

Procesado biespectral de imágenes infrarrojas de incendios forestales correlacionadas espacio-temporalmente

J. M. Aranda, J. Meléndez, A. J. de Castro, S. Briz, M. F. Ugarte y F. López

Correo electrónico: jmaranda@fis.uc3m.es

Laboratorio de Teledetección y Sensores Infrarrojo. Dpto. de Física. Universidad Carlos III de Madrid

RESUMEN

El procesamiento espectral de imágenes infrarrojas (IR) en las bandas TIR y MIR aporta información sobre el incendio forestal, relevante para su detección frente a fondos IR altos y para reducir la tasa de falsas alarmas. En este trabajo se presenta la aplicación de técnicas de clasificación a imágenes IR de incendios forestales. Estas técnicas requieren una comparación pixel a pixel entre imágenes de las bandas MIR y TIR, y por tanto exigen que éstas sean corregistradas y simultáneas. Con este objetivo se ha diseñado y puesto a punto una plataforma de adquisición de imágenes IR desde helicóptero y se ha realizado un estudio sobre distintos tipos de fuegos, que ha permitido evaluar experimentalmente las ventajas del procesamiento espectral propuesto.

PALABRAS CLAVE: procesamiento espectral, imagen infrarroja, incendios forestales, termografía infrarroja.

ABSTRACT

The spectral processing of infrared (IR) images in TIR and MIR bands supplies information on forest fire, that is relevant to the detection against high IR backgrounds and to lower the false alarm rate. In this work we present the application of classification techniques to IR images of forest fires. These techniques require a pixel-by-pixel comparison between MIR and TIR images, that therefore must be co-registered and simultaneous. To this end an IR imaging acquisition platform from helicopter has been designed and set up. A study about different kind of fires has been performed permitting an experimental assessment of the advantages of the proposed spectral processing.

KEY WORDS: spectral processing, infrared image, forest fires, infrared thermography.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en sistemas de teledetección de imagen infrarroja (IR) es ampliar el rango y las prestaciones de utilización de sistemas simples, fiables y baratos. La reciente aparición de nuevas generaciones de cámaras IR (Schimert et al, 2000) con aceptable resolución espectral y radiométrica, más simples (sin refrigeración) y muy baratas (precio inferior a los 5000 US\$) puede cambiar radicalmente el actual panorama por otro en el que se utilicen masivamente de este tipo de sensores en muy diferentes aplicaciones.

Los incendios forestales son, debido a las propiedades específicas de la emisión IR de las llamas (Aranda et al, 2001a), una aplicación característica de la teledetección IR. La casi totalidad de los satélites

con sensores en las bandas del IR medio o MIR (3-5 (m) e IR térmico o TIR (8-12 (m) han sido utilizados en diferentes aplicaciones relativas a incendios forestales. Este es el caso de los AVHRR instalados en los satélites NOAA. Otros tipos de sensores IR se aplican a otras tareas (Ugarte et al, 2000): detección temprana desde torres de vigilancia, determinación de zonas calientes durante las tareas de extinción, etc.

La simplificación y abaratamiento de los sensores IR está fomentando nuevas iniciativas en la detección precoz desde satélite. Este es el caso de proyectos europeos actuales (FUEGO, FOCUS, ...) (website) que prevén sensores de dedicación específica a la detección precoz, operando en 4 bandas: visible-VIS, IR próximo-NIR, MIR y TIR, con resoluciones espaciales que varían entre 20 m en VIS hasta 290 m en TIR.

Un grave problema en los sistemas de alarma basados en el IR es la elevada *tasa de falsas alarmas* inducida por el alto nivel del fondo y sus fluctuaciones, causadas a su vez por reflexión solar, emisión directa de fuentes como vehículos, instalaciones industriales, etc.

Uno de los métodos más prometedores para la disminución de la probabilidad de falsa alarma, sin necesidad de aumentar las prestaciones habituales en resolución espacial y temporal, es utilizar procesado espectral. En este trabajo se presenta un estudio basado en imágenes biespectrales TIR y MIR, con alta correlación espacio-temporal, para “clasificar” el escenario IR de un incendio forestal, discriminando con claridad sus diferentes zonas y a éstas del fondo IR.

PLATAFORMA AEROTRANSPORTADA PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MIR, TIR Y VIS

Un elemento determinante en la detección IR de incendios desde satélite es la atmósfera, ópticamente muy activa en el IR. Por este motivo se ha diseñado una plataforma de observación susceptible de ser embarcada en helicóptero (Figura 1) al objeto de poder adquirir imágenes a través de un camino óptico variable.

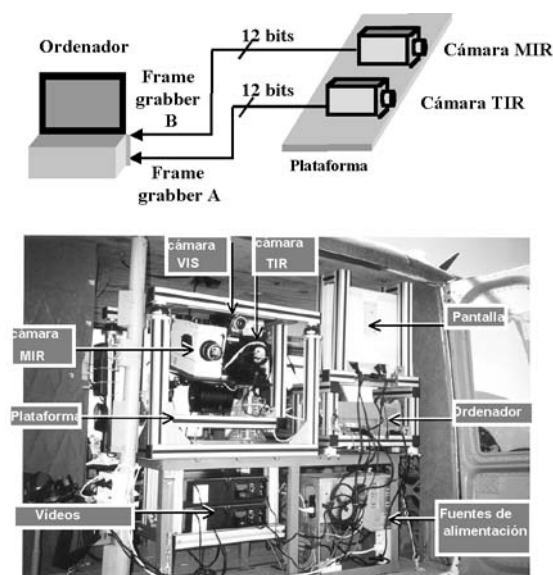


Figura 1. Esquema del sistema de adquisición. Plataforma embarcada en un helicóptero Bell 205.

Con el fin de permitir el procesado de las imágenes en base a un análisis “pixel a pixel”, el sistema de adquisición diseñado garantiza la correlación espacial y temporal en ambas bandas (TIR y MIR) necesaria para una posterior corrección de fenómenos dinámicos como el fuego. Se ha diseñado específicamente para aprovechar el amplio rango dinámico (12 bits) de las cámaras y realizar análisis radiométricos de muy diferentes tipos de fuego.

El núcleo del sistema son dos cámaras IR. La cámara MIR está constituida por un array de plano focal-FPA de 256x256 elementos de InSb. La cámara TIR se basa en un FPA de microbolómetros VO_x de 320x236 elementos. Se ha diseñado un software para adquisición simultánea de imágenes de ambas cámaras con un PC portátil.

La plataforma mantiene alineados los ejes ópticos de ambas cámaras con una precisión superior a 500 (rad). El encuadre de escena se consigue mediante una cámara de visible alineada con las IR. Asimismo se ha diseñado un sistema de amortiguamiento que absorbe las principales vibraciones del helicóptero, evitando su efecto en las imágenes.

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS LLAMAS

Estudios previos (de Castro et al, 1998 y 2000) llevados a cabo mediante instrumentación de alta resolución espectral (espectroscopía IR por transformada de Fourier o FTIR) permiten distinguir una fuerte estructura y dependencia espectrales de la emisión de un fuego forestal típico, en el que se observa la contribución de muy diferentes emisores (gases, sólidos y partículas) al espectro IR (Figura 2). El resultado es un continuo (sólidos) sobre el que aparecen espectros discontinuos de los gases de combustión (CO₂, CO, H₂O, COVs,...), siendo dominante el del CO₂ en torno a 2300 cm⁻¹ (4.35 (μm) donde se concentra una importante parte de la energía radiada por el fuego.

Esta energía va a ser absorbida de manera muy selectiva, siendo la absorción muy notable en la banda MIR y casi inapreciable en la TIR.

Sin embargo, el procedimiento habitual para calibrar las cámaras IR en ambas bandas no tiene en cuenta estos efectos, ya que se realiza asignando una “temperatura de brillo” a un emisor de espectro continuo en ambas bandas (cuerpo negro).

Esta selectividad espectral, tanto en la emisión como en la absorción, puede ser fuente importante de errores si se intenta extrapolar, sin más, datos de la energía emitida por el fuego para estimar la energía recibida por el sensor a grandes distancias; o a

la hora de medir temperaturas en un incendio: las temperaturas de brillo de una llama son siempre más altas en la banda MIR que en la TIR, y ninguna de las dos coincide con la temperatura real (Aranda et al., 2000)

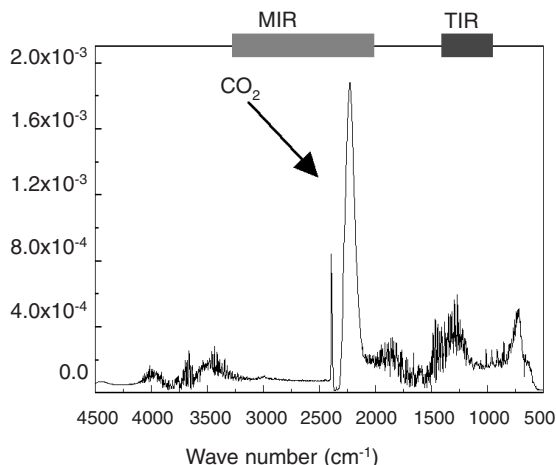


Figura 2. Espectro de emisión de un fuego real.

DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN

La diferencia señalada entre las imágenes TIR y MIR contiene información muy valiosa que puede ser explotada a fin de clasificar la escena en función de los diferentes estados de combustión en un incendio (llama viva, rescoldo, suelo no quemado, etc). Esto resulta de gran interés práctico no sólo en aspectos propios de la teledetección sino también en los de apoyo a la extinción.

A fin de comprobar experimentalmente la potencialidad de este “análisis bicolor”, se procedió al estudio en laboratorio, sobre un quemador de propano y a corta distancia, de una emisión IR de llama “simple”, entendida como tal aquella que presenta una estructura de emisores IR simple: gases producidos a partir de un único combustible y un único sólido caliente en contacto con la llama (base del quemador). Se realizó un diagrama de dispersión o “scatter-plot” (Aranda et al, 2001b) de dicha llama en ambas bandas (Figura 3), donde cada punto corresponde a un pixel de la escena representado por su temperatura TIR en el eje “x” y MIR en el “y”. La recta a trazos (pendiente uno) representaría la emisión de un cuerpo gris con igual temperatura de brillo.

Definimos los algoritmos de clasificación de forma tal que cada clase o *cluster* es el conjunto de

puntos del diagrama que pertenecen a una elipse definida por un centro y los semiejes mayor y menor. El mayor caracteriza al *cluster* por su pendiente: cuanto más próxima se halle a la de la recta de cuerpo gris, mayor componente de sólidos emitiendo habrá. Pendientes alejadas indicarán predominio de emisión IR por gases (llamas puras). El tamaño del semieje menor representa el grado de correlación que el cluster presenta, siendo mayor cuanto menor sea aquél. La aplicación de algoritmos de clasificación (Figura 3) muestra dos tipos de “clusters” o racimos principales caracterizados por elipses con semieje mayor de pendiente más próxima (elipses A y B) y más alejada (C, D, E y F) a la recta a trazos. Dentro de ellas, las elipses propiamente dichas abarcarían zonas más específicas de la imagen que, en el primer caso corresponderían a zonas sólidas más o menos calientes y, en el segundo a zonas en las que el predominio de la emisión se debe a los gases variando cada elipse de la zona más caliente a más fría.

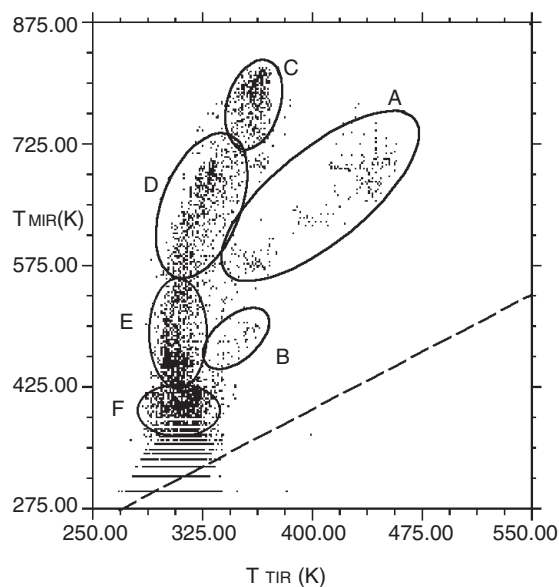


Figura 3. Diagrama de dispersión para una llama de propano.

Las distintas clases se pueden apreciar en falso color sobre la imagen MIR del quemador (Figura 4). A los pocos puntos que no pertenecían a ninguna clase y al solo efecto de visualización, se les ha atribuido de forma arbitraria un color (el de la clase más cercana). Como se puede comprobar del análisis de la figura, la clasificación de las distintas partes de la escena (llama) es casi perfecta, pudiendo distinguirse la estructura del quemador separada de la de la llama y esta a su vez dividida en zonas.

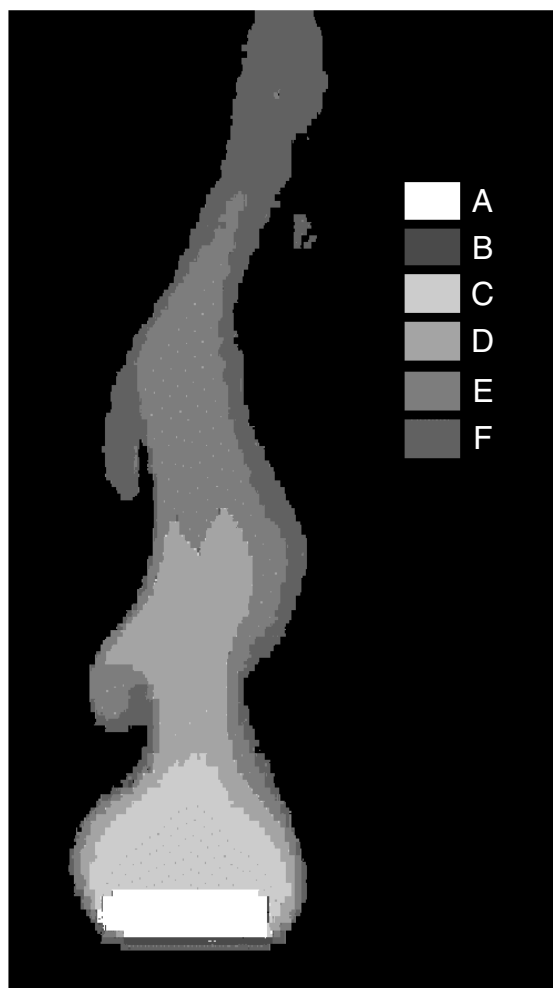


Figura 4. Mapa de clases para una llama de propano, basadas en la Figura 3.

Posteriormente se ha aplicado este procedimiento a fuegos de laboratorio más acordes con los forestales, como fuegos de leña ardiendo sobre una plataforma metálica. El diagrama de dispersión (Figura 5) y la clasificación obtenida (Figura 6) son similares al correspondiente a la llama de propano, lo que muestra la adecuación del procedimiento para la clasificación de llamas. Los *clusters* de alta concentración que se observan en el vértice inferior de la clase E, o en el de la clase F (Figura 3), representan el fondo de la imagen (zona muy fría) y son debidos al tipo de calibración utilizado. Hay que señalar que la zona más caliente de la llama (*cluster* C) tiene una pendiente cercana a 1, indicativa de una importante componente de cuerpo gris, a diferencia de lo que ocurriría con la llama de propano. Esto se debe a que en este caso vemos esa llama contra un fondo de leña muy caliente.

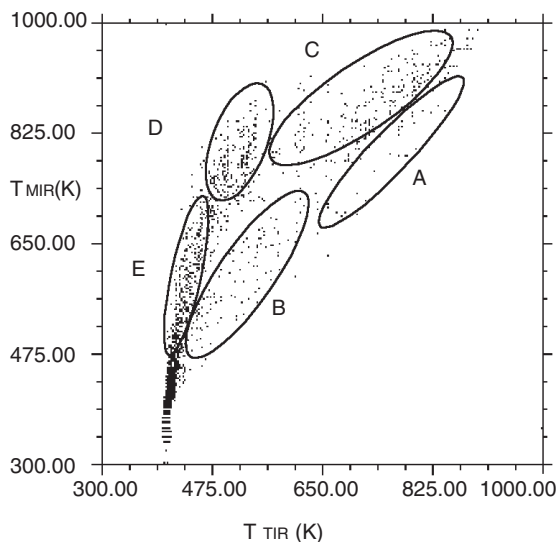


Figura 5. Diagrama de dispersión para un fuego de leña en laboratorio.

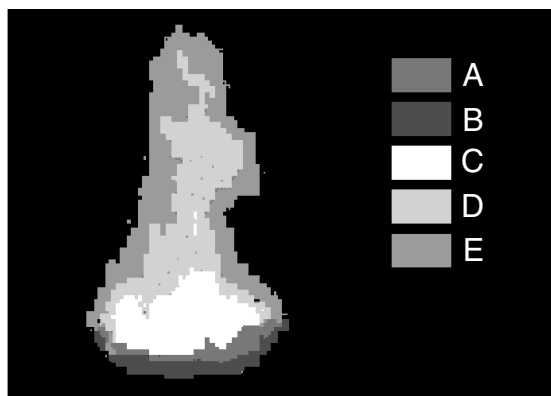


Figura 6. Mapa de clases para un fuego de leña en laboratorio, basadas en la Figura 5.

IMÁGENES DESDE HELICÓPTERO

La mayoría de los trabajos sobre teledetección de incendios desde satélite ignoran los efectos anteriores debidos a la emisión IR de los gases de las llamas (CO_2 y agua), por estimar que la absorción de la atmósfera los hace indistinguibles. No obstante, en sensores de muy alta sensibilidad radiométrica o en aquellos aerotransportados en los que la columna atmosférica es mucho más pequeña, la aplicación del método descrito anteriormente puede aportar importante información.

Los algoritmos de clasificación basados en el análisis pixel a pixel de las imágenes MIR y TIR proporcionan unos resultados muy satisfactorios en caso de clasificar imágenes donde el fuego se observa con baja resolución espacial. Dichos resultados se muestran en el diagrama de dispersión (Figura 7) realizado con las imágenes adquiridas desde un helicóptero a distancia de 1.5 km, para una serie de pequeños conatos de dimensiones entre 0.5 y 5 m. A pesar de que, debido a la distancia de observación, la resolución espacial es baja (del orden de un metro), las imágenes de las dos zonas estudiadas proporcionan una información de gran interés.

Al igual que en los fuegos de laboratorio se distinguen claramente diferentes zonas típicas con pendientes similares. A y B corresponden a sólidos calientes a diferentes temperaturas, mientras que las zonas C, D y E corresponden a llamas. Esta clasificación se puede observar en el mapa de clases aplicado sobre la imagen MIR (Figura 7), obtenido a partir de los algoritmos de clasificación.

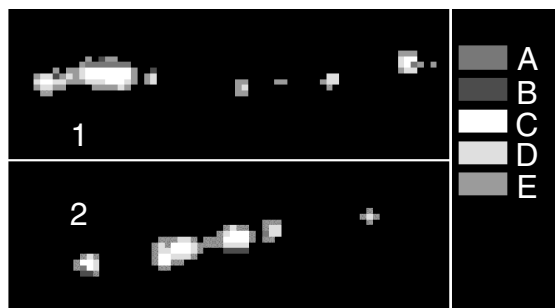
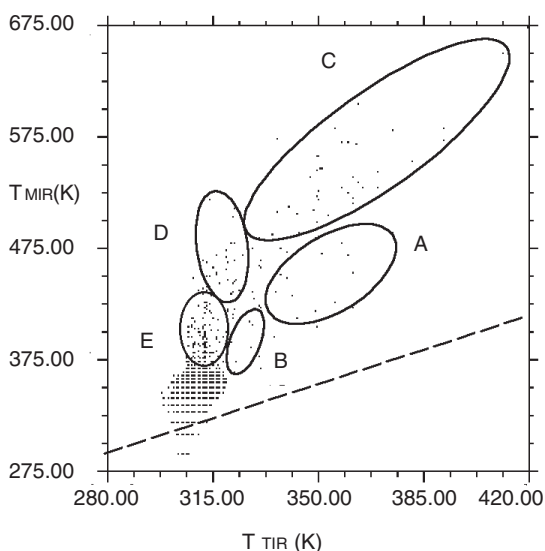


Figura 7. Diagrama de dispersión de la quema prescrita (superior). Mapa de clases para las zonas donde se produce el incendio (inferior).

Es de destacar que las clases E y D, de llamas relativamente puras (poca contribución de cuerpo gris) corresponden a píxeles en el perímetro de las zonas calientes, como es de esperar para el frente de llamas. El *cluster* C, de llama y suelo caliente como en el caso anterior, corresponde a píxeles en el centro de esas zonas calientes. La clase A, de suelo quemado caliente, consta de pocos píxeles porque los incendios no alcanzaron tamaño suficiente para dejar una gran área quemada.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado y puesto a punto un sistema de adquisición de imágenes en las bandas MIR y TIR con alta correlación espacial y temporal, susceptible de ser embarcado en helicóptero. A partir de medidas de laboratorio se ha desarrollado un procedimiento para clasificar un incendio por zonas basado en el análisis espectral a partir de diagramas de dispersión (scatter-plots) de temperaturas TIR-MIR. Este método ha sido extendido con éxito a imágenes adquiridas a distancias medias, desde helicóptero, con muy buenos resultados en la clasificación de las distintas zonas observables en un incendio incluso con baja resolución espacial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el programa "Environment and Climate" de la Unión Europea, DG-XII, Proyecto # ENV4-CT98-0763 "Fuego 2: Fuego instrument design, prototype construction and validation", y por la Comunidad de Madrid, proyecto de investigación nº 07M /0037/2000. Los autores desean agradecer a F. Rodríguez Silva, de la Junta de Andalucía, su trabajo técnico como responsable de los fuegos controlados y a M. González Gabaldón, de FAASA Aviación, su valiosa colaboración en los vuelos de helicóptero.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANDA, J. M., BRIZ, S., MELÉNDEZ, J., DE CASTRO, A. J. y LÓPEZ, F. 2000. Flame analysis by IR thermography and IR hyperspectral imaging. *Proceedings of QUIRT2000 (Quantitative Infrared Thermography)*, in press.
- ARANDA, J.M., BRIZ, S., DE CASTRO, A.J., MELÉNDEZ, J. y LÓPEZ, F. 2001. Spectral characterization of forest fire scenarios. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, SPIE Proceedings, vol 4171, pp. 177-184.

- ARANDA, J. M., MELÉNDEZ, J., DE CASTRO, A.J., y LÓPEZ, F. 2001. Forest fire studies by medium infrared and thermal infrared thermography. *Thermosense XXIII, Orlando (USA)* SPIE Proceedings, vol. 4360, pp. 161-168
- DE CASTRO, A. J., ARANDA, J. M., BRIZ, S., MELÉNDEZ, J., LOPEZ, F., HERNANDO, C., GUIJARRO, M. y DIEZ, C. 1998. Ground-based infrared remote sensing of forest fires. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, SPIE Proceedings vol 3499, 416-426.
- DE CASTRO, A. J., ARANDA, J. M., BRIZ, S. y LOPEZ, F. 1999. Ground-based infrared characterisation of fires in the 3-5 μm spectral window. 19th EAR-SeL Symposium *Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications*.
- SCHIMERT, T. R., BRADY, J. F., ROPSON, S. J., GOOCH, R. W., RITCHEY, B., MCCARDEL, P., SYLLAIOS, A. J., TREGILGAS, J. H., RACHELS, K., WEINSTEIN, M. y WYNN, J. 2000. Low-power uncooled 120x160 a-Si-based micro infrared camera for unattended ground sensor applications *Proceedings SPIE Vol. 4040*, p. 23-30, 23-30.
- UGARTE, M. F., DE CASTRO, A. J., BRIZ, S., ARANDA, J. M. y LÓPEZ, F. 2000. Optimized geometry in infrared arrays for remote sensing of forest fires *Infrared Phys. Technol.* 41: 35-39
- UGARTE, M. F., DE CASTRO, A. J., BRIZ, S., ARANDA, J. M. y LÓPEZ, F. 2000. Automatic and autonomous infrared system for remote sensing of forest fires *Rev. Sci. Instrum.* 71: 3657-3661
- WEBSITE <http://www.insa.es/fuego/fuego.htm>