

# Estudio a través de imágenes LANDSAT 5-TM del efecto de un incendio sobre el balance de energía en superficie en una zona de bosque mediterráneo

## Effect of a forest fire on the surface energy balance in a mediterranean forest area using Landsat 5-TM imagery

J. M. Sánchez<sup>1</sup>, E. Rubio<sup>1,2</sup>, F. R. López-Serrano<sup>3</sup>, M. M. Artigao<sup>1</sup>, V. Caselles<sup>4</sup>,  
D. Moya<sup>3</sup> y M. M. Odi<sup>2</sup>  
juanmanuel.sanchez@uclm.es

<sup>1</sup>Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete (EIIAB),  
Universidad de Castilla-La Mancha, 02071, Albacete.

<sup>2</sup>Instituto de Desarrollo Regional (IDR), University of Castilla-La Mancha, 02071, Albacete, España

<sup>3</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete.  
Universidad de Castilla-La Mancha, 02071, Albacete

<sup>4</sup>Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Facultad de Física,  
Universitat de València, Dr. Moliner, 50, 46100, Burjassot (Valencia)

Recibido el 02 de abril de 2009, aceptado el 02 de septiembre de 2009

### RESUMEN

Los incendios forestales son uno de los principales agentes en la alteración de la estructura y función de los ecosistemas. Las técnicas de Teledetección permiten obtener información y hacer un seguimiento de zonas extensas afectadas por incendios. En este trabajo hemos empleado un conjunto de 5 imágenes Landsat 5 Thematic Mapper (TM), de los años 2007-2008, que cubren una zona forestal y de monte bajo afectada por un incendio en el verano de 2001. Se han establecido dos zonas control (no quemadas) representativas de las condiciones en la zona quemada antes del incendio. Se ha aplicado el modelo simplificado de dos fuentes STSEB para elaborar mapas de flujos energéticos instantáneos, a la hora de paso del satélite. Una estación Bowen situada en la zona permite hacer una validación previa de los resultados. En cuanto al régimen de flujos energéticos lo más significativo es el aumento de más de 150

### ABSTRACT

Forest fires are one of the main agents involved in the change of structure and function of ecosystems. Remote sensing techniques allow us to obtain land surface information and monitor vast areas affected by fire. In this work we used a set of 5 Landsat 5 Thematic Mapper (TM) images, of the years 2007-2008, covering an area of forest and shrubs, affected by a fire in the summer of 2001. Two control areas (non-burned) were established, representative of the pre-fire conditions in the burned areas. The simplified two-source model STSEB was applied to elaborate instantaneous energy flux maps, at the time of the satellite overpass. A Bowen station placed in the study site permitted a previous validation of the results. Regarding the energy fluxes the most remarkable is the increasing of more than 150 W m<sup>-2</sup> at instantaneous scale, and 40 W m<sup>-2</sup> at daily scale, in sensible heat flux, and the decreasing of more than 250 W m<sup>-2</sup> (8.8 mm/day) at instanta-

$W m^{-2}$  a escala instantánea, y de  $40 W m^{-2}$  a escala diaria, en el flujo de calor sensible, y el descenso de más de  $250 W m^{-2}$  (8,8 mm/día) a escala instantánea, y de  $60 W m^{-2}$  (2,1 mm/día) a escala diaria, en la evapotranspiración real, que se observa en la zona forestal. En la zona de monte bajo, el efecto del incendio es ya prácticamente despreciable transcurridos 6 años, debido a la regeneración de la vegetación que se ha producido en la zona.

**PALABRAS CLAVE:** incendio forestal, flujos energéticos, Landsat 5-TM, vegetación natural

neous scale, and  $60 W m^{-2}$  (2.1 mm/day) at daily scale, in actual evapotranspiration, observed in the forested area. In the shrubs area, the fire effect is almost negligible after 6 years, since the vegetation regenerates.

**KEYWORDS:** forest fire, energy fluxes, Landsat 5-TM, natural vegetation

## INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son altamente destructivos para la naturaleza, afectando al paisaje, al ciclo natural de la vegetación, y a la estructura y función de los ecosistemas (Koutsias y Karteris, 2000; Lozano *et al.*, 2008). Otro efecto importante de los incendios, son los cambios provocados en la meteorología local y/o regional de la zona, y en concreto en el régimen de flujos energéticos en superficie. En los últimos años ha crecido la preocupación dentro de la comunidad científica por el efecto que los incendios forestales pueden ejercer sobre el cambio climático en este sentido (Amiro *et al.*, 1999; Randerson, 2006; Kasischke y Stocks, 2000). En una zona afectada por un incendio el cambio conjunto en la estructura del ecosistema y la composición de las especies modifica la radiación neta y el reparto de ésta entre los distintos términos de la ecuación de balance de energía. Además, estos cambios en el balance energético local pueden persistir durante décadas (Randerson *et al.* 2006).

El efecto neto de los incendios sobre el calentamiento global y el cambio climático es una tarea difícil de analizar, debido a la gran cantidad de factores que intervienen (Randerson *et al.* 2006). Por ejemplo, el aumento en el albedo que se produce tras un incendio, y que puede llevar asociado un efecto de enfriamiento, podría verse compensado por una mayor acumulación de carbono, anulando de esta forma los efectos a escala global. En este trabajo nos centramos en el estudio de los cambios en el régimen de flujos energéticos que se produce tras un incendio. Tendrán que ser los modelos de forzamiento radiativo los que determinen cuál es el efecto de estos cambios en el sistema global.

Para poder estimar los flujos energéticos sobre zonas extensas de la superficie se hace necesario el uso de técnicas de Teledetección, siendo insuficiente los datos registrados en estaciones de medida puntual. En este trabajo emplearemos el modelo simplificado de dos fuentes (STSEB), desarrollado por Sánchez *et al.* (2008a), adaptado para ser aplicado a imágenes de alta resolución del sensor Landsat 5 Thematic-Mapper (TM) siguiendo el esquema de Sánchez *et al.* (2008b). El modelo STSEB tiene como base el modelo TSEB (Norman *et al.* 1995), del que difiere fundamentalmente en dos aspectos: la ponderación de los flujos de calor sensible procedentes del suelo y de la vegetación por sus respectivas áreas parciales de ocupación, por un lado, y la composición sin atenuación que se hace de las contribuciones del suelo y de la vegetación a la radiación neta total, por otro. En definitiva el STSEB se podría definir como una versión del TSEB en el que suelo y vegetación están totalmente desacoplados.

En el verano de 2001 un incendio arrasó una extensión de 172 ha de pinar y monte bajo dentro del término de Almodovar del Pinar, en la provincia de Cuenca (Figura 1). Desde entonces, se ha convertido en una zona de estudio en distintas disciplinas. La zona cuenta con una torre meteorológica próxima, y puntualmente para esta experiencia también se colocó una estación de medida Bowen (Figura 2). Nuestro objetivo con este trabajo es cuantificar el efecto del incendio en términos de radiación neta, y flujos de calor en el suelo, sensible y latente, en dos ecosistemas diferentes, un pinar maduro y una zona de matorral o monte bajo. Para ello emplearemos una serie de 5 imágenes L5-TM de la zona comprendidas entre julio 2007 y julio 2008.

## ÁREA DE ESTUDIO Y MATERIAL UTILIZADO

La zona de estudio es una masa forestal de pendientes suaves (no sobrepasan el 2 ó 3 %), con algunas parcelas de cultivos intercaladas, situada en el término municipal de Almodóvar del Pinar, Cuenca (39° 40' N, 1° 50' W, 950 m altitud) (Figura 1). El clima es mediterráneo, moderadamente cálido, seco y de inviernos frescos, con una temperatura media anual de 12,2 °C y una precipitación media anual de 507 mm. La especie arbórea más importante en la zona es el pino rodeno (*Pinus pinaster* Ait.), con una fracción de cobertura media situada entre el 40 y el 70 %. Sin embargo ésta no es la única especie de pino presente, ya que también existen zonas con presencia de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y pino laricio (*Pinus nigra* Arnold). Otras especies arbóreas destacables son la encina (*Quercus ilex* L.), el quejigo (*Quercus faginea* Lam.), el enebro (*Juniperus oxycedrus* L.) o la sabiná (*Juniperus phoenicea* L.). Entre las especies arbustivas cabe destacar el romero (*Rosmarinus officinalis* L.), el tomillo (*Thymus vulgaris*), el espliego (*Lavandula latifolia* L.), la coscoja (*Quercus coccifera* L.) y la aliaga (*Genista scorpius* L.).

En el verano de 2001, se produjo un incendio que afectó en total a unas 172 ha, de las cuales 113 ha estaban cubiertas de pino y 59 de arbustos (Figura 3). Tras el incendio se produjo un regenerado natural de la especie *Quercus ilex* L. Para este estudio hemos acotado dos áreas dentro de los límites de la zona quemada y otras dos fuera, correspondientes a

zonas de pinar y zonas de arbusto. Cada una de estas áreas se compone de 3 subáreas, de extensión 125×125 m<sup>2</sup> cada una. A las zonas establecidas fuera de los límites del incendio, se les ha denominado zonas control (\_c), y son perfectamente representativas de las condiciones que habría en las zonas marcadas dentro de los límites del incendio en caso de que este nunca hubiese ocurrido (Figura 3). En la zona denominada *Forestal\_c*, se colocó una torre meteorológica con instrumentación para la medida de la temperatura del aire y velocidad de viento, a varias alturas, así como de la radiación solar incidente, precipitación, etc. Por otro lado, en septiembre de 2007 se instaló una estación Bowen de medida de flujos de energía en la zona quemada denominada *Forestal*. Además, también hemos seleccionado una zona cercana representativa de un encinar maduro con el fin de analizar el efecto del incendio en un escenario futuro en el que el bosque de pinos se ve remplazado por la encina como especie predominante.

En cuanto a las imágenes de satélite, para este trabajo hemos empleado un conjunto de 5 imágenes del sensor Landsat 5-TM (19 julio 2007, 4 agosto 2007, 28 septiembre 2007, 2 mayo 2008, 21 julio 2008), con una resolución espacial de 30 m para las bandas del visible e infrarrojo próximo, y de 120 m para la banda térmica (si bien todas las bandas fueron reescaladas a una resolución de 25m). Además, para extraer los perfiles necesarios para la corrección atmosférica de las imágenes, hemos recurrido a la herramienta disponible en la página <http://atm-corr.gsfc.nasa.gov/>.

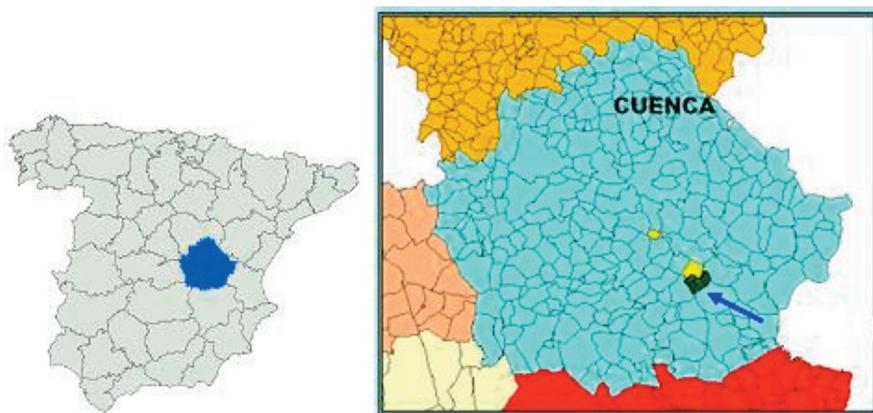
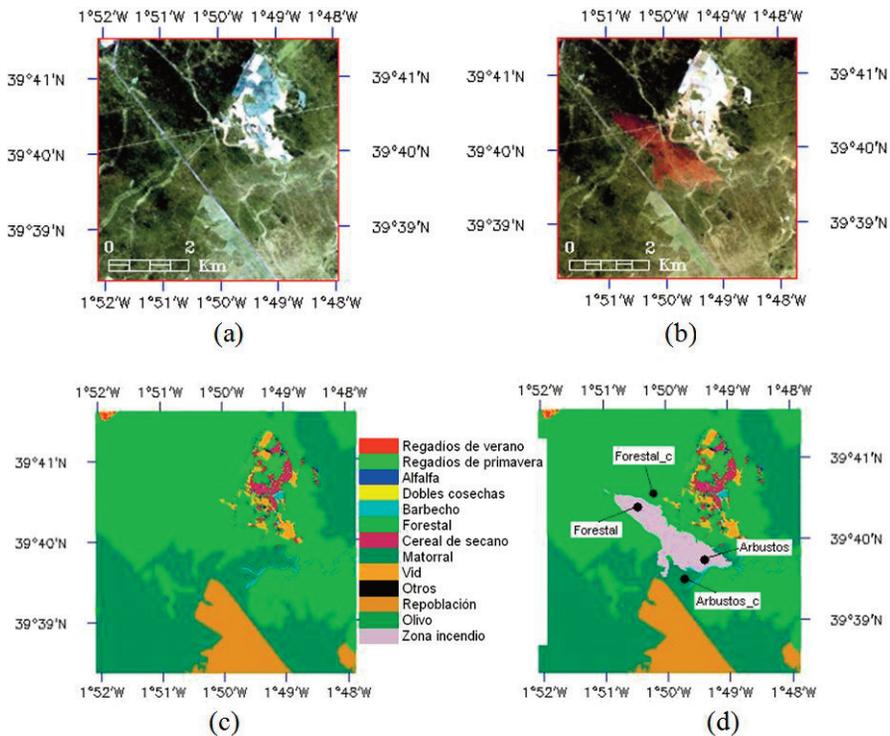
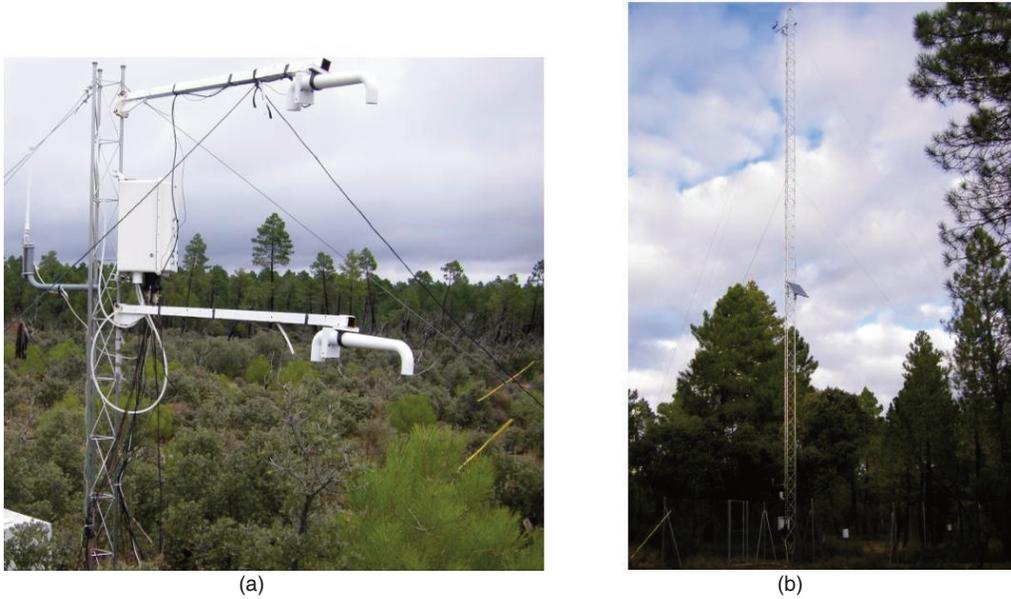


Figura 1. Localización de la zona de estudio



**Figura 3.** Zona de estudio: (a) Composición en falso color (7,5,3) a partir de una imagen Landsat 7-ETM+ correspondiente a la fecha 8 de junio de 2001 (anterior al incendio), (b) Composición en falso color (7,5,3) a partir de una imagen Landsat 7-ETM+ correspondiente a la fecha 26 de julio de 2001 (posterior al incendio), (c) Mapa de usos de suelo anterior al incendio, (d) Mapa de usos de suelo posterior al incendio.

## METODOLOGÍA

La descripción detallada de la metodología seguida para la estimación de los flujos de energía en superficie, así como del procesado y tratamiento de las imágenes de satélite, se puede encontrar en Sánchez *et al.* (2008b). A continuación se presentan, a modo de resumen, las principales ecuaciones empleadas.

El punto de partida del modelo es la Ecuación de Balance de Energía (EBE):

$$R_n = G + H + LE \quad (1)$$

donde  $R_n$  ( $W m^{-2}$ ) es el flujo de radiación neta,  $G$  ( $W m^{-2}$ ) es el flujo de calor en el suelo,  $H$  ( $W m^{-2}$ ) es el flujo de calor sensible,  $LE$  ( $W m^{-2}$ ) es el flujo de calor latente o evapotranspiración.  $LE$ , se puede obtener como un residuo de la ecuación (1) conociendo previamente  $H$ ,  $G$  y  $R_n$ .

Para el cálculo de la cobertura de vegetación ( $P_v$ ) se ha empleado la relación propuesta por Valor y Caselles, 1996:

$$P_v = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right) - K \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_v}\right)} \quad (2)$$

donde el índice de vegetación  $NDVI$  se obtiene de la forma:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (3)$$

donde  $R_{NIR}$  es la reflectividad en el infrarrojo próximo, y  $R_{RED}$  es la reflectividad en el rojo (visible), extraídas, respectivamente, de las bandas 4 y 3 del TM;  $NDVI_v$  es el valor del índice de vegetación en zonas de cobertura completa de vegetación;  $NDVI_s$  es el índice de vegetación en zonas de suelo desnudo desprovisto de vegetación;  $K$  es un coeficiente que se obtiene a través de la expresión:

$$K = \frac{R_{NIR_v} - R_{RED_v}}{R_{NIR_s} - R_{RED_s}} \quad (4)$$

donde  $R_{NIR_v}$  y  $R_{NIR_s}$  son las reflectividades en el infrarrojo próximo, mientras que  $R_{RED_v}$  y  $R_{RED_s}$  son las reflectividades en el rojo, respectivamente para la vegetación y el suelo.

A partir del valor de  $P_v$ , para cada píxel, se obtiene la emisividad a través de la ecuación simplificada:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v)(1 - 1.74 P_v) + 1.7372 P_v (1 - P_v) \quad (5)$$

donde  $\varepsilon_v$  y  $\varepsilon_s$  son los valores de la emisividad de la vegetación y del suelo, respectivamente. Para este trabajo se tomaron valores típicos:  $\varepsilon_v=0,985$  y  $\varepsilon_s=0,960$  (Rubio *et al.*, 2003).

Así pues, la temperatura superficial,  $T_R$ , se puede estimar a través de la ecuación de transferencia radiativa monocanal:

$$B(T_R) = \frac{L(T) - R^\uparrow}{T^\uparrow \varepsilon} - \frac{(1 - \varepsilon)R^\downarrow}{\varepsilon} \quad (6)$$

donde  $L(T)$  es la radiancia a nivel de satélite;  $T$  es la temperatura de brillo,  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie;  $B(T_R)$  es la radiancia emitida por la superficie;  $R^\uparrow$  es la radiancia ascendente emitida por la atmósfera en el ángulo de visión del sensor,  $R^\downarrow$  es la radiancia hemisférica descendente;  $T^\uparrow$  es la transmitividad atmosférica que atenúa la radiancia recibida por el instrumento.

Para el cálculo de  $H$  se emplea el modelo desacoplado de dos fuentes propuesto por Sánchez *et al.* (2008a). Este modelo tiene en cuenta las contribuciones al flujo total procedentes del suelo,  $H_s$ , y de la vegetación,  $H_c$ , a través de la expresión:

$$H = P_v H_c + (1 - P_v) H_s \quad (7)$$

Por su parte,  $H_c$  y  $H_s$ , se obtienen a través de las expresiones:

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^h} \quad (8)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s} \quad (9)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $T_c$  y  $T_s$  son las temperaturas (K) de la vegetación y del suelo, respectivamente,  $T_a$ , la temperatura (K) del aire, y finalmente  $r_a^h$ ,  $r_a^a$  y  $r_a^s$  son las resistencias aerodinámicas ( $\text{s m}^{-1}$ ) del aire y del suelo, respectivamente. Estas resistencias aerodinámicas se obtienen a través de expresiones en las que intervienen la velocidad del viento,  $u$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), la altura de la vegetación,  $h$  (m).

En lugar de emplear las medidas directas en las estaciones agro-meteorológicas, se puede estimar  $R_n$  estableciendo el balance entre la radiación de onda corta y onda larga a través de la expresión:

$$R_n = (1 - \alpha)S + \varepsilon L_{sky} - \varepsilon \sigma T_R^4 \quad (10)$$

donde  $S$  es la radiación de onda corta ( $\text{W m}^{-2}$ );  $L_{sky}$  es la radiación hemisférica incidente de onda larga;  $\alpha$  es el albedo;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ) es la constante de Stefan-Boltzmann.  $\alpha$  se obtiene a partir de las reflectividades corregidas de las bandas 1-5 y 7, de acuerdo con el método de Dubayah (1992):

$$\alpha = 0.221\rho_1 + 0.162\rho_2 + 0.102\rho_3 + 0.354\rho_4 + 0.059\rho_5 + 0.0195\rho_7 \quad (11)$$

Finalmente, el flujo de calor en el suelo se obtiene como una fracción ( $C_G$ ) de la radiación neta:

$$G = C_G(1 - P_v)R_n \quad (12)$$

Para este trabajo hemos empleado un valor de  $C_G = 0,275$  (valor intermedio entre los límites habituales, 0,15-0,40).

A escala diaria (“d”), se puede despreciar el término  $G_s$ , y la  $EBE$  se reduce a la expresión:  $R_{nd} = H_d + LE_d$ . De acuerdo con Seguin e Itier (1983), la evapotranspiración diaria se puede obtener a partir de los valores instantáneos (“i”) como:

$$LE_d = R_{nd} - H_d = \frac{R_{nd}}{R_{ni}}(R_{ni} - H_i) \quad (13)$$

donde el cociente  $R_{nd}/R_{ni}$  varía con la hora, el día del año y la latitud, pero no con el tipo de vegetación (Sánchez *et al.*, 2008b).

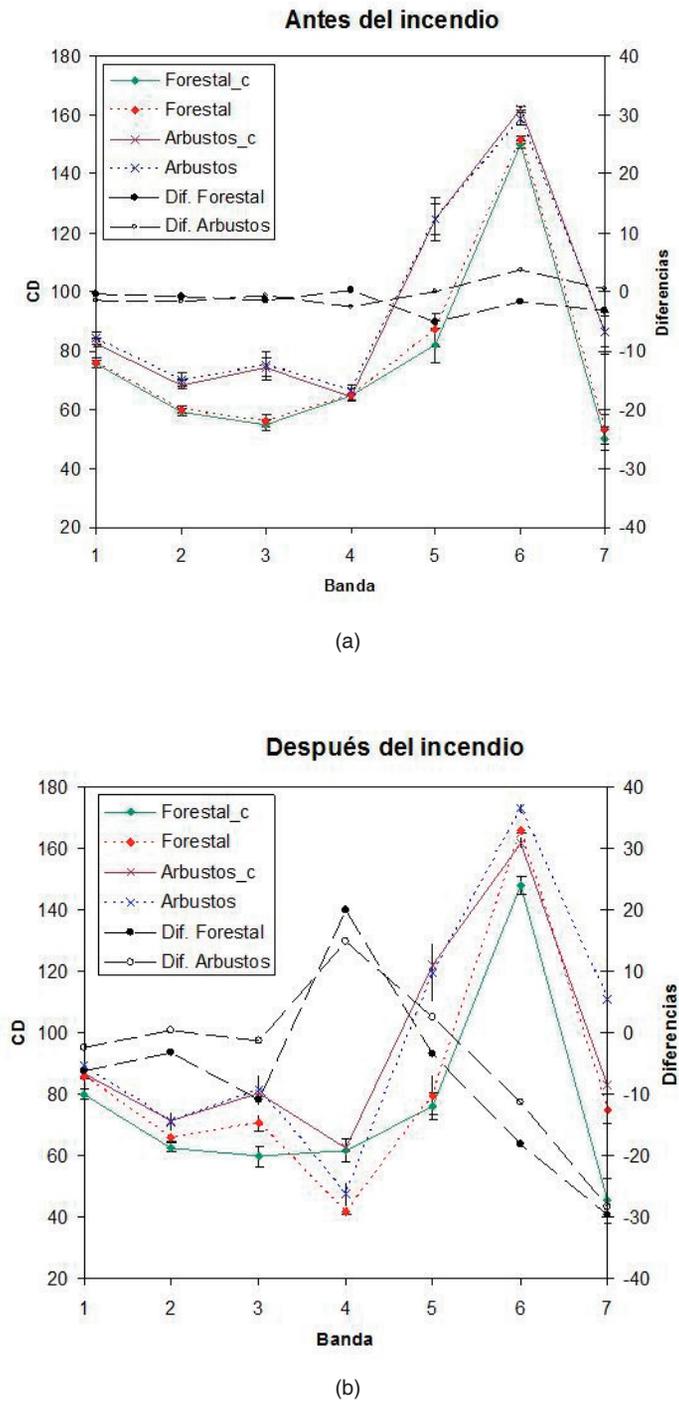
## RESULTADOS

### Comparación con las zonas control

En primer lugar, era necesario un estudio previo de la similitud de las zonas llamadas “de control” con las zonas seleccionadas afectadas por el incendio. Para ello recurrimos a dos imágenes Landsat 7-ETM+ de la zona, una anterior y otra posterior a la fecha del incendio (8 junio 2001 y 26 julio 2001). Directamente con los datos originales de cuentas digitales (CD), sin necesidad de procesado adicional, se comparan los valores obtenidos en ambas zonas, para cada uno de los 7 canales del Landsat. La Figura 4a muestra esta comparación antes del incendio.

Se observa como las diferencias son despreciables entre las zonas control y las zonas que días más tarde se verán afectas por el incendio. Además, se realizó un test de diferencias significativas. Tanto en la zona forestal como en la de arbustos la probabilidad asociada al test entre las zonas de control y las zonas posteriormente afectadas por el incendio era superior a 0,05. Se demuestra así la validez de las zonas control como representativas del estado de la vegetación en las zonas quemadas si el incendio no se hubiese producido. Sin embargo, las diferencias son evidentes cuando se analizan después del incendio (Figura 4b).

Entre otros se aprecia un incremento considerable de los valores en las bandas 6 (infrarrojo térmico) y 7 (infrarrojo medio), y un descenso en la banda 4 (infrarrojo próximo), consecuencia de la desaparición de la vegetación. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por López y Caselles (1991) en una zona quemada, de características similares, situada en el interior de la provincia de Valencia.



**Figura 4.** Valores de cuenta digital promedio, con sus respectivas barras de error, para cada una de las zonas seleccionadas, y las diferencias entre las zonas elegidas y sus respectivas zonas control, (a) antes del incendio, (b) después del incendio. Intervalos espectrales de las distintas bandas: (1) 0,45-0,52  $\mu\text{m}$ , (2) 0,52-0,60  $\mu\text{m}$ , (3) 0,63-0,69  $\mu\text{m}$ , (4) 0,76-0,9  $\mu\text{m}$ , (5) 1,55-1,75  $\mu\text{m}$ , (6) 10,4-12,5  $\mu\text{m}$ , (7) 2,08-2,35  $\mu\text{m}$ .

## Comparación con los flujos observados

Una vez procesados con MODTRAN los perfiles atmosféricos extraídos para cada una de las imágenes Landsat disponibles, se obtienen los parámetros atmosféricos necesarios para la corrección atmosférica de todas y cada una de las 7 bandas de las imágenes TM. Tras elegir las zonas de cobertura completa de vegetación y las zonas desprovistas de vegetación, se procede a la extracción de la información de cada zona necesaria para aplicar las relaciones (2)-(4), (8), (9). Combinando esta información con los valores de  $T_a$ ,  $u$ , y  $S$ , medidos en la torre meteorológica, se completa el conjunto de datos necesario para obtener todos los parámetros y magnitudes descritos en la sección anterior. En la Figura 5 se muestra, a modo de ejemplo, los mapas generados a partir de la imagen del 28 de septiembre de 2007.

Tres de las cinco imágenes analizadas coinciden en el tiempo con mediciones de la estación Bowen por lo que ha sido posible realizar una comparación entre los valores de flujos energéticos obtenidos y los valores medidos directamente a través de la estación Bowen colocada en la zona *forestal*. En la Tabla 1 se han incluido (entre paréntesis) los valores medidos en superficie. En general se aprecia un buen acuerdo entre los flujos medidos y los estimados. En resumen se obtienen unos errores relativos del 7% ( $40 \text{ W m}^{-2}$ ), 12% ( $15 \text{ W m}^{-2}$ ), 19% ( $70 \text{ W m}^{-2}$ ) y 21% ( $21 \text{ W m}^{-2}$ ) para  $R_m$ ,  $G$ ,  $H$  y  $LE$ , respectivamente, a escala instantánea, mientras que a escala diaria los errores son del 6% ( $11 \text{ W m}^{-2}$ ), 3% ( $4 \text{ W m}^{-2}$ ) y 22% ( $10 \text{ W m}^{-2}$ ) para  $R_m$ ,  $H$  y  $LE$ , respectivamente. Si bien se trata de una validación algo reducida con tan solo tres puntos, el hecho de que el modelo ya haya sido testado con anterioridad en diversos tipos de cobertura (Sánchez *et al.* 2008a, b) confiere mayor confianza a los resultados.

## Análisis del efecto del incendio

En la Tabla 1 se muestra el resumen de los valores promedio de los flujos y parámetros más significativos del modelo, para cada una de las zonas y las fechas de estudio. Los errores corresponden a la desviación estándar del promedio de los 75 píxeles incluidos en cada zona. Hay que tener presente que en las fechas de estudio ya habían transcurrido más de 6 años desde que se produjo el incendio. Así pues, la regeneración que se ha producido durante ese tiempo hace que la zona de arbustos haya reco-

brado en buena parte su estado original (anterior al incendio), mientras que es un periodo muy corto para la zona forestal. Esto se aprecia claramente en los valores medios de  $NDVI$  y  $P_v$  de la Tabla 1. Un efecto similar se aprecia en el caso de la temperatura de la superficie. En la zona *forestal* los valores de  $T_R$  están una media de  $6^\circ\text{C}$ , por encima en la zona quemada, mientras que para la zona de arbustos, la zona quemada muestra en término medio valores de  $0,6^\circ\text{C}$  por debajo de la zona control. Estas diferencias son del mismo orden a las observadas por otros autores en estudios similares (Amiro *et al.*, 1999).

Transcurridos 6 años después del incendio, el efecto de éste sobre el régimen de flujos energéticos en la zona prácticamente ha desaparecido en la zona de *arbusto*, mientras que se sigue manifestando, y de forma muy significativa, en la zona *forestal*. En la Figura 6 se muestran los valores medios, para las 5 fechas analizadas, de las diferencias en términos de flujos energéticos entre los valores calculados para las zonas forestal y de arbustos, y sus respectivas zonas control. El aumento del albedo y de  $T_R$  produce un descenso tanto en la radiación neta de onda corta, como en la de onda larga, que conlleva un descenso neto medio de  $R_{ni}$  de  $54 \pm 5 \text{ W m}^{-2}$ . El efecto contrario se aprecia en el caso de  $G_p$ , con un aumento neto medio de  $43 \pm 10 \text{ W m}^{-2}$ . A escala diaria el descenso medio de  $R_{nd}$  es de  $15 \pm 3 \text{ W m}^{-2}$ .

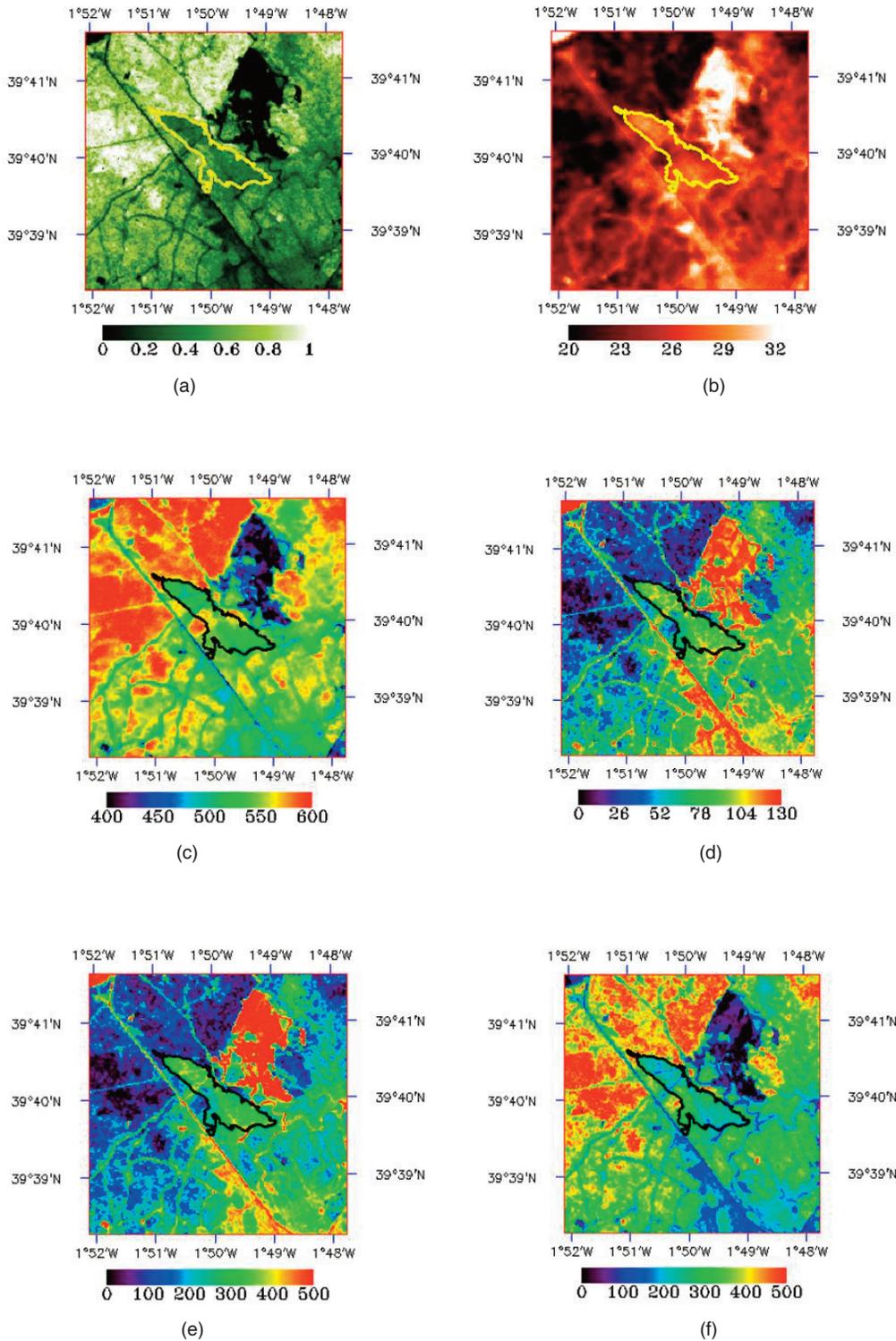
El flujo de calor sensible instantáneo es, en valor medio,  $160 \pm 40 \text{ W m}^{-2}$  mayor en la zona quemada, mientras que finalmente el flujo de calor latente instantáneo es  $250 \pm 50 \text{ W m}^{-2}$  inferior. A escala diaria el aumento de  $H$  en la zona quemada es de  $45 \pm 9 \text{ W m}^{-2}$ , y el descenso de  $LE$  es de  $61 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$ , o lo que es lo mismo de  $2,1 \pm 0,2 \text{ mm/día}$ , aproximadamente. Por tanto, si bien el efecto del incendio sobre el total de la radiación neta no llega a ser muy importante, si que lo es el aumento que se produce en la razón de Bowen ( $H/LE$ ), y el descenso drástico en la evapotranspiración de la zona forestal.

En la Figura 6 se puede analizar también el efecto del incendio en un escenario futuro en el que los rebrotes de encina se hayan desarrollado y se haya constituido un encinar adulto. Para ello se muestran las diferencias entre la zona *forestal* de control, y la zona elegida representativa de un encinar maduro. Se puede observar como el régimen de radiación neta se vería poco afectado con el paso de los años, sin embargo las diferencias en términos del flujo de calor en el suelo, sensible y latente se reducirían a la mitad tanto a escala instantánea como diaria. A pesar de esta reducción se siguen apreciando dife-

Fecha	Forestal		Arbustos		Encinar maduro
	Zona de control	Zona quemada	Zona de control	Zona que-	
<b>Albedo</b>					
19-jul-07	0.117±0.003	0.14±0.04	0.124±0.003	0.139±0.004	0.144±0.007
4-ago-07	0.119±0.003	0.134±0.003	0.126±0.002	0.138±0.003	0.143±0.006
28-sep-07	0.095±0.003	0.115±0.007	0.098±0.003	0.12±0.07	0.132±0.011
2-may-08	0.116±0.002	0.127±0.004	0.119±0.002	0.128±0.002	0.135±0.006
21-jul-08	0.114±0.002	0.131±0.004	0.120±0.003	0.134±0.003	0.138±0.005
<b>NDVI</b>					
19-jul-07	0.43±0.03	0.292±0.018	0.32±0.03	0.309±0.018	0.35±0.04
4-ago-07	0.397±0.019	0.275±0.014	0.29±0.02	0.286±0.017	0.33±0.03
28-sep-07	0.63±0.04	0.38±0.03	0.42±0.05	0.38±0.03	0.45±0.06
2-may-08	0.46±0.02	0.275±0.019	0.29±0.02	0.290±0.017	0.37±0.03
21-jul-08	0.44±0.03	0.33±0.02	0.35±0.03	0.35±0.02	0.39±0.03
<b>Cobertura de vegetación</b>					
19-jul-07	0.58±0.04	0.33±0.04	0.37±0.05	0.36±0.03	0.44±0.07
4-ago-07	0.52±0.03	0.29±0.03	0.31±0.04	0.31±0.03	0.39±0.07
28-sep-07	0.74±0.06	0.34±0.05	0.41±0.07	0.35±0.04	0.46±0.09
2-may-08	0.63±0.04	0.29±0.04	0.33±0.04	0.32±0.03	0.48±0.05
21-jul-08	0.61±0.05	0.39±0.04	0.43±0.05	0.44±0.04	0.51±0.06
<b>Temperatura de superficie</b>					
19-jul-07	36.8±0.9	42.9±1.4	42.1±0.6	41.24±1.14	39.5±1.3
4-ago-07	37.5±1.0	43.5±1.5	43.3±0.9	42.79±1.09	40.6±1.4
28-sep-07	21.4±0.5	27.1±0.5	26.0±0.4	25.8±0.5	24.5±0.6
2-may-08	18.6±1.0	25.3±0.7	22.1±0.6	21.4±0.6	22.0±0.8
21-jul-08	26.2±0.9	33.1±1.1	31.6±0.5	30.7±0.6	30.0±0.4

Fecha	Forestal		Zona quemada		Arbustos		Encinar maduro			
	Zona de control		Zona de control		Zona de control	Zona quemada				
<b>Radiación neta</b>										
19-jul-07	721±7	227±2	662±10	209±3	678±3	213.6±1.0	669±6	210.7±1.9	676±15	213±5
4-ago-07	700±6	210.0±1.8	645±11	194±3	654±7	196±2	646±7	194±2	650±13	195±4
28-sep-07	593±4	142.3±1.0	544±7 (492)	130.6±1.7	564±3	135.4±0.7	547±4	131±1.0	545±12	131±3
2-may-08	687±6	206.1±1.8	640±6 (633)	192.0±1.8	666±3	199.8±0.9	662±4	198.6±1.2	651±8	195±2
21-jul-08	684±6	212.0±1.9	626±7 (653)	194±2 (203)	645±4	200.0±1.2	639±4	198.1±1.2	640±6	198±2
<b>Flujo de calor en el suelo</b>										
19-jul-07	83±9		123±6		117±10					
4-ago-07	92±7		126±5		123±7					
28-sep-07	42±10		98±6 (123)		91±11					
2-may-08	71±7		125±6 (134)		123±7					
21-jul-08	74±9		105±7 (101)		102±8					
<b>Flujo de calor sensible</b>										
19-jul-07	218±23	69±7	354±19	112±6	312±24	98±8	337±18	106±6	280±40	88±13
4-ago-07	216±16	65±5	327±13	98±4	299±18	90±5	317±15	95±5	270±30	81±9
28-sep-07	150±30	36±7	390±30 (305)	91±7 (92)	320±40	77±10	380±23	91±6	300±50	72±12
2-may-08	186±20	56±6	365±19 (386)	110±6 (118)	324±17	97±5	349±18	105±5	251±24	75±7
21-jul-08	250±30	78±9	375±25 (427)	116±8 (122)	340±30	105±9	345±25	107±8	290±40	90±12
<b>Flujo de calor latente</b>										
19-jul-07	420±30	159±8	190±30	97±8	250±30	116±7	210±30	105±7	290±60	125±16
4-ago-07	392±23	145±5	192±22	95±6	230±30	107±7	207±22	99±5	280±50	117±12
28-sep-07	400±40	107±8	60±40 (64)	38±8 (25)	150±50	57±9	70±30	40±6	170±70	59±14
2-may-08	430±30	150±7	150±30 (113)	83±7 (51)	220±30	102±6	190±20	94±6	300±40	120±9
21-jul-08	360±40	135±9	150±40 (126)	78±9 (61)	210±40	96±9	200±30	91±8	270±50	109±12

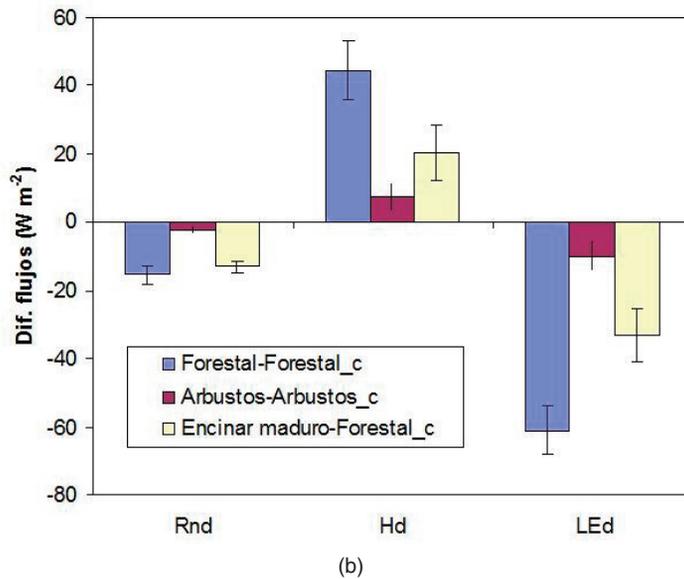
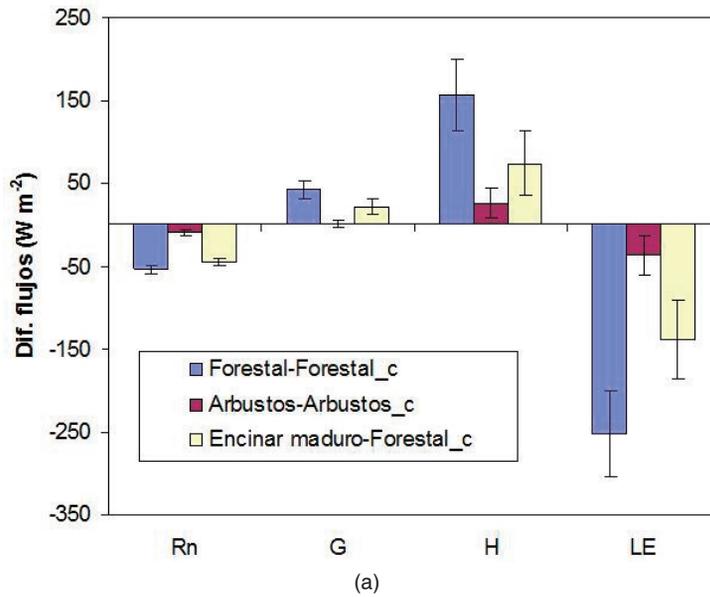
Tabla 1. Valores promedio para cada una de las zonas y las fechas de estudio. En cursiva aparecen los valores diarios, y entre paréntesis las medidas de la estación Bowen



**Figura 5.** Mapas, obtenidos a partir de la imagen L5-TM correspondiente a la fecha 28 Septiembre 2007, de valores instantáneos de: (a)  $P_V$ , (b)  $T_R$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), (c)  $R_n$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), (d)  $G$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), (e)  $H$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) y (f)  $LE$  ( $\text{W m}^{-2}$ ).

rencias significativas en el régimen de flujos, consecuencia de reemplazar el pino por la encina como especie predominante. Por tanto se podría hablar de una reducción irreversible de la evapotranspiración de más de 1 mm/día en la zona afectada por el in-

cendio, incluso muchos años después del mismo. Sería deseable extender este estudio a años venideros y hacer un seguimiento temporal más detallado del régimen de flujos en la zona.



**Figura 6.** Valores promedio de las diferencias entre las zonas quemadas y no quemadas en términos de  $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  y  $LE$ : (a) Flujos instantáneos; (b) Flujos diarios. Las barras de error representan la desviación estándar de los promedios

## CONCLUSIONES

En este trabajo nos hemos centrado en una zona de vegetación natural afectada por un incendio en verano del 2001, situada en la provincia de Cuenca. La zona de estudio ofrece la posibilidad de analizar, empleando imágenes de satélite de alta resolución espacial, el efecto del incendio sobre el régimen de flujos energéticos sobre dos ecosistemas diferentes, una zona de pinar y una zona de monte bajo. Se han elaborado mapas de flujos para cada una de las 5 imágenes Landsat 5-TM disponibles. La validación con datos registrados in situ mediante una estación Bowen (para 3 de las 5 imágenes) determina errores relativos del 7%, 12%, 19% y 21% para  $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  y  $LE$ , respectivamente, a escala instantánea, y del 6%, 3% y 22% para  $R_n$ ,  $H$  y  $LE$ , respectivamente, a escala diaria. Estos resultados están de acuerdo, e incluso mejoran, los obtenidos en recientes validaciones del modelo en distintos tipos de cobertura. Se puede concluir que el efecto del incendio, en esta región, sobre una zona de arbustos es despreciable una vez transcurridos 6 años. En cambio, en una zona arbórea las consecuencias en el régimen de flujos energéticos todavía están muy presentes, con un aumento de los valores de  $H$  por encima de  $150 \text{ W m}^{-2}$  en torno al medio día local, y de  $40 \text{ W m}^{-2}$  a escala diaria, y un descenso en la evapotranspiración real superior a  $250 \text{ W m}^{-2}$  ( $8,8 \text{ mm/día}$ ) al medio día local, y a  $60 \text{ W m}^{-2}$  ( $2,1 \text{ mm/día}$ ) a escala diaria, debidos en gran parte a otros efectos observados del incendio, como el descenso en  $P_v$  de casi un 30%, y el aumento de  $T_R$  en  $6 \text{ °C}$  aproximadamente. La comparación con una zona próxima de encinar maduro nos permite analizar el efecto, sobre el régimen de flujos, de reemplazar el pino por la encina como especie predominante, consecuencia de un proceso de regeneración natural tras un incendio. El resultado más destacado es la reducción en más de  $1 \text{ mm/día}$  que se produciría en términos de evapotranspiración diaria.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto CGL2007-64666/CLI y contrato *Juan de la Cierva* de Juan M. Sánchez), y la JCCM (proyecto ECOFLUX II, Ref: PCC08-0109).

## REFERENCIAS

- AMIRO, B. D., MACPHERSON, J. I., Y DESJARDINS, R. L. 1999. BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96: 199-208.
- DUBAYAH, R. 1992. Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data. *Water Resource Research*, 28: 2469-2484.
- KASISCHKE, E. S., Y STOCKS, B. J. 2000. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer, New York.
- KOUTSIAS, N., Y KARTERIS, M. 2000. Burned areas mapping using logistic regression modelling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 673-687.
- LÓPEZ GARCÍA, M. J., Y CASELLES, V. 1991. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data. *Geocarto International*, 1: 31-37.
- LOZANO, F.J., SUÁREZ-SEOANE, S., KELLY, M., Y DE LUIS, E. 2008. A multi-scale approach for modelling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 112: 708-719.
- NORMAN, J.M., KUSTAS, W.P., Y HUMES, K. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 263-293.
- RUBIO, E., CASELLES, V., COLL, C., VALOR, E., Y SOSPEDRA, F. 2003. Thermal infrared emissivities of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 20(24): 5379-5390.
- SÁNCHEZ, J. M., KUSTAS, W. P., CASELLES, V. Y ANDERSON, M. C. 2008a. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112:1130-1143.
- SÁNCHEZ, J. M., SCAVONE, G., CASELLES, V., VALOR, E., COPERTINO, V. A. Y TELESCA, V. 2008b. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from

- Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351: 58-70.
- SEGUIN, B., E ITIER, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 371-383.
- RANDERSON, J. T., LIU, H., FLANNER, M. G., CHAMBERS, S. D., JIN, Y., HESS, P. G., PFISTER, G., MACK, M. C., TRESEDER, K. K., WELP, L. P., CHAPIN, F. S., HARDEN, J. W., GOULDEN, M. L., LYONS, E., NEFF, J. C., SCHUUR, E. A. G. Y ZENDER, C. S. 2006. The impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming. *Science*, 17: 1130-1132.
- VALOR, E. Y CASELLES, V. 1996. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57:167-184.