acción humana, su ciclo de recurrencia se acorta pasando a ser un factor no natural.

Las estadísticas sobre incendios forestales que ofrece la Subdirección General de Política Forestal y Desertificación, indican que nuestro país es uno de los más afectados por este fenómeno en Europa. La media de superficie forestal quemada entre los años 1991-2004 es de 146.723 has,

superior a la de otros países de la Unión Europea como Grecia (48.290 has), Italia (98.159 has) e incluso Portugal (129.756 has), si bien nuestro país es el que alberga la mayor superficie de bosque mediterráneo de Europa y, por tanto, la mayor superficie con alto riesgo de incendio. La importancia de este problema explica que se hayan realizado importantes esfuerzos para establecer modelos de predicción y prevención que consideren la variedad de factores que intervienen en el inicio y propagación del incendio (Chuvieco & Salas, 1996; Vázquez & Denore, 1999; Chuvieco et al., 2002; San Miguel-Ayanz et al., 2003).

Uno de los principales factores del comportamiento del fuego se refiere al estado de los combustibles vegetales existentes, más concretamente a su grado de combustibilidad, su cantidad, densidad, estratificación y humedad (Viger et al., 2004). Entre las citadas condiciones de los combustibles, se ha demostrado que el contenido de humedad es una variable clave en la ignición y en el comportamiento del fuego (Van Wagner, 1967; Brown & Kenneth, 1979; Burgan et al., 1998; Chuvieco et al., 2002).

El cálculo del contenido en humedad de los combustibles vivos implica una gran complejidad, considerando el amplio rango de factores que le afectan y su amplia variación espacial y temporal (Chuvieco et al., 2004). Para su estimación, se pueden seguir diferentes métodos. El más preciso es la estimación directa mediante muestreos en campo. Sin embargo, esta tarea resulta poco operativa a escala regional, ya que las mediciones directas requieren un costoso muestreo espacial y no son fácilmente generalizables a grandes espacios (Chuvieco et al., 2004). El empleo de índices meteorológicos resulta mucho más común, ya que facilitan una estimación espacial y diacrónica de la humedad (Camia et al., 1999; Almarza, 2004), y son fácilmente accesibles. Habitualmente se calculan a partir de variables básicas como la temperatura y humedad del aire, precipitación y velocidad del viento, que se combinan para simular el efecto que estos factores tienen sobre la fisiología de la planta. No obstante, el empleo de índices meteorológicos también presenta dificultades operativas, puesto que las estaciones meteorológicas habitualmente no están próximas a áreas forestales, ni tienen la densidad adecuada (Chuvieco et al., 2003). Considerando además que el contenido en agua de las plantas no sólo depende de las condiciones atmosféricas, sino también de las características fisiológicas de la vegetación (Cocero et al., 1998), resulta muy probable que sea necesario adaptarlos a cada especie.

Finalmente, la humedad del combustible puede estimarse también a partir de imágenes satélite, que proporcionan una observación espacial completa y repetitiva del territorio (Chuvieco et al., 2003). Frecuentemente, estas estimaciones se basan en el empleo de imágenes, captadas por diferentes sensores, para la extracción de índices espectrales que resalten el contraste en la energía radiada desde las cubiertas vegetales en diferentes longitudes de onda, y en el posterior estudio multitemporal de dichos índices. Este estudio permite detectar los efectos, tanto directos como indirectos, que la variación en el contenido de humedad tiene sobre la forma en la que las cubiertas vegetales reflejan o emiten energía. La vegetación sana se

caracteriza por presentar una baja reflectividad en el visible (400-700 nm), alta en el Infrarrojo cercano (IRC) (700-1000 nm) y baja, con presencia de algunos máximos relativos, en el Infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (1000-2500 nm) (Chuvieco, 2002). Como efectos directos de la disminución del contenido de humedad, las plantas tenderán a presentar una menor reflectividad en el IRC y aumentarla en el SWIR. Los efectos indirectos están relacionados con el efecto del agua sobre las condiciones de vigor vegetal, en especial con su contenido de clorofila y con el índice de área foliar (LAI). Cuando la planta se seca, se reduce su actividad fotosintética, por lo que la producción de clorofila disminuye y, en consecuencia, la planta absorbe menos energía en las bandas del visible, aumentando así la reflectividad en esta banda del espectro. Así mismo, al perder humedad puede deteriorarse la estructura de la hoja, así como reducirse el LAI y modificarse el peso específico, lo que provocaría una reducción en la reflectividad del IRC (Aldakheel & Danson, 1997). Por otro lado, otros métodos de estimación del contenido de humedad están basados en el empleo del canal de infrarrojo térmico (IT) de las imágenes satélite (8000 a 14000 nm) para el seguimiento del dinamismo térmico de la vegetación. Según pierde agua la planta, para mantener su balance hídrico, disminuye la transpiración, lo que hace que aumente su temperatura de superficie (T_s) y la tensión hídrica. Por último, se ha demostrado que la conjunción de índices de vegetación (NDVI) y T_s resulta de gran interés para este tipo de estudios (Chuvieco et al., 2004) ya que, cuanto mayor es el valor del índice y menor la T_s , la planta ofrecerá mejores condiciones vitales (Cocero, 2002).

El mayor interrogante para usar con fruto estas técnicas basadas en la teledetección pasa por demostrar que las variaciones de reflectividad causadas por el cambio en el contenido de humedad son suficientemente significativas, y que pueden diferenciarse de las causadas por otros factores (condiciones atmosféricas o de observación, suelo de fondo, etc.).

El objetivo principal de este trabajo es presentar los primeros resultados de una estimación integrada del contenido de humedad de combustibles mediterráneos empleando los diferentes métodos presentados con anterioridad.

Material y métodos

El área elegida para abordar este estudio está situada en el Parque Nacional de Cabañeros (Figura 1), localizado entre el cuadrante noroccidental de la provincia de Ciudad Real y el suroccidental de la de Toledo. El periodo de trabajo seleccionado abarca desde abril a septiembre del año 2002, con el objetivo de considerar la variación existente en las condiciones de humedad de la vegetación desde la primavera, momento en el que las cubiertas vegetales presentan su máximo vigor, hasta finales de verano, cuando alcanzan su mínimo debido a la sequía estival (Cocero et al., 1998). El área cuenta con un balance hídrico negativo durante el periodo estival (Figura 2), lo que genera unas condiciones de estrés en la vegetación, que se ve obligada

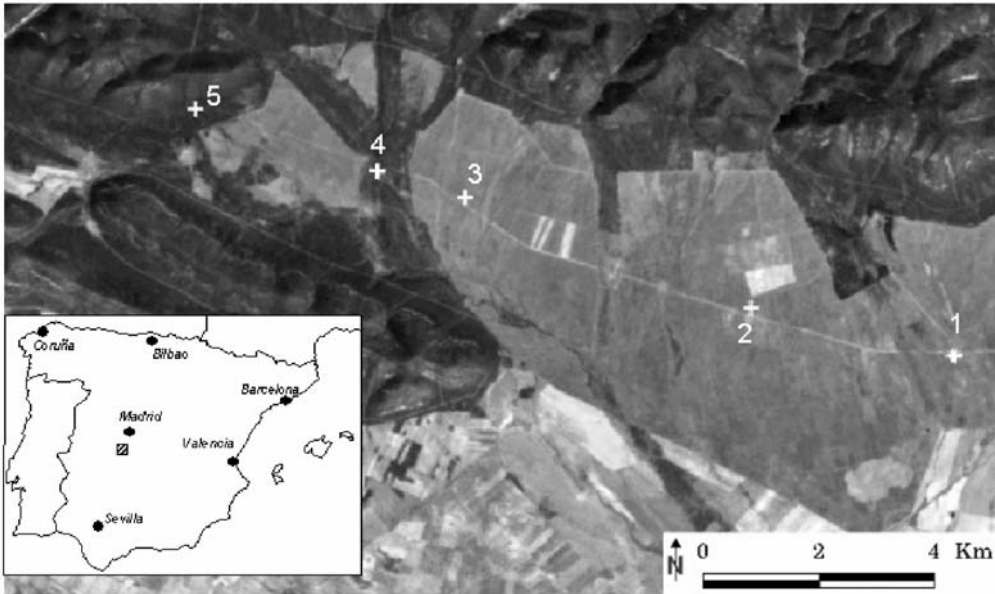


Figura 1.- Localización del área de estudio con las parcelas utilizadas en el inventario de campo sobre una imagen Landsat.

Parque Nacional de Cabañeros 2002

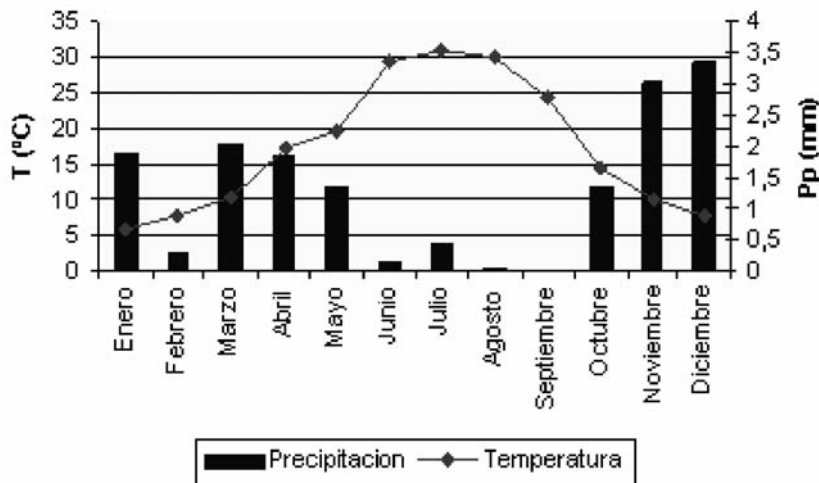


Figura 2.- Diagrama ombrotérmico del Parque Nacional de Cabañeros (2002). Las temperaturas se refieren a las medias mensuales de las temperaturas medias diarias registradas. Las precipitaciones a las medias mensuales de la precipitación diaria acumulada.

a moderar su actividad fisiológica. Además, la lluvia cae concentrada en cortos periodos, de forma intensa pero poco frecuente, lo que contribuye a reducir su captación por parte de la vegetación (Castro, 1996).

Medidas de la humedad del combustible

Las especies mediterráneas muestreadas estaban distribuidas a lo largo del parque en seis parcelas de muestreo de 30 X 30 metros (Figura 1); las tres primeras de pasto, las dos segundas de matorral en las que predomina la jara (*Cystus ladanifer*), romero (*Rosmarinus officinalis*), brezo (*Erica arborea*) y labiérnago (*Phyllirea angustifolia*) y la última de rebollo (*Quercus pyrenaica*) y quejigo (*Quercus faginea*). En esta última parcela también se recogió

hojarasca procedente de la caída de las hojas. Las muestras se tomaron cada 8 días y a la misma hora (entre las 12:00 y las 16:00 hora local). En cada una de las parcelas se recogieron muestras con un peso entre 50 y 100 g, que se introdujeron en sobres de papel, para ser pesadas en campo (peso húmedo) con una balanza de precisión de 2 dígitos. Posteriormente fueron secadas en una estufa durante 48h a 60° C, para obtener el peso seco. Los valores de humedad se calcularon en función del peso seco, como es habitual en aplicaciones de incendios forestales. Así se define el FMC (contenido de humedad del combustible):

$$\text{FMC (\%)} = \left(\frac{\text{Pf} - \text{Ps}}{\text{Ps}} \right) * 100,$$

donde Pf es el peso fresco, y Ps el peso seco de la muestra.

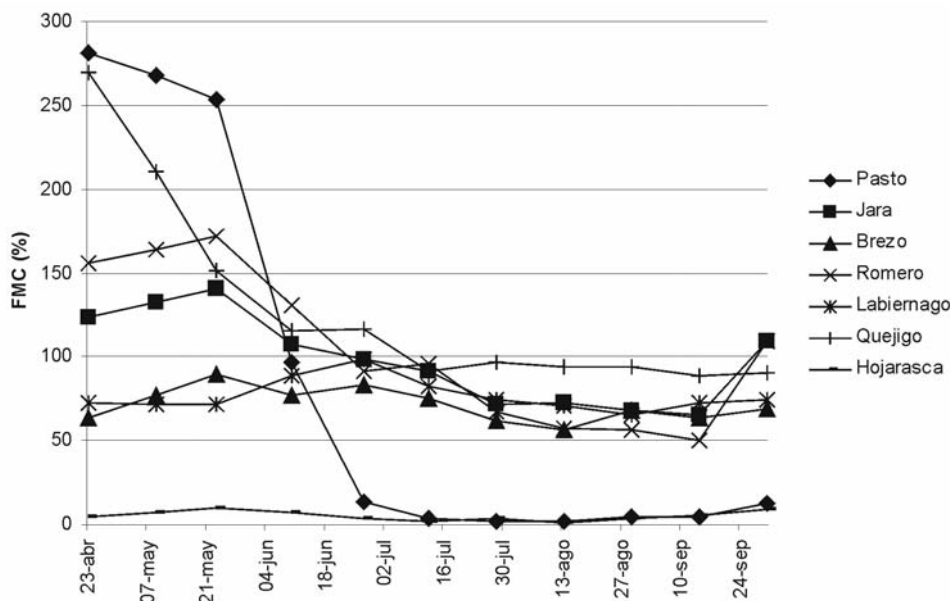


Figura 3.- Evolución del FMC de las especies muestreadas. Los valores corresponden a las medias de las especies en las diferentes parcelas y han sido normalizados a una escala común (0-1) usando los valores máximos y mínimos medidos.

Una primera observación de la evolución temporal de la humedad del combustible durante el año 2002 indica que, en líneas generales, como ocurre en la mayor parte del ámbito mediterráneo, todas las especies tienen mayor FMC durante la primavera, y que va disminuyendo paulatinamente según avanzamos en el periodo estival (Figura 3), de forma paralela al balance hídrico antes comentado. Ese ciclo estacional es diverso en cada especie. De todas las especies analizadas, el pasto presenta el FMC más alto en primavera y más bajo en verano, mostrando un claro contraste temporal. Este combustible experimenta cambios bruscos en su FMC durante la primavera como consecuencia de las precipitaciones que se registran en este período, mientras que contiene muy poca humedad durante el verano (inferior al 30%), comportándose prácticamente como combustible muerto.

En cuanto a los matorrales, la jara registra una disminución del FMC en los meses de verano, llegando a su mínimo en septiembre, si bien su valor es siempre mayor del 60%. A partir de junio pierde la mayoría de las hojas de años anteriores, manteniendo solo los brotes terminales de primavera. El romero baja del 180% al 50% entre finales de mayo y septiembre, comenzando su aumento en otoño. El brezo se mantiene entre el 60 y el 100% de FMC, con algunas oscilaciones. Este comportamiento casi constante dificulta la estimación del contenido hídrico, tanto a partir de los índices meteorológicos como a partir de los índices espectrales. Asimismo, el labiérnago tiene un comportamiento más constante respecto al contenido de agua, aunque registra un máximo en julio. Es una de las especies mediterráneas mejor adaptadas a la sequía estival, por lo tanto consigue mantener sus hojas hidratadas compensando la falta de lluvia con un aparato radical muy extenso.

Por último, el quejigo presenta una evolución temporal bastante definida, con un máximo durante la primavera, y un progresivo y continuado descenso hasta el mes de julio. A

partir de entonces, su FMC se mantiene constante el resto del verano, en torno al 90 %.

En general, se espera que las especies que resulten con mejor correlación sean la jara, el romero y el pasto, ya que presentan una variación del contenido de humedad más estacional.

Cálculo de los índices meteorológicos

A partir de la información meteorológica diaria obtenida de la estación instalada en el Parque, propiedad del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, se estimaron los índices meteorológicos de peligro de incendio, empleados por los servicios forestales de Canadá, el *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS), España (Probabilidad de Ignición) y Estados Unidos (*National Fire Danger Rating System*, NFDRS). Del CFFDRS se calculó el "*Fire Weather Index*" (FWI) y uno de sus códigos de humedad, el "*Drought Code*" (DC), ya que al tratarse de un código de sequía se espera que estime mejor el comportamiento de los combustibles vivos, que dependen más del agua almacenada en el suelo que los muertos. Además, en estudios previos de Cocero et al., (1998) en el mismo área, se ha mostrado que este subíndice ofrece mejores correlaciones con el FMC. De los índices propuestos por el NFDRS, se seleccionó el denominado 1000-h, que mide la humedad del combustible más pesado (diámetro > 7,6 cm) y se ha demostrado su utilidad para estimar el estado hídrico de la vegetación viva (Cocero, 2002), así como el código 1-h para combustibles muertos finos (el nombre de estos índices se refiere al tiempo necesario para vaciar la reserva de agua del suelo si la evaporación persiste en valores máximos).

A la hora de correlacionar estos índices con el FMC, se emplearon los valores de los mismos calculados para las fechas de medida de FMC en el campo.

BANDA	LONGITUD DE ONDA (NM)	DESCRIPCIÓN
1	620-670	Rojo
2	841-876	Infrarrojo cercano
3	459-479	Azul
4	545-565	Verde
5	1230-1250	SWIR
6	1628-1652	SWIR (similar al Landsat-ETM 5)
7	2105-2155	SWIR (similar al Landsat ETM 7)

Tabla 1.- Características de las siete primeras bandas del sensor MODIS.

Índice	Formulación
Índice de vegetación de diferencia normalizada; "Normalized Difference Vegetation Index"	$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}}$
Ratio del NDVI y la Temperatura de superficie	$Ratio = \frac{NDVI_i}{Ts_i}$
Índice de diferencia normalizada infrarrojo; "Normalized Difference Infrared Index"	$NDII_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,SWIR}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,SWIR}}$
Índice de vegetación ajustado al suelo; "Soil Adjusted Vegetation Index"	$SAVI_I = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}} (1 + L)$
Índice de vegetación global; "Global Environmental Monitoring Index"	$GEMI_I = eta * (1 - 0,25 * eta) - \frac{\rho_{i,R} - 0,125}{1 - \rho_{i,R}}$ $eta = \frac{2 * (\rho_{i,IRC}^2 - 1,5\rho_{i,IRC} + 0,5\rho_{i,R})}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R} + 0,5}$
Decrementos acumulados del NDVI; "Accumulated decrements of NDVI"	$ARND_i = \sum_{h-d_i}^{d_i} \frac{NDVI(id_{h+1}) - NDVI(id_h)}{NDVI(id_h)}$
Humedad local "Site Moisture"	$SM = \frac{250 * (VERrel + VERabs)}{2}$

Tabla 2.- Índices derivados de las imágenes del sensor MODIS calculados en este trabajo. $\rho_{i,x}$ indica la reflectividad del píxel i en la banda x . L es una constante que ajusta la línea vegetación-suelo al origen, con un valor asumido de 0,05 para la gan mayoría de los valores de LAI. id_h es la imagen en la fecha h , y d_1 y d_2 son las fechas de las que se tiene disponible los valores de NDVI. $VERrel$ es el porcentaje de verdor relativo, $VERabs$ es el porcentaje de verdor absoluto.

Análisis de las imágenes MODIS

Para la realización de este trabajo, se eligió el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), embarcado en los satélites TERRA y AQUA, lanzados en 1999 y 2001, respectivamente. Este sensor, presenta una buena resolución espacial para estudios regionales (250m, 500m y 1000 m), con amplia cobertura espectral (36 bandas espectrales, con longitudes de onda que van desde los 0,4 μm a los 14,4 μm). En este sentido, ofrece ventajas teóricas sobre las imágenes del NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), un sensor ampliamente utilizado para este tipo de estudios (Ceccato et al., 2003). Además, las imágenes MODIS son de descarga gratuita, a través del servidor de la NASA (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>) y recientes estudios, han mostrado su capacidad para detectar cambios en contenidos de humedad de la vegetación (Zarco-Tejada et al, 2003; Dennison et al., 2003). Las imágenes MODIS son convertidas por diferentes equipos de la NASA en productos derivados. De todos los disponibles (Justice et al., 2002), para este trabajo se seleccionaron los denominados MOD09A1v4 y MOD11A1v4. El primero se trata de un compuesto de reflectividad de 8 días a 500 metros de resolución que

incluye las 7 primeras bandas del sensor MODIS (Tabla 1) y otras con información auxiliar (ángulos solares y de observación, día del compuesto, etc.) El segundo producto corresponde a la temperatura de superficie a 1 Km de resolución del que únicamente se empleó la banda de temperatura diurna (banda 1).

Todos los compuestos existentes entre las fechas de campo fueron descargados, re proyectados al sistema de coordenadas UTM y en el caso del producto diario de temperatura, remuestreados a una resolución de píxel de 500 m.

Se extrajeron valores de reflectividad y temperatura promedio de ventanas de 3 x 3 píxeles en torno a cada parcela de medida, con el fin de paliar el efecto de valores anómalos que pudieran extraerse como consecuencia de defectos en el ajuste multitemporal entre imágenes.

Antes de calcular variables derivadas de las imágenes MODIS, se verificó la correlación entre las reflectividades de las bandas incluidas en el producto MOD09A1v4 y los valores de FMC tomados en campo, globalmente y por tipos de vegetación.

Posteriormente, se calcularon las siguientes variables derivadas de los productos MODIS (para su descripción ver Tabla 2): el índice de vegetación de diferencia normalizada

ESPECIE	PI	FWI	DC	h1000	h1
PASTO	-0,59	-0,85	-0,82	0,92	0,61
JARA	-0,66	-0,80	-0,76	0,92	0,62
BREZO	-0,41	-0,40	-0,53	0,42	0,36
ROMERO	-0,61	-0,81	-0,82	0,94	0,60
LABIERNAGO	0,16	0,31	-0,25	-0,13	-0,19
MEDIA MATORRAL	-0,65	-0,77	-0,91	0,88	0,57
QUEJIGO	-0,47	-0,73	-0,77	0,82	0,51
HOJARASCA	-0,80	-0,69	-0,21	0,70	0,62

Tabla 3.- Correlaciones del FMC con los índices meteorológicos por especies. En negrita se marcan los valores significativos al nivel 0,05.

ESPECIE	NDVI	NDII6	NDII7	SAVI	GEMI	SM	ARND	Ts	NDVI/TS
PASTO	0,98	0,95	0,94	0,95	0,91	0,98	0,99	-0,81	0,95
JARA	0,89	0,73	0,76	0,72	0,53	0,90	0,79	-0,83	0,89
BREZO	0,56	0,53	0,55	0,56	0,49	0,53	0,43	-0,39	0,40
ROMERO	0,93	0,75	0,76	0,75	0,56	0,93	0,81	-0,80	0,89
LABIERNAGO	-0,01	0,04	0,04	0,12	0,19	-0,03	-0,20	0,05	-0,10
MEDIA MATORRAL	0,89	0,73	0,76	0,75	0,58	0,89	0,75	-0,76	0,83
QUEJIGO	0,30	0,18	0,24	0,10	0,01	0,30	0,10	-0,56	0,49
HOJARASCA	0,49	0,14	0,27	-0,10	-0,29	0,49	0,53	-0,76	0,82

Tabla 4.- Correlaciones del FMC medido en campo con las variables de las imágenes medias por especies. En negrita se marcan los valores significativos al nivel 0,05.

NDVI (Rouse et al., 1974), el índice ajustado al suelo SAVI (Huete, 1988), el índice de vegetación global GEMI (Pinty & Verstraete, 1992), el decremento acumulado ARND (López et al., 1991), el índice de humedad local SM (Eidenshink et al., 1990) el cociente NDVI/TS (Chuvienco et al., 2004) y el índice normalizado de infrarrojo NDII (Hunt & Rock, 1989). En este caso, debido a que el sensor tiene dos bandas en el SWIR, se han calculado dos variantes del índice, el NDII₆ y el NDII₇ (calculados respectivamente con las bandas 6 y 7).

Para correlacionar las variables extraídas de los compuestos MODIS con los datos de humedad, se eligieron para cada parcela los valores de reflectividad del día más cercano y anterior al de campo, aprovechando la información sobre el día juliano de extracción de los diferentes valores de los píxeles del compuesto que proporciona la banda 13 del MOD09A1v4.

Las relaciones entre variables de las imágenes o índices de peligro y humedad se realizaron mediante un análisis de correlación basado en el coeficiente de Pearson. Los coeficientes de correlación fueron calculados por especie y parcela por un lado, y combinando los datos de las 11 fechas de las tres parcelas de pasto y las dos parcelas de matorral por otro.

Resultados y Discusión

Relación entre FMC e índices meteorológicos

La Tabla 3 muestra los resultados de la correlación de Pearson entre el FMC medios por especie y los índices meteorológicos de peligro calculados para el año 2002. Se puede observar cómo todas las especies, excepto el labiérnago y el brezo, presentan correlaciones significativas con alguno de los índices calculados, si bien las mayores correlaciones positivas se encuentran con el índice del sistema NFDRS **h1000** siendo más elevada la correlación con los combustibles vivos (hasta un 0,94 con el romero) que con los muertos (hojarasca: 0,70). Esto es debido a que este índice responde a la variación de humedad de los combustibles más gruesos, que tienen una cadencia similar a los combustibles vivos (Figura 4), esto es, menos afectada por variaciones súbitas de las condiciones meteorológicas. Por su parte, el **DC** presenta buenas correlaciones negativas con el pasto (-0,82), el matorral (-0,91) y el quejigo (-0,77), lo que concuerda con lo esperado, ya que presenta una tendencia ascendente muy marcada a lo largo del periodo de estudio, observándose que su variación hídrica tiene una dinámica similar a la de los combustibles más pesados o a la vegetación viva. No obstante, se ha comprobado que con el pasto y el quejigo este índice presenta relaciones potenciales más fuertes (coeficientes r de 0,77 y 0,92 respectivamente), que las lineales (r^2 de 0,68 y 0,59 respectivamente) (Figura 5). El **h1** es un código de humedad pensado para combustibles finos, lo que explica que tenga buenas correlaciones con la hojarasca (0,62), si bien también presenta valores similares con la jara, lo que nos resulta más complejo de entender. Las correlaciones con el pasto son también similares si consideramos todo el

periodo de estudio (0,61), pero aumentan notablemente si sólo consideramos el periodo estival ($r = 0,71$), en el cual el pasto se comporta prácticamente como materia muerta (Figura 6). Esta buena correlación también se observa con el PI, tanto para hojarasca en todo el periodo, como para pasto en verano, puesto que también se trata de un índice diseñado para combustibles finos.

En cuanto al **FWI** presenta una correlación buena con la mayor parte de las especies, si bien es menor que el DC para los combustibles vivos y mayor para los muertos.

Cabe destacar las correlaciones no significativas presentadas por el labiérnago y el brezo, lo que ya se anunciaba al observar que su contenido de humedad apenas varía con el tiempo.

Relación entre FMC e imágenes satélite

La correlación por bandas con el FMC del pastizal da valores de Pearson de -0,93 y -0,95 para las bandas 6 y 7 respectivamente. Para el matorral, la banda con mayor correlación es la banda 1 del rojo (-0,43). La banda 5, debería dar valores de correlación altos, pero en este caso el bandeo presente en todas las adquisiciones (debido a un defecto en el funcionamiento del sensor) deteriora la calidad de los datos. En cuanto a los valores de correlación obtenidos con el FMC medio para todas las parcelas y especies, la banda 7 muestra los coeficientes más elevados (-0,63), seguido de la 6 (-0,57), el IRC (0,51) y el rojo (-0,49).

Del análisis de la correlación lineal entre el FMC de la vegetación y las variables derivadas de las imágenes (Tabla 4) se observa en primer lugar que los signos de las correlaciones son positivos para los índices de vegetación y negativos para la Ts. La explicación de esto se encuentra, como se anunciaba en la introducción, en el hecho de que los primeros dependen de las condiciones de vigor vegetal de la planta, mientras que el aumento de la Ts se deriva de una mayor pérdida del agua almacenada en las plantas (Cocero, 2002)

En segundo lugar, se observa que los valores de correlación del pastizal son todos significativos y más elevados que los del matorral y el quejigo, que no alcanza valores significativos con ninguno de los índices calculados. El pasto varía de modo más brusco su FMC entre la primavera y el verano, por lo que los efectos indirectos de esta variación –principalmente los cambios en el contenido de clorofila– explicarían las buenas correlaciones con los índices de vegetación. Sin embargo, la reducción del FMC en los matorrales no implica efectos indirectos tan marcados como en el pasto, lo que explica que las correlaciones sean más débiles. Esperaríamos encontrar un valor más alto en el NDII que en el NDVI, puesto que el primero se calcula a partir de las bandas de absorción del agua.

Por otro lado, conviene destacar que, al igual que ocurría con los índices meteorológicos y por las mismas razones, los coeficientes de correlación del brezo y el labiérnago son en general no significativos.

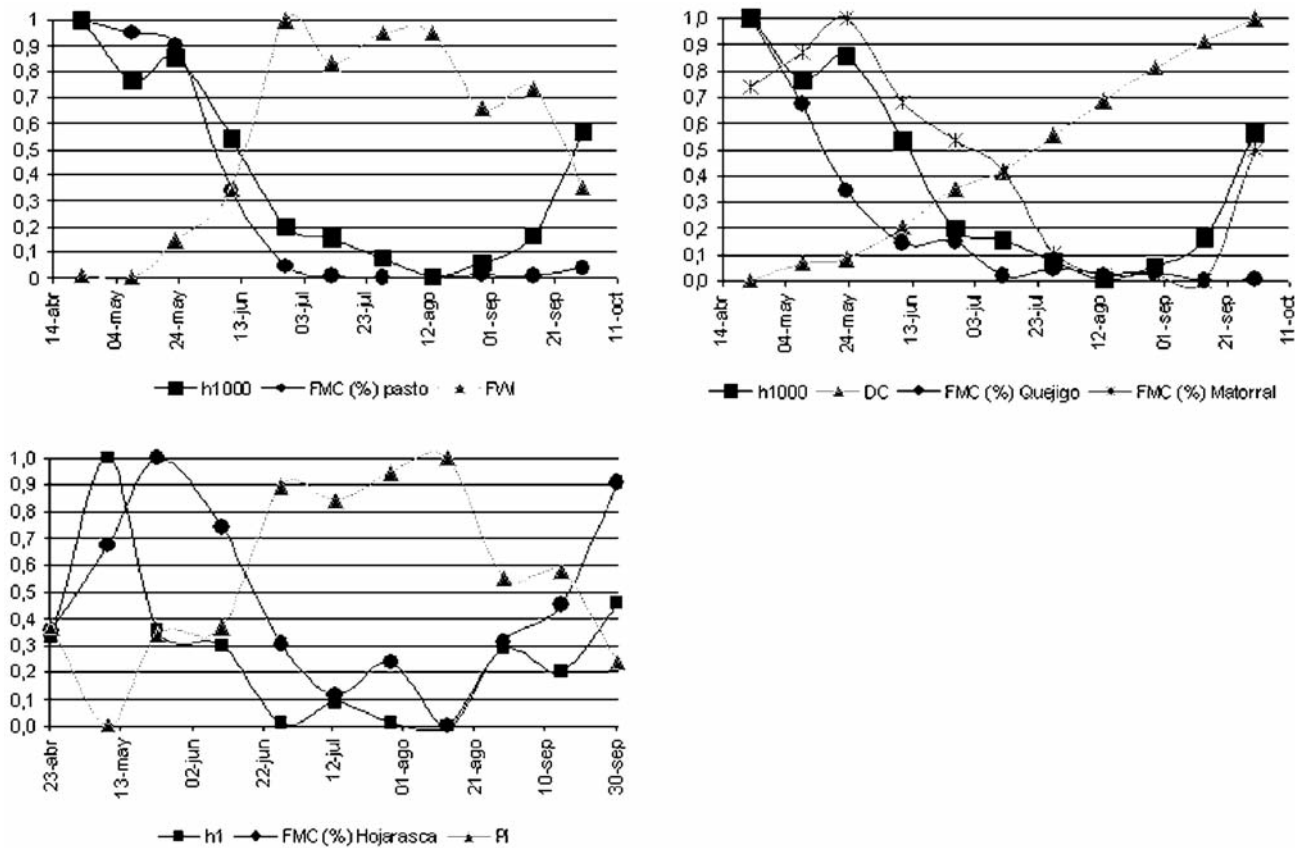


Figura 4.- Evolución del FMC de diferentes especies (valores promedio por parcelas) y de los dos índices meteorológicos mejor correlacionados con cada una de ellas. Todos los valores han sido normalizados a una escala común (0-1) usando los valores máximos y mínimos medidos.

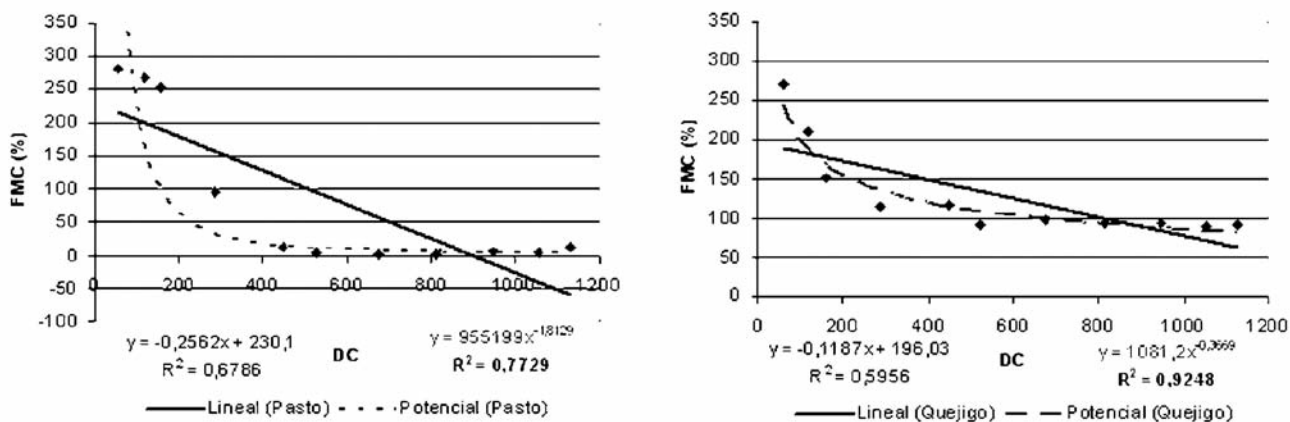


Figura 5.- Correlaciones de los índices meteorológicos con el pasto, considerando todo el periodo y considerando únicamente el periodo en el que se le considera materia muerta.

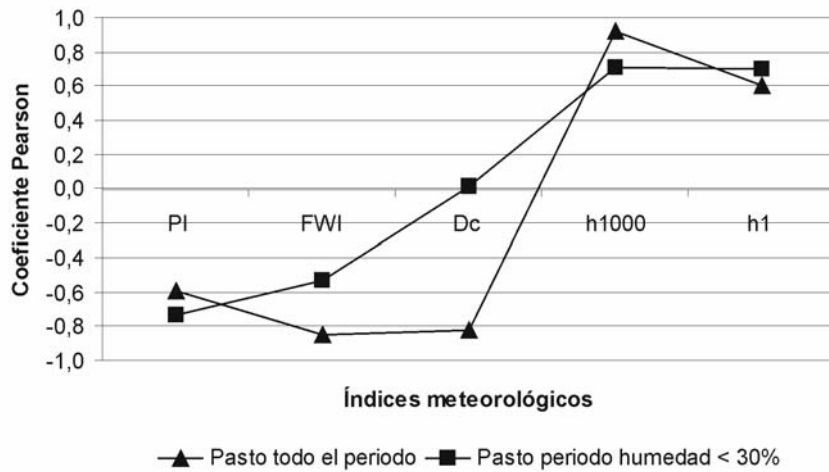


Figura 6.- Correlaciones potenciales y lineales entre el DC y el contenido de humedad del pasto, matorral y quejigo.

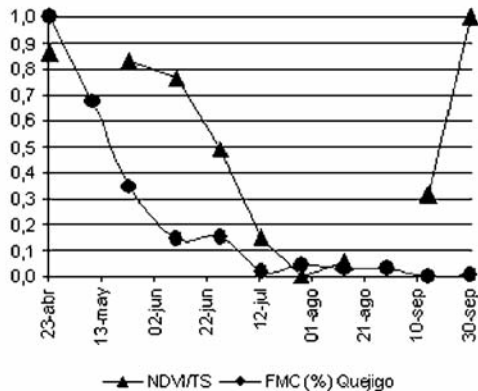
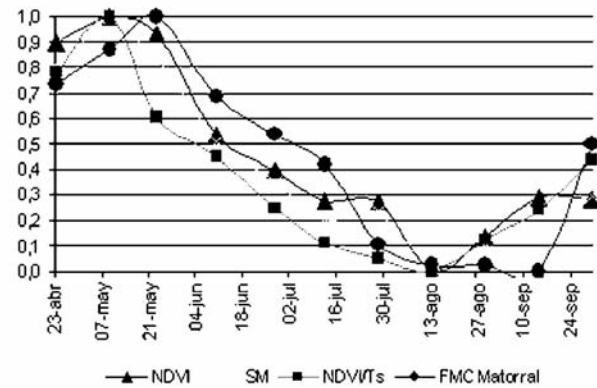
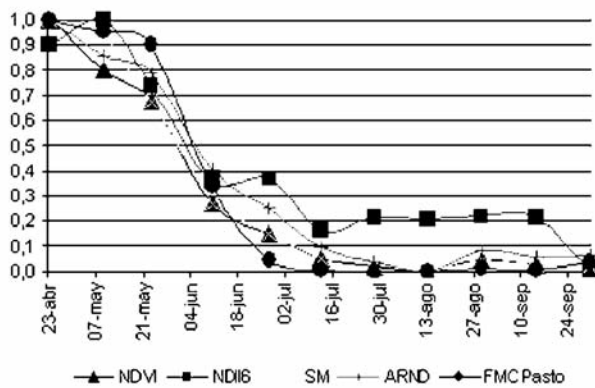


Figura 7.- Evolución del FMC de diferentes especies (valores promedios por parcelas) y de los dos índices derivados del MODIS mejor correlacionados con cada una de ellas. Los valores en blanco son fechas en las que las imágenes MOD11A1v4 de temperatura resultaron defectuosas.

Respecto al quejigo, el hecho de que presente correlaciones no significativas con todos los índices de vegetación, puede ser debido a un desajuste en la ubicación de la parcela en las imágenes de los productos MODIS. Esta cubierta no cubre grandes extensiones homogéneas, por lo que pequeñas desviaciones puede conllevar extracción de información de otra cubierta con diferente respuesta espectral que el quejigo.

Centrándonos en los resultados por índice, el **NDVI** se comporta muy bien para estimar el contenido de humedad de pastizales (0,98 de coeficiente de Pearson), y algo peor para matorrales (0,89). Estudios anteriores (Ceccato et al.,

2001) han concluido de manera similar argumentando que el NDVI mide el efecto indirecto de la pérdida de agua, principalmente los cambios en el área foliar y el contenido en clorofila de la planta, y no tanto su contenido de agua.

El **NDII_s** y **NDII_w**, muestran coeficientes de correlación peores que el NDVI, tanto para pastizales como para matorrales y quejigales, a pesar de que recientes estudios de simulación basados en modelos de transferencia radiativa (Ceccato et al., 2002) apoyan que es el índice de vegetación más sensible al contenido de agua, ya que está calculado a partir de una banda espectral muy sensible a la absorción de

agua en las hojas (el SWIR) y que la correlación entre la reflectividad de las bandas del sensor y el contenido de humedad de las diferentes especies objeto de estudio, resulta ser mayor para las bandas del SWIR (6 y 7) que las del IRC (2) o el Rojo (1). Convendría investigar sobre las posibles razones de este hecho.

Respecto al cociente **NDVI/Ts**, no se obtienen los resultados esperados, ya que sus correlaciones con el FMC no son mejores que las obtenidas únicamente con el NDVI. Esto puede ser debido a que existe un desfase horario entre la toma de medidas de FMC, coincidiendo con las horas de máximo peligro de incendio (entre las 12:00 y las 14:00) y la de Ts del satélite Terra (10:30) ya que, estudios con otros sensores cuya toma de datos son entre las horas de muestreo de campo (NOAA-AVHRR y Landsat_TM y SPOT-Vegetation) si arrojan los resultados esperados, excepto para el pasto y el NOAA-AVHRR (Chuvienco et al., 2004).

Los índices con correlaciones algo más débiles son el **SAVI** y el **GEMI**, presentando este último correlaciones significativas únicamente con el pasto, aunque sería de esperar que siguiesen tendencias similares al NDVI. El **SM** presenta elevadas correlaciones significativas con el pasto y la media de las especies de matorral, con valores iguales a los del NDVI. Por último, el **ARND** muestra las mejores correlaciones con el pasto (mayores que el NDVI) y buenas con el matorral (jara y romero).

En la Figura 7 se puede ver la evolución del FMC de diferentes especies (valores promedios por parcelas) y de los dos índices derivados del MODIS mejor correlacionados con cada una de ellas.

Conclusiones

Se han obtenido buenas correlaciones entre el FMC del pasto y de las especies de matorral, medido en campo, tanto para los índices basados en datos meteorológicos, como para los derivados de las imágenes del sensor MODIS. Hay que investigar sobre las causas de las correlaciones no significativas obtenidas entre los índices extraídos de las imágenes y el quejigo, única especie arbolada de estudio, así como la disminución de las correlaciones al emplear el cociente NDVI/Ts frente al NDVI. No obstante, es necesario señalar que aquí presentamos los resultados preliminares de un estudio más amplio, en el que se pretenden emplear series multitemporales más largas. Al tratarse únicamente de un año y con productos MODIS que aún están en fase de revisión, algunas de las conclusiones habría que verificarlas en el futuro.

A pesar de ello, se considera que la integración de varios de los índices calculados en este estudio en un índice sintético de humedad mejoraría las estimaciones del FMC de las especies mediterráneas, permitiendo realizar un monitoreo intensivo, tanto espacial como temporal, del mismo sin la necesidad de realizar muestreo de campo. Esto último será el siguiente objetivo del presente trabajo, junto con el posterior cálculo de un índice de potencial de ignición que sirva como entrada para la elaboración de cartografía temática de áreas de alto riesgo de incendios por

condiciones de estrés hídrico, en conjunción con otras variables de importancia en el inicio o propagación del fuego (factor humano, rayos, vulnerabilidad del territorio, etc.) usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Bibliografía

- Aldakheel, Y. Y. & Danson, F. M. (1997). Spectral reflectance of dehydrating leaves: measurements and modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 3683-3690.
- Brown, A. A. & Kenneth, D. P. (1979). Fire Danger Rating. En: Brown, A. A. & Davis, K. P. (Eds.). *Forest Fire Control and Use*. Mc Gaw-Hill, New York.
- Burgan, R. E., Klaver, R. W. & Klaver, J. M. (1998). Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire*, 8: 159-170.
- Camia, A., Bovio, G., Aguado, I. & Stach, N. (1999). Meteorological fire danger indices and remote sensing. En: Chuvienco, E. (Ed.). *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag, Berlín.
- Ceccato, P., Flasse, S. & Gegoire, J. M. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, 82: 198-207.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S. & Gégouire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22-33.
- Ceccato, P., Leblon, B., Chuvienco, E., Flasse, S. & Carlson, J. D. (2003). Estimation of Live Fuel Moisture Content. En: Chuvienco, E. (Ed.). *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Chuvienco, E. (2002). Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, Barcelona.
- Chuvienco, E., Aguado I., Cocero, D. & Riaño, D. (2003). Design of an Empirical Index to Estimate Fuel Moisture Content from NOAA-AVHRR Analysis In Forest Fire Danger Studies. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1621-1637.
- Chuvienco, E., Cocero, D. et al. (2004). Improving Burning Efficiency Estimates through Satellite Assessment of Fuel Moisture Content. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 109: 1-8.
- Chuvienco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, M. P., Martínez-Vega, J., Riva, J. & Pérez, F. (2004). Combining NDVI and Surface Temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92: 322-331.
- Chuvienco, E., Riaño, D., Aguado, I. & Cocero, D. (2002). Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data:

- applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2145-2162.
- Chuvieco, E. & Salas, F. J. (1996). Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10: 333-345.
- Cocero, D. (2002). Estimación del contenido de humedad de la vegetación usando imágenes de satélite para la prevención del peligro de incendios. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- Cocero, D., Riaño, D. & Chuvieco, E. (1998). Estimación de la humedad de la vegetación usando imágenes de satélite e índices meteorológicos del peligro de incendios. *Serie Geográfica*, 7: 59-72.
- Dennison, P. E., Roberts, D. A., Thorgusen, S. R., Regelbrugge, J. C., Weise, D. & Lee, C. (2003). Modeling seasonal changes in live fuel moisture and equivalent water thickness using a cumulative water balance index. *Remote Sensing of Environment*, 88: 442-452.
- Eidenshink, J. C., Burgan, R. E. & Haas, R. H. (1990). Monitoring fire fuels condition by using time series composites of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data: *Proceedings, International Symposium on Advanced Technology in Natural Resource Management, Second, Washington D.C.*, 90: 68-82.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Hunt, E. R. & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30: 43-54.
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 3-15.
- Pinty, B. & Verstraete, M. M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101: 15-20.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation, Geenbelt, MD, USA.
- San Miguel-Ayanz, J., Carlson, J. D., Alexander, M., Tolhurst, K., Morgan, G., Sneeuwjagt, R. & Dudley, M. (2003). Current Methods to Assess Fire Danger Potential, En: Chuvieco, E. (Ed.). *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Van Wagner, C. E. (1967). Seasonal variation in moisture content of Eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires. Departmental Publ. n° 1204. Forestry Branch, Canada,.
- Vázquez, M. F. & Denore, B. J. (1999). FOMFIS, un sistema para la cartografía de combustibles forestales a partir de imágenes de satélite de alta resolución. Teledetección. Avances y Aplicaciones. Asociación Española de Teledetección, Albacete, España.
- Viger, J.A. et al. (2004). Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona. Mundi-Prensa, Madrid.