

NUEVO SISTEMA DE IMAGEN INFRARROJA PARA DETECCIÓN AUTOMÁTICA Y SEGUIMIENTO DEL FRENTE DE LLAMAS EN INCENDIOS FORESTALES

J.M. Aranda⁽¹⁾, C Hernando⁽²⁾, J. Meléndez⁽¹⁾, M. Guijarro⁽²⁾, A.J. de Castro⁽¹⁾, E. Martínez⁽²⁾, F. López⁽¹⁾ y C. Díez⁽²⁾

(1) Laboratorio de Infrarrojo. (LIR-UC3M). Av. Universidad, 30. 28911 Leganés. jmaranda@fis.uc3m.es

(2) CIFOR-INIA. Carretera de la Coruña km 7. 28040 Madrid. fuego@inia.es

Resumen

La distribución espectral de la radiación infrarroja (IR) emitida por los incendios forestales contiene información clave no explotada por los actuales sistemas IR. Mediante una cámara IR a la que se ha acoplado una rueda de filtros ópticos a longitudes de onda previamente determinadas se han obtenido imágenes biespectrales (en dos bandas del IR medio) de quemas experimentales. A partir de éstas se han obtenido, usando técnicas de procesamiento espectral de imagen, imágenes de *índice de fuego*, que realzan las llamas frente a otros objetos, reduciendo la tasa de falsa alarma, y de *clasificación*, que permiten discriminar las distintas regiones del fuego, resaltando zonas de avance y de re-ignición. Asimismo, se han desarrollado metodologías para medir, a partir de estas imágenes procesadas, la velocidad de propagación y otros parámetros del comportamiento del fuego como son la intensidad y el calor emitido. Estas medidas han sido verificadas con las obtenidas mediante los métodos clásicos.

Palabras clave: Incendio forestal, cámaras infrarrojas, procesamiento de imagen, clasificación, imagen bi-espectral

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de imagen IR poseen dos características que los hacen muy atractivos para la detección y monitorización de incendios forestales: su gran sensibilidad, que permite en principio una alerta más temprana, y la posibilidad de visualizar el avance del frente de fuego a través del humo, muy útil en la fase de extinción. Sin embargo, la propia sensibilidad de los sistemas IR favorece las falsas alarmas, debidas a reflejos solares, puntos calientes en industrias o vehículos, o incluso al suelo calentado por el sol.

La mayor parte de estos sistemas usan una cámara que trabaja en la banda del IR térmico (TIR, λ entre 8 y 12 μm) Sin embargo, la emisión de un incendio se caracteriza por tener una intensa banda de emisión, debida al CO_2 caliente, en la región entre 4,2 y 4,9 μm . Esta banda pertenece al IR medio (MIR, λ entre 3 y 5 μm). Una cámara que opere en esa región y que haga uso de esta información espectral puede optimizar la detección de incendios, eliminando falsas alarmas y midiendo parámetros del fuego que no pueden obtenerse con los métodos convencionales.

En este trabajo se ha construido un prototipo de sistema de imagen IR que proporciona imágenes biespectrales (en dos bandas del IR medio) y se ha propuesto un procesamiento sencillo, susceptible de ser ejecutado en tiempo real, que proporciona un *índice de fuego*. Este índice puede reducir la tasa de falsa alarma, manteniendo a la vez una elevada probabilidad de detección, al resaltar selectivamente las regiones que corresponden a llamas o fuegos incipientes.

Al mismo tiempo, un procesamiento algo más complejo permite (usando la terminología clásica de la teledetección desde satélite) *clasificar* la escena IR del incendio. Esta clasificación posibilita asignar cada píxel a una región determinada de un fuego forestal: frente de llama, llama viva, rescoldo caliente, rescoldo frío, suelo sin quemar, falsa alarma, etc; información que puede resultar de gran interés para la toma de decisiones en la extinción.

El procesado permite estimar parámetros como velocidad de propagación del incendio, temperatura, intensidad, potencia radiada, etc.

MATERIAL Y MÉTODOS

Sistema infrarrojo

Denominamos *imagen biespectral* al conjunto formado por dos imágenes de una misma escena, simultáneas, calibradas radiométricamente, y que corresponden a dos intervalos espectrales diferentes, B1 y B2. En nuestro caso B1 se corresponde con la banda de emisión del CO₂ y B2 con otra región del MIR en la que el CO₂ no emite. Se obtiene una *imagen de índice de fuego* (IF) calculando para cada píxel $IF = (L_{B1} - L_{B2}) / (L_{B1} + L_{B2})$ donde L indica radiancia (W/m²sr) (Briz *et al.*, 2003).

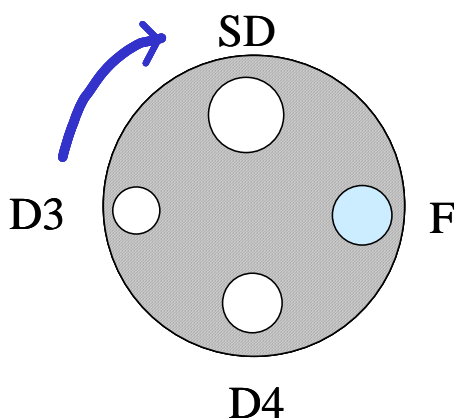


Figura 1.- Esquema de la rueda de filtros. SD = sin diafragma (unos 12 mm de diámetro), D3 = diafragma de 3mm de diámetro, D4 = diafragma de 4 mm de diámetro y F = diafragma de 4 mm de diámetro con filtro paso alto

Las dos bandas pueden obtenerse con dos cámaras o con una sola cámara a la que se dote de resolución espectral con un dispositivo adicional. Esta solución, más sencilla, es la que se ha adoptado en este trabajo. Se ha construido un prototipo de sistema de imagen bi-espectral adaptando una rueda de filtros interferenciales, diseñada y construida específicamente, a una cámara (Amber Radiance 1t) que trabaja en la banda del IR medio (de 3 a 5 μm) y está calibrada radiométricamente. El sistema se completa con hardware y software de adquisición de imagen digital de altas prestaciones. La rueda tiene 4 posiciones (Figura 1) y gira con una frecuencia de 2.95 Hz. La cámara adquiere imágenes a razón de 50 por segundo. La utilización de diafragmas permite evitar la saturación de las imágenes.

El filtro paso alto transmite la radiación con $\lambda > 4.2 \mu\text{m}$. Por tanto, la imagen obtenida con F (Figura 1) proporciona L_{B1} , y se obtiene L_{B2} a partir de las imágenes obtenidas con D3 o D4.

Para obtener las *imágenes de clasificación* se empieza por construir un *dispersograma* a partir de las imágenes en las bandas B1 y B2: para cada píxel, se dibuja un punto que tiene ordenada L_{B1} y abscisa L_{B2} . En el patrón de puntos así formado se distinguen regiones relativamente homogéneas que pueden identificarse con las distintas regiones del incendio (Aranda *et al.*, 2003). Cada píxel es asignado a una de estas regiones por un algoritmo de “máxima verosimilitud”, usado comúnmente en teledetección.

Quemas experimentales

El sistema de imagen se ha probado en dos quemas experimentales, llevadas a cabo en noviembre de 2002 en el término municipal de La Cabrera (norte de la Comunidad de Madrid). En septiembre se había rozado manualmente el matorral en una superficie aproximada de 500 m², delimitándose en la zona desbrozada dos parcelas adyacentes de 10 m x 10 m, en las que se acumuló el matorral de forma continua (Figura 2), de forma que se constituyeron dos parcelas con distinta carga de combustible, una de ellas con un peso de matorral verde doble de la otra. Se realizó un inventario del combustible recogido para determinar las cargas y alturas del matorral en las parcelas. El combustible se clasificó en hojas, elementos de los grupos de 1 hr, 10 hr y 100 hr, y raíces.

Para registrar la variación de las temperaturas en las parcelas durante las quemas, se situaron en cada una de ellas 15 termopares de tipo K, de 1 mm de diámetro, en cinco puntos y tres niveles de medición: sobre el suelo (0 cm), a una altura intermedia de la total del combustible (15 cm en la parcela de carga baja y 25 cm en la de carga alta) y en la superficie del combustible (30 cm en la parcela de carga baja y 50 cm en la de carga alta). Los termopares se conectaron a un registrador de datos Data Taker DT500.



Figura 2.- Vista general de las parcelas



Figura 3.- Inicio de una de las quemas

Las quemas se realizaron a favor del viento y se iniciaron mediante una línea de encendido realizada con una antorcha de goteo (Figura 3), con ayuda de un cebo de acícula seca de *Pinus pinea*. Previamente, se midió la altura del combustible y se tomaron muestras por grupos de tamaño para determinar su humedad. Las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) se anotaron al inicio y al final de las quemas, y durante las mismas se realizaron mediciones puntuales de la velocidad y dirección del viento.

La velocidad de avance del fuego se midió mediante cronómetros y una línea de jalones situados a intervalos de 2 m, en uno de los laterales de las parcelas (Figura 2), anotándose asimismo la altura de las llamas y la evolución del frente de fuego. Después de las quemas, se estimó visualmente la consunción del combustible por grupos de tamaño. La intensidad del fuego fue calculada de acuerdo con la fórmula de Byram (1959), y el poder calorífico, corregido para la humedad del combustible, según la fórmula de Alexander (1982).

Los termopares permitieron definir el régimen térmico producido durante las quemas. A partir de las curvas de registro obtenidas, se han determinado, en cada nivel de medición, la temperatura máxima, la duración de las temperaturas superiores a 300 °C (que refleja la duración de la fase de llamas de la combustión) y el área total bajo las curvas de variación de las temperaturas (que estima la cantidad de energía recibida en los puntos de medición).

La Figura 4 muestra varias fotografías del equipo en el campo. Se utilizó un objetivo de 100 mm, siendo la distancia de observación de unos 350 m. Esta distancia vino definida por las condiciones de observación de la zona en la que se realizó la experiencia. No obstante cabe reseñar que tanto el sistema de medida como el método de clasificación y procesado serían en principio compatibles con distancias de varios km.



Figura 4.- (Izquierda): Prototipo de sistema de imagen bi-espectral, observando el incendio. Se aprecia la cámara IR montada sobre un trípode y, en el suelo, el ordenador que realiza la adquisición de imágenes. (Derecha) Vistas frontal (arriba) y lateral (abajo) de la cámara IR con la rueda de filtros

RESULTADOS

Las Tablas 1, 2 y 3 resumen las características del combustible, condiciones de ejecución de las quemas, parámetros de comportamiento del fuego y régimen térmico registrado.

Parcela	Altura	Carga (kg/m ²)/Humedad del combustible				Raíces
	(cm)	Hojas	1 hr	10 hr	100 hr	
Carga baja	30,6	0,191/26,4	0,307/20,9	0,527/26,6	0,079/25,2	0,066
Carga alta	54,6	0,397/26,5	0,640/22,1	1,098/21,0	0,166/16,9	0,138

Tabla 1. Características iniciales : altura, carga y humedad del combustible según componentes

Parcela	Condiciones de ejecución			Comportamiento del fuego					
	Hora	T ^a	H.R.	Vext	V	A	I _{ll}	I _T	C
Carga baja	13:57	12,5	60	2,0	2,75	2,00	611	884	13327
	14:13	14,5	47						
Carga alta	14:34	14,0	52	2,0	1,22	2,15	566	819	27834
	14:56	15,5	46						

Tabla 2. Condiciones de ejecución (iniciales y finales) y comportamiento del fuego en las quemas. *Notación:* T^a: temperatura del aire, en °C; H.R.: humedad relativa del aire, en %; Vext: velocidad del viento, en m/s; V: velocidad media del fuego, en m/min; A: altura media de las llamas, en m; I_{ll}: intensidad media del fuego en la fase de llamas, en kW/m; I_T: intensidad media del fuego total, en kW/m; C: calor por unidad de área, en kJ/m²

Parcela	Temperatura máxima (°C)			Tiempo con temp.> 300 °C (s)			Area total bajo las curvas (°C.s)		
	0	I	S	0	I	S	0	I	S
	Carga baja	648.3	835.5	624.7	186	250	144	174709	209931
Carga alta	801.5	858.5	780.8	445	337	269	358898	298343	233983

Tabla 3. Características del régimen térmico. *Notación:* 0 = termopares sobre el suelo; I = termopares a una altura intermedia de la total del combustible, S = termopares en la superficie del combustible



Figura 5.- Desarrollo de la quema en la parcela de carga baja



Figura 6.- Desarrollo de la quema en la parcela de carga alta

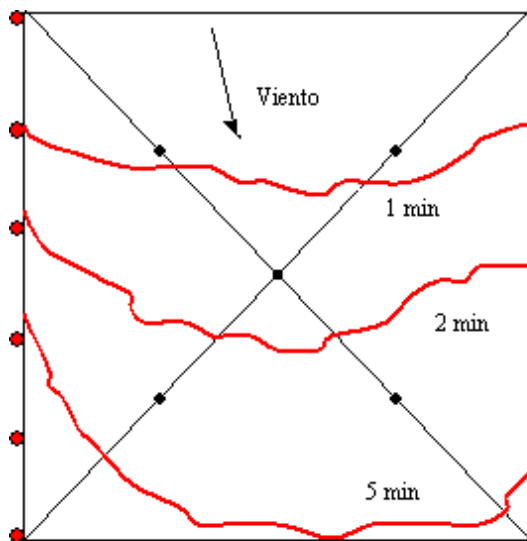


Figura 7.- Evolución del frente de fuego en la quema de la parcela de carga baja
● jalones ● posición de los termopares

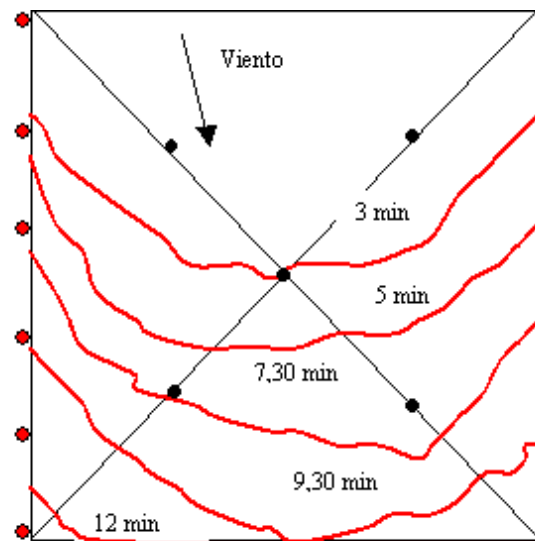


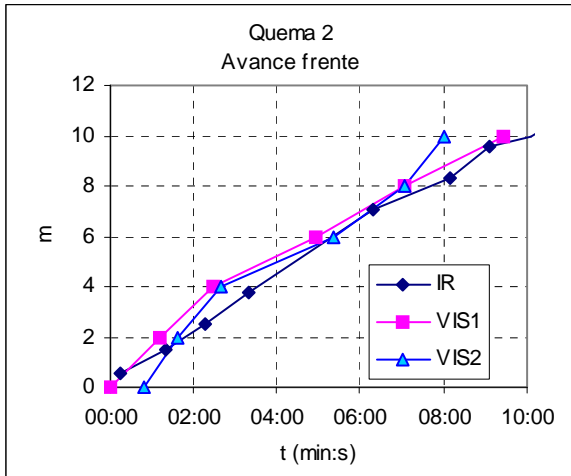
Figura 8.- Evolución del frente de fuego en la quema de la parcela de carga alta
● jalones ● posición de los termopares

Se puede observar (Tabla 2 y Figuras 7 y 8) que la velocidad de avance del fuego en la parcela de carga baja fue más de el doble que la de la carga alta. Este hecho vino determinado por la velocidad del viento que en el primer caso tuvo rachas de hasta 6,4 m/s, mientras que en el segundo tuvo un máximo de 4 m/s. Las temperaturas máximas fueron en las dos quemas elevadas, superando los 600 °C en los tres niveles de medición.

Un primer resultado de las medidas IR es la determinación de la posición del frente de fuego y, consiguientemente, de su avance. La Figura 9 muestra el buen acuerdo entre la determinación visual del avance del frente (por dos observadores distintos a pie de fuego) y los datos infrarrojos.

Como se ha explicado anteriormente, un procesado adicional permite obtener imágenes de índice de fuego y de clasificación. Se muestran dos ejemplos de estos resultados (Figuras 10 y 11), correspondientes a la quema 2, la primera al instante inicial y la segunda al cabo de minuto y medio. Se aprecia que en el instante inicial (Figura 10) sólo hay una clase (amarillo = llama). No hay por eso gran diferencia entre las imágenes MIR y de índice de fuego. Al cabo de minuto y medio ya se distinguen también frente de llama (rojo) y rescoldos (azul). Sus posiciones son coherentes con el sentido de avance de la quema (hacia la izquierda). Se puede apreciar que en la imagen de índice de fuego las llamas están realzadas en comparación con su aspecto en la imagen MIR.

Figura 9: Avance del frente de fuego en la segunda quema, determinado por inspección visual (VIS1, VIS2) y a través de las imágenes IR



El concepto de imágenes de índice de fuego y de clasificación fue desarrollado inicialmente para imágenes biespectrales de incendios forestales obtenidas con un sistema de dos cámaras sincronizadas, operando una en la región MIR y otra en la TIR. La corrección cualitativa de la clasificación y el realce proporcionado por el índice de fuego son resultados dignos de mención porque es la primera vez que se consiguen utilizando una sola cámara y demuestran que procesado funciona aunque se usen imágenes no estrictamente simultáneas. El uso de una sola cámara supone una simplificación y un abaratamiento importantes.

Figura 10.- (Arriba, izquierda): aspecto visible de la segunda quema, segundos después de la ignición (Arriba, derecha): la misma escena en la banda MIR (Abajo, izquierda): imagen de índice de fuego para esa escena (Abajo, derecha): clasificación. En este caso sólo se distingue, aparte del fondo en negro, una clase (llama, en amarillo)

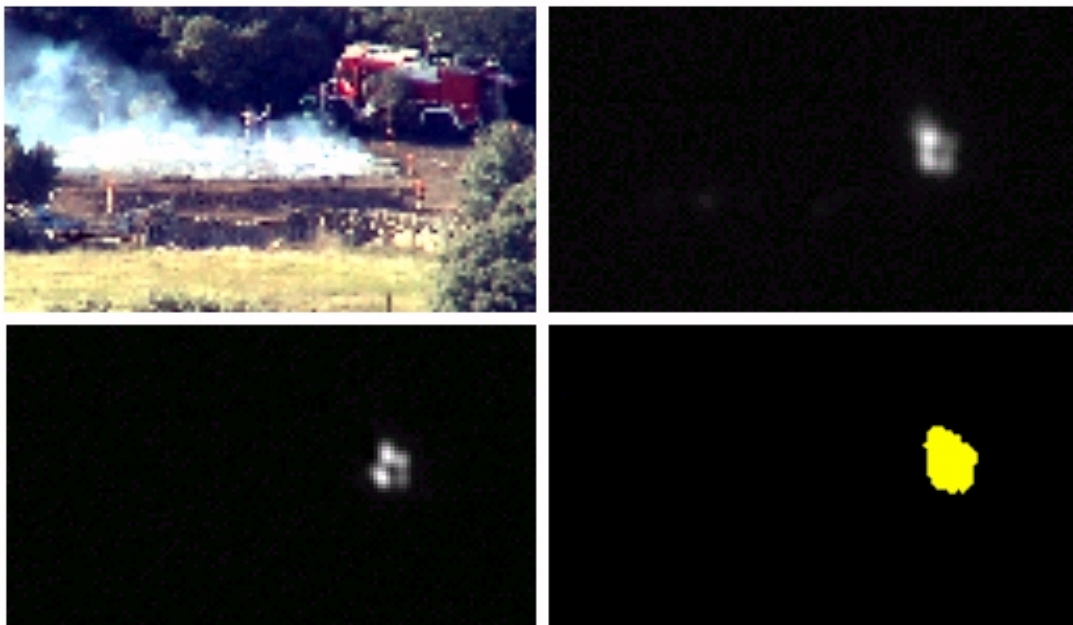


Figura 11.- (Arriba, izquierda): aspecto visible de la segunda quema, minuto y medio después de la ignición (Arriba, derecha): la misma escena en la banda MIR (Abajo, izquierda): imagen de índice de fuego para esa escena (Abajo, derecha): clasificación: llama en amarillo, frente de fuego en rojo, rescoldo en azul



CONCLUSIONES

En este trabajo se han investigado nuevas metodologías de adquisición y nuevos algoritmos de procesado de imagen IR para la lucha contra los incendios forestales. Se ha demostrado que, con una sola cámara IR convencional, modificada mediante la adaptación de una rueda de filtros interferenciales, es posible obtener imágenes de *índice de fuego*, que realzan la presencia de llamas y de *clasificación*, que discriminan las distintas regiones del incendio y permiten resaltar zonas con alto riesgo de re-ignición.

Las imágenes de índice de fuego son susceptibles de obtenerse en tiempo real (segundos) por lo que optimizarían la detección al hacer posible una reducción en la tasa de falsas alarmas. La clasificación, que requeriría un mayor tiempo de procesado (minutos) sería de gran utilidad en labores de extinción que permitiesen mayor información a costa de un mayor tiempo de respuesta.

Además de sus aplicaciones en la lucha contra los incendios forestales, hay que destacar la utilidad de los sistemas de imagen IR en el estudio de los incendios, al proporcionar medidas de sus parámetros físicos con gran resolución espacial y temporal. Además de proporcionar, de manera relativamente directa, medidas de temperaturas de rescoldo y de velocidad de propagación, un sistema biespectral de imagen IR como el ensayado aquí permite estimar parámetros energéticos del incendio, como son la intensidad del frente y el calor liberado por unidad de área.

En efecto, la integral espacial de la radiación medida por la cámara permite, aplicando ciertas correcciones geométricas, medir la potencia radiada por el incendio. En estudios realizados en laboratorio con cámaras MIR y TIR (Aranda *et al.*, 2003) se ha validado este procedimiento comparando sus resultados con los de los métodos clásicos establecidos en la comunidad científica forestal, basados en la realización de inventarios de combustible previos y posteriores al incendio. Se ha encontrado que la fracción radiada es del orden del 20% de la potencia total. Esta proporción puede usarse para estimar, a partir exclusivamente de medidas IR, la potencia del incendio y la intensidad del frente. Las medidas IR, integradas temporalmente, proporcionan también el calor radiado por unidad de área, lo que permite estimar el calor total liberado.

La utilidad de estos resultados se extiende a la lucha los incendios forestales, pues los parámetros energéticos (especialmente la intensidad) son importantes a la hora de diseñar la estrategia de extinción, y no pueden ser estimados de manera fiable con los métodos convencionales.

Hay que reseñar que las imágenes de clasificación son una pieza clave para poder obtener estos parámetros energéticos, dado el diferente comportamiento de la llama (emisor selectivo) y el rescoldo (cuerpo gris), en cuanto a emisión y a absorción atmosférica. El trabajo expuesto aquí, al demostrar la viabilidad de la clasificación en quemas experimentales en campo usando un sistema basado en una sola cámara, es un paso importante para extender estos resultados a incendios reales.

Agradecimientos

El presente estudio ha sido financiado por la Dirección General de Investigación de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, a través del proyecto “Investigación y desarrollo de nuevas técnicas de optimización en sistemas de detección infrarroja para la lucha contra los incendios forestales.

La realización de las quemas ha sido posible gracias al apoyo y colaboración recibidos por parte de la D.G. de Conservación del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente de Madrid, así como del Cuerpo de Bomberos de la D.G de Protección Ciudadana.

BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER M.E., 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany*, 60: 349-357.
- ARANDA J.M., J. MELÉNDEZ, A.J. DE CASTRO & F. LÓPEZ., 2003. Bi-spectral Infrared Forest Fire Detection and Analysis Using Classification Techniques. *Proceedings of the international symposium on optical science and technology (SPIE's 48th annual meeting), San Diego, USA, 2003.SPIE.*
- BRIZ S., DE CASTRO A J, ARANDA J.M., MELÉNDEZ J y F LÓPEZ, 2003. Reduction of false alarm rate in automatic forest fire infrared surveillance systems. *Remote Sensing of the Environment*, 86: 19-29.
- BYRAM G.M.,1959. In BROWN A.A. and DAVIS K.P., 1973, *Forest fire: control and use*. McGraw-Hill Book, New York, (ed.). pp. 155-182.