



4.2

La espectroradiometría de campo como herramienta para el estudio de la severidad del fuego

Raquel Montorio, Fernando Pérez-Cabello, Juan de la Riva Fernández y Alberto García-Martín

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza. montorio@unizar.es

La espectroradiometría de campo como herramienta para el estudio de la severidad del fuego

Raquel Montorio, Fernando Pérez-Cabello, Juan de la Riva Fernández
y Alberto García-Martín

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna, 12, C.P. 50009, Zaragoza.
montorio@unizar.es

RESUMEN

La severidad del fuego puede ser considerada como uno de los factores más influyentes de la dinámica postincendio de las áreas quemadas. La teledetección es una herramienta adecuada para estimar y cartografiar la severidad del fuego ya que es capaz de detectar los cambios en las propiedades espectrales que esta perturbación genera en la vegetación y en el suelo. En este marco general, son pocos los estudios dedicados a los cambios en los valores de reflectividad a escala de detalle a pesar de la utilidad de esta aproximación en la mejora de la capacidad de discriminación de la severidad del fuego. El objetivo de este estudio es detectar los rangos espectrales más sensibles a los diferentes niveles de severidad investigando las relaciones entre las cubiertas superficiales ligadas al proceso de combustión y los datos espectrales. Se ha analizado una colección de 78 muestras de campo recogidas inmediatamente después de dos incendios naturales ocurridos en el verano de 2006 en las localidades de Ibieca y Zuera (Aragón, España). Los datos de campo recogidos fueron: fotografías digitales de alta resolución espacial en el rango visible e información espectral en el rango visible-infrarrojo próximo. Para la obtención de estos datos de campo se utilizó una estructura metálica portátil con un sistema fijo de anclaje al que sujetar los dos dispositivos de captura: la cámara digital y el espectrorradiómetro de campo. A través de un proceso de clasificación supervisada se extrajo de las fotografías digitales la proporción de los diferentes materiales superficiales postincendio en cada una de las muestras de campo. Desde el punto de vista estadístico esta investigación hace uso de un análisis de correlación y un análisis de regresión lineal múltiple por pasos sucesivos aplicado a las siguientes informaciones espectrales: (i) reflectividad (R), (ii) primera derivada de la reflectividad (PDR), (iii) análisis de la profundidad de banda de absorción (PB) y (iv) bandas Landsat-TM simuladas (TM). Los resultados muestran que la R y la PDR son los dos grupos de información espectral más correlacionados con las cubiertas superficiales postincendio mientras que la PB sólo obtiene buenos resultados con las cubiertas de vegetación. Las ecuaciones de regresión derivadas a partir de las informaciones de R y PDR estiman correctamente las cubiertas postincendio representativas de los niveles más elevados de severidad del fuego: ceniza y carbón. La vegetación, que representa el nivel de severidad no quemado, es mejor estimada a partir de las ecuaciones derivadas de la información de PB. La comparación entre los resultados obtenidos a partir de datos hiperespectrales (R, PDR y PB) y multispectrales (TM) muestra, tal como se esperaba, una mayor sensibilidad a las variaciones de las cubiertas por parte de los datos hiperespectrales; sin embargo, considerando la importante reducción en el número de bandas de la información TM, los datos multispectrales son unos estimadores bastante buenos de las cubiertas vegetación y ceniza, dos cubiertas postincendio fundamentales para la evaluación de la severidad del fuego.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de los espacios forestales está fuertemente influenciada por el fuego. La fuerte influencia de la severidad sobre los efectos de los incendios forestales hace que sea comúnmente con-

siderada una variable clave para entender la dinámica ambiental postincendio (Pérez y Moreno, 1998; Miller y Yool, 2002; Chuvieco et al., 2006). En consecuencia, la discriminación de los diferentes niveles de severidad es clave para mejorar la gestión de las áreas quemadas desde el punto de vista de la recuperación natural de la vegetación y de la reducción de la erosión, o para mejorar la diversidad del paisaje (Key y Benson, 2005).

De las diferentes perspectivas que pueden considerarse en el estudio de la severidad del fuego el presente trabajo se centra en aquella que considera los efectos inmediatos del proceso de combustión, es decir, en el estudio de las cubiertas presentes en la superficie de áreas quemadas recientemente. Desde esta perspectiva no se consideran ni las características medioambientales anteriores al fuego ni la capacidad de respuesta del medio.

El objetivo tradicional de muchos de los estudios de severidad del fuego ha sido la discriminación de su variabilidad espacial. La mayoría de ellos han tratado de evaluar esta variable a partir de índices multiespectrales basados en el contraste espectral entre las regiones del infrarrojo próximo e infrarrojo medio (Key y Benson, 2005) o entre el rojo y el infrarrojo próximo (Díaz-Delgado et al., 2003). Aunque se han alcanzado importantes resultados desde esta aproximación estos índices multiespectrales han mostrado algunos problemas, como la dificultad para discriminar niveles de severidad intermedios. Recientes trabajos han enfatizado que, actualmente, el principal reto en el uso de la teledetección para la evaluación de la severidad del fuego es determinar si los datos espectrales son suficientemente sensibles para discriminar realidades específicas o la presencia de materiales superficiales determinados. En este marco, los estudios se centran en las posibilidades de estimar con precisión índices de campo de severidad del fuego como el *Composite Burn Index* (Chuvieco et al., 2006), en desarrollar mapas de cubiertas superficiales postincendio (Kokaly et al., 2007) o en estimar la presencia de cubiertas específicas como la ceniza, el material indicador de la máxima severidad del fuego (Smith et al., 2005). La cada vez mayor disponibilidad de información hiperespectral y el desarrollo de nuevas técnicas como los modelos de transferencia radiativa o las técnicas de tratamiento de datos hiperespectrales ofrecen importantes posibilidades.

Respecto a la escala de trabajo, el objetivo final de los estudios de severidad del fuego es su aplicación a escala regional. Para ello, las imágenes de satélite son la principal fuente de información ya que proveen información continua y cubren una amplia superficie. Sin embargo, los estudios a escala de detalle son un paso previo necesario para establecer la validez de las relaciones empíricas antes de aplicar este conocimiento a escala regional.

Este trabajo se enmarca dentro de esta reciente línea de investigación que centra su estudio en las cubiertas superficiales postincendio, en una escala de detalle y aplicando una metodología que combina la aplicación de dos técnicas de teledetección: la espectroradiometría de campo y la fotografía digital de alta resolución espacial (FDARE), esta última descrita ya en un capítulo anterior de esta misma publicación. Los objetivos de esta investigación son, por un lado, detectar los rangos espectrales o longitudes de onda más sensibles a los materiales superficiales postincendio investigando las relaciones entre su presencia superficial y diferentes conjuntos de información espectral. Por otro lado, se pretende contrastar las diferentes capacidades de los datos hiperespectrales y multiespectrales para discriminar entre materiales superficiales postincendio.

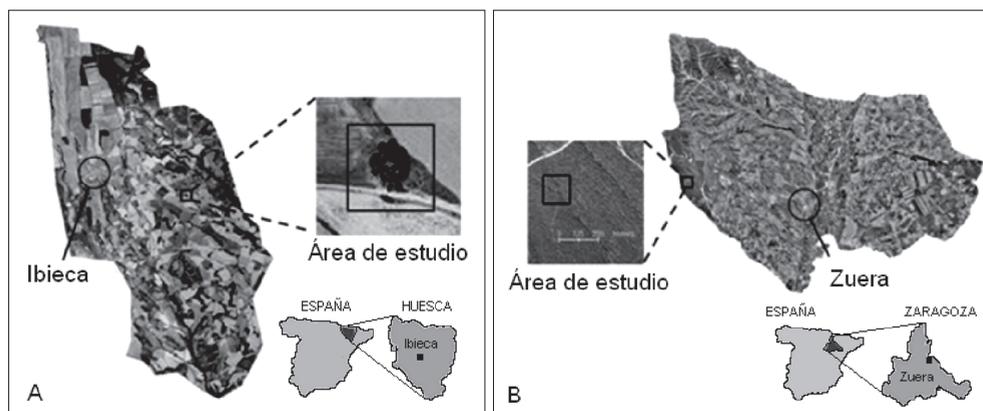


Figura 1. Área de estudio. A: localización del fuego ocurrido en el municipio de Ibieca (Huesca) el 14 de junio de 2006; B: localización del fuego ocurrido en el municipio de Zuera (Zaragoza) el 25 de julio de 2006.

ÁREA DE ESTUDIO

Esta investigación se desarrolla en dos incendios naturales ocurridos en España durante el verano de 2006. El primer fuego tuvo lugar en el municipio de Ibieca (Huesca, Aragón) el 14 de junio de 2006. El fuego, causado por la chispa de una cosechadora, se inició a las 14:30 h y quedó extinguido en las primeras horas de la madrugada. Las llamas se extendieron con mucha rapidez debido a las altas temperaturas, la baja humedad del suelo y el fuerte viento, quemando 300 ha de cultivos y 200 ha de bosque y matorral. El segundo fuego se produjo en el municipio de Zuera (Zaragoza, Aragón) el 25 de julio de 2006. Se inició a las 13 h por un rayo y fue controlado en unas pocas horas tras quemar 40 ha de bosque de pinos (Figura 1).

METODOLOGÍA

Diseño experimental

En cada uno de los puntos muestrales se aplicaron dos técnicas de captura de información: fotografía digital de alta resolución espacial (FDARE) que proporcionó fotografías en el rango del visible (VIS) y espectro-radiometría de campo que proporcionó información de reflectividad en el rango espectral visible-infrarrojo próximo (VIS-NIR). Para la obtención de ambas informaciones se utilizó una estructura metálica portátil de dimensiones 0,7 × 0,7 × 1,5 m con un sistema fijo en la parte superior que permitía anclar la cámara digital y el visor del espectrorradiómetro de forma que se aseguraba que ambos dispositivos registraban la misma superficie (Figura 2). Esta estructura fue desplazada por las áreas quemadas de los dos incendios recogiendo un total de 21 muestras en el incendio de Ibieca y de 57 muestras en el incendio de Zuera.

Obtención de las fotografías verticales y cuantificación de las cubiertas superficiales postincendio

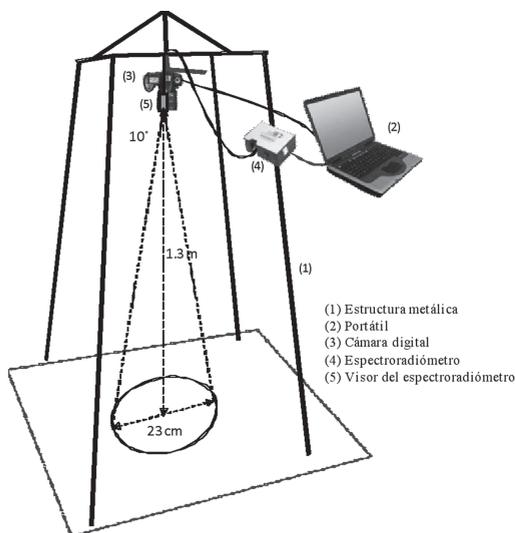


Figura 2. Diseño experimental.

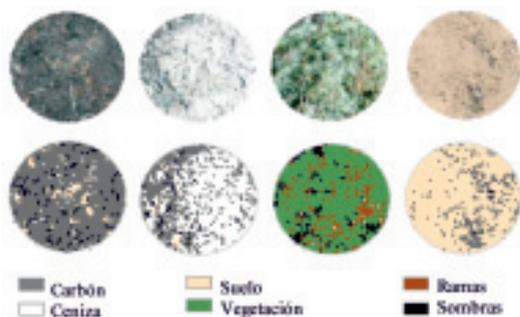


Figura 3. Ejemplo de proceso de clasificación supervisada de los puntos muestrales.

Las fotografías de alta resolución espacial se adquirieron situando la cámara digital anclada a la estructura metálica en posición vertical. Todo el sistema fue controlado a distancia desde un ordenador portátil. En laboratorio cada una de las fotografías individuales fue recortada manteniendo sólo el área circular que corresponde exactamente con la superficie para la que el espectrorradiómetro registra información de reflectividad. El mosaico final de fotografías fue sometido a un proceso de clasificación supervisada usando el método de asignación de máxima probabilidad. En este proceso de clasificación se identificaron las principales cubiertas superficiales ligadas al proceso de combustión: (1) ceniza, donde el combustible ha alcanzado la combustión completa; (2) carbón, donde todavía permanece combustible sin consumir; (3) vegetación quemada, vegetación parcialmente quemada que ha sobrevivido al fuego; (4) suelo quemado, suelo con propiedades modificadas por el fuego y, finalmente, los dos componentes no afectados por el fuego: (5) suelo y (6) vegetación no quemada (Figura 3).

Obtención de información espectral

Campañas de campo

Inmediatamente después de la captura de las fotografías de alta resolución espacial se realizaron medidas de reflectividad de los puntos de muestreo. Para ello se utilizó el espectrorradiómetro de campo Ocean Optics USB2000 que recoge información en el rango 400-950 nm con una resolución espectral de 1,5 nm y un intervalo de muestreo de 0,3 nm. Inmediatamente antes de cada observación de la superficie se realizaron medidas de un panel de referencia Spectralon de reflectividad máxima (Labsphere, Inc.). Estas medidas fueron usadas por el espectrorradió-

metro para proporcionar directamente la medida de reflectividad mediante una ratio entre el espectro de la superficie objetivo y el de la superficie de referencia. Las mediciones de las superficies objetivo y referencia fueron tomadas promediando 20 espectros para cada medida, con un tiempo de integración de 25 ms y con corrección de la corriente oscura. Con posterioridad, en laboratorio, se aplicó un filtro Savitzky-Golay para suavizar la señal registrada y eliminar el posible ruido todavía presente en las firmas espectrales (Savitzky y Golay, 1964).

La estructura metálica utilizada para recoger información en campo aseguraba la geometría fija entre el sensor, el panel de referencia y las superficies objetivo (Milton, 1987). Al mismo tiempo, la estructura garantizó que el sensor se encontrara siempre a una altura adecuada y constante sobre la superficie y posicionado sobre el nadir. En este diseño experimental se utilizó una fibra óptica con campo de visión limitado a 10° y situada a 1.3 m sobre el suelo, cubriendo así un área de 12 cm de radio correspondiente al sector central de los puntos muestrales, alejado de las posibles sombras provocadas por la estructura (Figura 2). Con el objetivo de no interferir en la señal capturada por el sensor las medidas fueron realizadas en áreas con un entorno claro y los operarios, gracias al control remoto del espectrorradiómetro, se mantuvieron a distancia de las superficies objetivo.

Las campañas de campo se realizaron en días con condiciones atmosféricas adecuadas –cielos despejados sin bruma– para obtener la mejor ratio señal/ruido posible y minimizar el efecto de la radiación difusa procedente de la atmósfera. Del mismo modo, las mediciones fueron restringidas a un periodo entre dos horas antes y después del máximo solar, evitando así problemas relacionados con la variación de la radiancia incidente.

Todas estas consideraciones técnicas fueron reproducidas exactamente en las dos áreas quemadas para asegurar la homogeneidad entre las medidas de ambos incendios y permitir así la generación de una única base de datos de 78 puntos.

Generación de información espectral derivada

El trabajo de campo proporcionó directamente medidas de reflectividad (R) en las longitudes de onda de los rangos VIS y NIR. Con la aplicación de distintas técnicas se obtuvo información derivada con potencial para mostrar nuevas relaciones o más sensibilidad a las variaciones en los porcentajes de ocupación de las diferentes cubiertas superficiales postincendio.

Primera derivada de la reflectividad (PDR)

La transformación primera derivada de la reflectividad (PDR) calcula la pendiente de los valores de reflectividad y puede ser definida como la ratio de cambio de la reflectividad para una distancia espectral específica a lo largo de las diferentes longitudes de onda consideradas (Dawson y Curran, 1998).

$$PDR_{\lambda_0} = (R_{\lambda_{j+1}} - R_{\lambda_0}) / (\lambda_{j+1} - \lambda_0) \quad [1]$$

donde PDR_{λ_0} es la primera derivada de la reflectividad en la longitud de onda λ_0 ; R es el valor de reflectividad, (j) y (j+1) son las longitudes de onda consecutivas.

La PDR enfatiza las longitudes de onda donde la curva espectral tiene cambios bruscos en su forma, especialmente relacionados con rasgos de absorción. La sensibilidad de la PDR para detec-

tar cambios en las propiedades de la vegetación es especialmente adecuada en el marco de estudio de los incendios forestales puesto que la vegetación experimenta los mayores cambios durante estos eventos. Es también especialmente importante para estudios de severidad del fuego porque la magnitud de estos cambios permite establecer los niveles de severidad del fuego.

Absorción diferencial frente a la tendencia o Continuum Removal (CR)

El continuo es una función matemática utilizada para aislar los rasgos de absorción. La eliminación del continuo implica la eliminación de la señal no relacionada con estos rasgos. Esta técnica normaliza los espectros de reflectividad para permitir la comparación de los rasgos de absorción individuales (Kokaly y Clark, 1999).

$$R'_{(\rho,\lambda)} = R_{(\rho,\lambda)} / R_{c(\rho,\lambda)} \quad [2]$$

donde $R'_{(\rho,\lambda)}$ es la absorción diferencial en cada longitud de onda, $R_{(\rho,\lambda)}$ es la reflectividad original, $R_{c(\rho,\lambda)}$ es la reflectividad del continuo.

En esta investigación la técnica CR fue aplicada a rasgos de absorción específicos, en lugar de a todo el espectro de reflectividad (Clark y Roush, 1984). La literatura existente sobre la aplicación de la técnica CR a estudios de vegetación ha demostrado la presencia de dos rasgos de absorción dentro del rango espectral disponible en este estudio. Estos dos rasgos de absorción están asociados con el pigmento de la clorofila, que absorbe radiancia en las regiones del azul y el rojo. Dado que la visualización de las curvas espectrales de las restantes cubiertas postincendio no muestra ningún otro rasgo de absorción sólo los dos rasgos de la vegetación fueron considerados en estudio. La localización exacta de estos rasgos se realizó por visualización de las curvas de reflectividad de los puntos muestrales de vegetación. Los límites de los rasgos de absorción utilizados en este estudio son definidos en la tabla 1.

Tabla 1. Localización de los rasgos de absorción.

Denominación del rango de absorción (nm)	Longitud de onda inicial (nm)	Dentro (nm)	Longitud de onda final (nm)
495	400,25	495,34	550,12
680	556,55	679,18	740,92

La aplicación de la técnica CR a rasgos de absorción específicos permite el cálculo de índices derivados. A partir de los espectros de reflectividad con el continuo eliminado se obtuvo la profundidad de banda (PB) de cada longitud de onda del rasgo de absorción (Mutanga y Skidmore, 2004).

$$PB = 1 - R' \quad [3]$$

Equivalencia con datos de satélite multiespectrales

En un intento de evaluar la sensibilidad de los sensores multiespectrales a bordo de plataformas satelitales para estimar la presencia de las cubiertas superficiales postincendio se calculó la equivalen-

cia de los espectros de reflectividad original con las bandas del satélite Landsat-TM. Este satélite fue seleccionado por ser uno de los comúnmente empleados en la evaluación de las áreas quemadas.

El rango espectral de la reflectividad original permitió obtener la equivalencia con las primeras cuatro bandas del satélite Landsat:

$$\rho_{Ba} = \frac{\sum_{i=m}^{i=n} (\rho_i * RSR_i)}{\sum_{i=m}^{i=n} RSR_i} \quad [4]$$

donde ρ_{Ba} es el valor de reflectividad de la banda a , m y n son los límites del rango espectral de la banda a , ρ_i es la reflectividad en la longitud de onda i , y RSR_i es la respuesta espectral relativa en la longitud de onda i .

Para que el cálculo de la equivalencia tuviera la máxima precisión se tuvieron en cuenta las características específicas del sensor Landsat-TM.

Análisis estadístico

El primer análisis estadístico aplicado a los datos ha sido un análisis de correlación entre los diferentes grupos de información espectral (R, PDR, PB y TM) y los porcentajes de ocupación de las diferentes cubiertas postincendio. Los resultados de este análisis de correlación permiten identificar, para cada grupo de información espectral, los rangos espectrales más sensibles a los cambios en la presencia superficial de estas cubiertas. Este análisis podría ser considerado un estudio preliminar que permite avanzar las posibilidades de cada conjunto de información espectral para estimar estas cubiertas.

A continuación, la información espectral seleccionada fue analizada por medio de un análisis de regresión lineal de pasos sucesivos (*Stepwise Multiple Linear Regression*, SMLR) en un intento de establecer ecuaciones de regresión que estimaran las cubiertas postincendio. El análisis de regresión fue aplicado por separado para cada grupo de información espectral y para cada cubierta superficial.

RESULTADOS

Características espectrales de los productos de combustión

La figura 4 muestra las características espectrales de cada uno de los productos de combustión. Las características espectrales de las dos cubiertas superficiales postincendio no afectadas por el fuego permiten el estudio de los dos principales componentes prefuego que actúan como combustible: vegetación y suelo. Estos dos componentes tienen un comportamiento espectral muy diferente. Las muestras de vegetación muestran la tradicional firma espectral de esta cubierta con bajos valores en el VIS con un máximo relativo en el verde y altos valores de reflectividad en el NIR. Dos rasgos de absorción son claramente visibles en su firma espectral, ambos determinados por la absorción de la clorofila. La PDR enfatiza también estas dos regiones en las que se producen los cambios en el perfil de reflectividad. El suelo presenta un perfil espectral sin rasgos destacables y con valores de reflectividad progresivamente más elevados. No muestra rasgos de absorción o importantes variaciones en los valores de PDR.

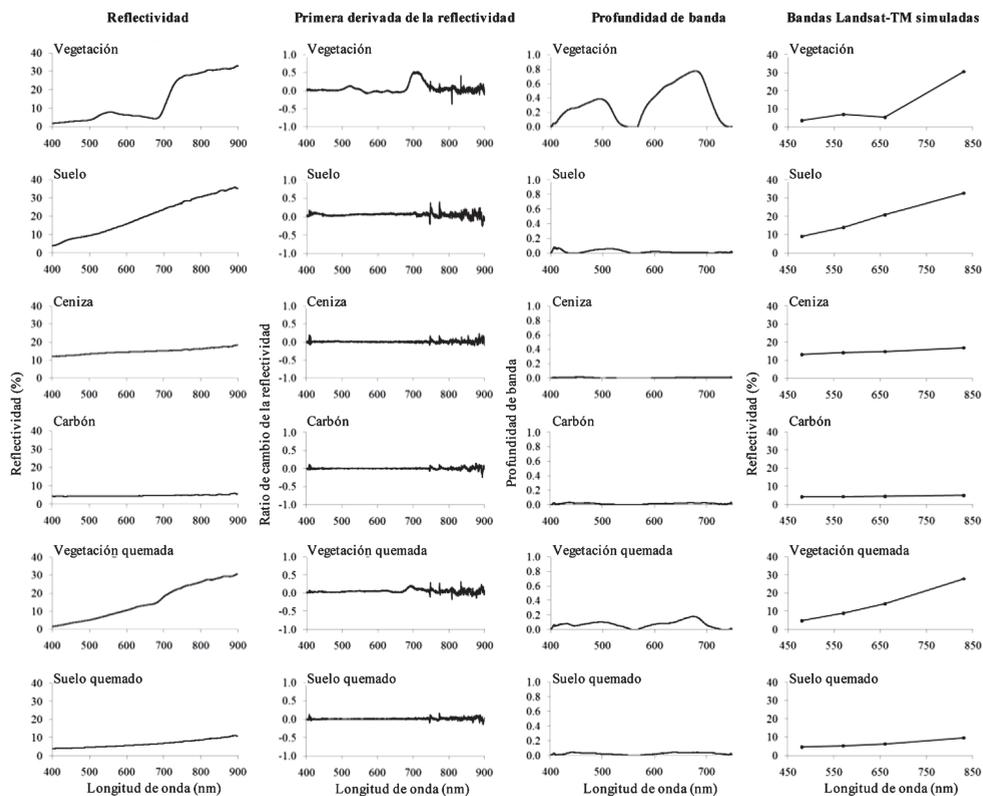


Figura 4. Firma espectral de las cubiertas superficiales postincendio para los cuatro conjuntos de información espectral: (a) reflectividad, (b) primera derivada de la reflectividad, (c) profundidad de los rasgos de absorción y (d) bandas Landsat-TM simuladas.

La reflectividad de los productos de combustión contrasta fuertemente con la de los materiales prefuego. El carbón tiene una reflectividad espectral muy baja (alrededor del 5% en todo el espectro) y su firma es espectralmente plana, en el sentido de no mostrar rasgos de absorción. La ceniza exhibe una reflectividad considerablemente mayor, alrededor del 15% en todo el rango espectral. Como indican otros autores (Smith *et al.*, 2005), la reflectividad de la ceniza incrementa de forma lineal alrededor de un 10-20% en todo el espectro. Al igual que el carbón la ceniza no muestra ni cambios en su perfil de reflectividad ni rasgos de absorción. Los espectros de vegetación quemada difieren significativamente de los perfiles de vegetación. El fuego provoca la desaparición de los rasgos de absorción asociados a la clorofila y, por tanto, la pérdida de contraste entre las regiones VIS y NIR, resultando en un perfil más similar al del suelo. El rasgo de absorción centrado en los 495 nm desaparece completamente y el centrado en 680 nm se mantiene todavía visible aunque con valores considerablemente menores. El suelo quemado tiene un perfil espectral intermedio entre los de ceniza/carbón y suelo con la firma espectral propia de la cubierta suelo pero los valores de reflectividad propios de las cubiertas carbón y ceniza. Como todas ellas, no muestra rasgos de absorción.

Correlación entre las variables espectrales y los porcentajes de ocupación de las cubiertas superficiales postincendio

Las correlaciones entre los porcentajes de las cubiertas superficiales postincendio y los diferentes conjuntos de información espectral se presentan en los correlogramas de la figura 5. La tabla 2 resume los resultados de este análisis de correlación.

Correlación con los valores de reflectividad

La fuerza de la correlación en la cubierta ceniza decrece con la longitud de onda, siendo positiva en todo el rango. Este decrecimiento es moderado hasta la región del *red edge*, punto a partir del cual se observa una marcada caída en los valores del coeficiente de correlación e incluso un cambio en la significación de la correlación ($p < 0.05$), mostrando valores no significativos en la región del NIR. El correlograma del carbón muestra la tendencia opuesta: la fuerza de la correlación incrementa con la longitud de onda con valores de correlación negativos. Los valores son significativos desde la mitad de la región del azul aunque los valores más elevados aparecen en el NIR. La vege-

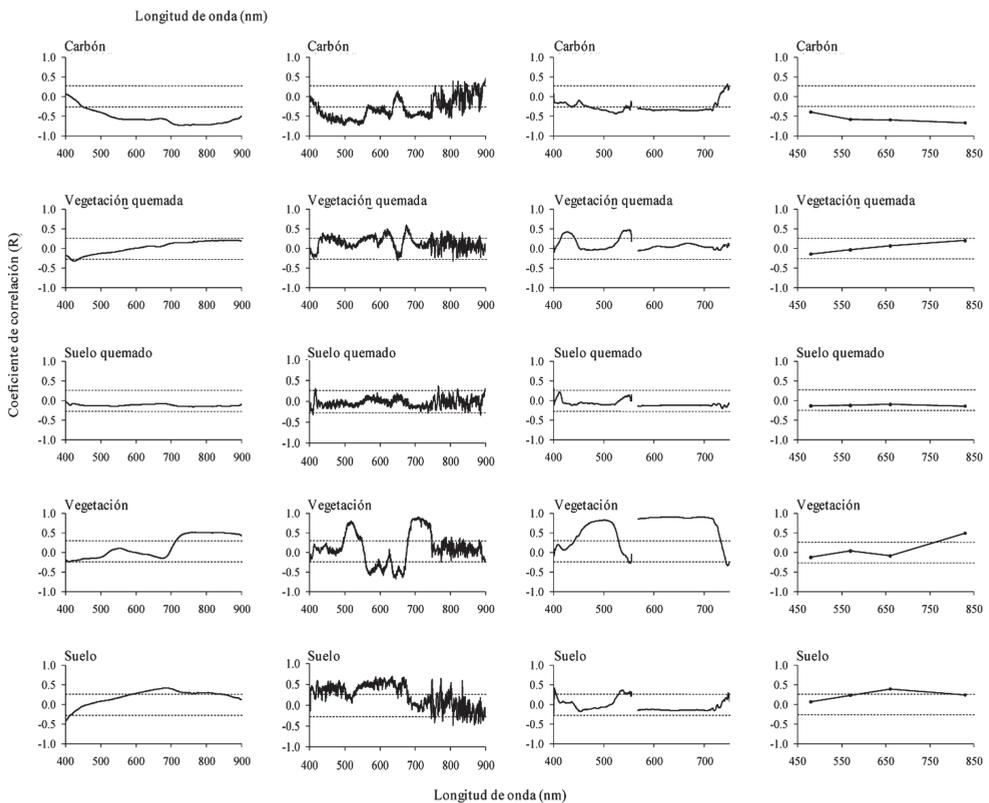


Figura 5. Correlogramas de cada una de las cubiertas superficiales para los cuatro conjuntos de información espectral - R, PDR, PB y TM -.

Tabla 2. Resumen del análisis de correlación.

Cubierta superficial postfuego	Reflectividad (R)			Primera derivada de la reflectividad (PDR)		
	Coeficiente de correlación más elevado			Coeficiente de correlación más elevado		
	Rango significativo (nm)	Longitud de onda	Valor de R	Rango significativo (nm)	Longitud de onda	Valor de R
Ceniza	400-680	415,90	0,85	-	402,11	0,75
Carbón	440-900	752,84	-0,73	420-640/670-750	498,61	-0,74
Veg. quemada	-	-	-	600-630/660-690	674,56	0,60
Suelo quemado	-	-	-	-	-	-
Vegetación	710-900	759,11	0,51	500-750	709,15	0,90
Suelo	400-420/580-840	400,25	-0,42	400-680	635,67	0,70

Cubierta superficial postfuego	Profundidad de banda (PB)			Bandas Landsat-TM simuladas (TM)		
	Coeficiente de correlación más elevado			Coeficiente de correlación más elevado		
	Rango significativo (nm)	Longitud de onda	Valor de R	Rango significativo (nm)	Longitud de onda	Valor de R
Ceniza	-	-	-	TM 1, 2, 3	TM 1	0,70
Carbón	460-710	523,93	-0,44	TM 1, 2, 3, 4	TM 4	-0,67
Veg. quemada	410-450/530-560	551,55	0,48	-	-	-
Suelo quemado	-	-	-	-	-	-
Vegetación	440-530/570-730	637,06	0,91	TM 4	TM 4	0,50
Suelo	-	-	-	TM 3	TM 3	0,40

tación quemada y el suelo quemado no muestran correlación significativa en todo el rango. Los coeficientes de correlación para la cubierta vegetación reproducen la firma espectral de reflectividad de esta cubierta. La región del NIR es la única que registra valores significativos alojando la longitud de onda con la mayor sensibilidad. El suelo muestra un pequeño rango de longitudes de onda con correlaciones significativas de signo negativo en las primeras bandas del azul. A partir de allí, la correlación sólo vuelve a ser significativa a partir del rojo y hasta el NIR.

Correlación con los valores de primera derivada de la reflectividad

El análisis de correlación entre la PDR y la ceniza no muestra rangos claros con valores de correlación significativos y elevados aunque sí pueden observarse bandas aisladas con coeficientes de correlación elevados. La PDR está altamente correlacionada con el carbón en prácticamente todo el rango desde la mitad del azul hasta el NIR. Con la cubierta suelo quemado no se observa correlación significativa en todo el rango y algo similar ocurre con la vegetación quemada aunque en ella se pueden destacar dos estrechos rangos al principio y al final de la región del rojo. La PDR tiene correlación fuerte y significativa con la cubierta vegetación en el rango 500-

750 nm pudiendo distinguirse dos comportamientos diferentes: (1) entre 500-550 nm y 675-750 nm, donde la correlación es de signo positivo, y (2) entre 550-675 nm, donde el signo es negativo. Finalmente, los cambios en el porcentaje de ocupación del suelo están significativamente correlacionados con la PDR en la región del visible aunque con valores bastante bajos.

Correlación con los valores de profundidad de banda

La PB sólo muestra valores de correlación fuertes cuando está correlacionada con la cubierta vegetal. En dos rangos espectrales (440-530 nm y 570-730 nm) presenta coeficientes de correlación bastante altos de signo positivo. La vegetación quemada muestra una correlación considerablemente menor con la PB, reduciéndose los valores y la anchura de los rangos sensibles (410-450 nm y 530-560 nm). La PB no muestra rangos que puedan ser considerados sensibles a las variaciones en los porcentajes de ocupación superficial de las cubiertas ceniza, suelo y suelo quemado. Sí que muestra valores significativos, aunque bajos, con el carbón desde la mitad del rojo hasta el NIR.

Correlación con las bandas Landsat-TM simuladas

Los valores de correlación obtenidos entre las bandas Landsat-TM simuladas y las cubiertas postincendio reproducen los resultados mostrados previamente por el análisis de correlación hecho con valores de R pero resumiendo los rangos espectrales previos en bandas individuales. Las cuatro bandas TM están correlacionadas con las variaciones de la cubierta carbón creciendo la fuerza de la correlación a la vez que la longitud de onda. De forma opuesta, la fuerza de la correlación decrece con la longitud de onda en la cubierta ceniza, siendo significativa la correlación sólo de las bandas del VIS. Las bandas TM simuladas no son sensibles a los cambios en la vegetación quemada o suelo quemado. La banda TM correspondiente al NIR está fuertemente correlacionada con el porcentaje de variación de la vegetación y el suelo sólo muestra correlación significativa aunque con valor muy bajo en la banda del rojo.

Uso de los modelos de regresión para estimar las cubiertas superficiales postincendio

Siguiendo al estudio de la sensibilidad de las diferentes longitudes de onda de los grupos de información espectral a las variaciones en la ocupación superficial de las cubiertas postincendio, la regresión lineal por pasos sucesivos fue usada para establecer ecuaciones de regresión.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis de correlación previos algunas informaciones espectrales y algunas cubiertas pueden ser excluidas de este análisis porque se conoce que los modelos de regresión obtenidos no serán estadísticamente significativos. De este modo, se desarrollaron cuatro experimentos: (1) con valores de R, (2) con valores de PDR, (3) con valores de PB y (4) con valores de TM. En los experimentos 1 y 4 se excluyeron las cubiertas vegetación quemada y suelo quemado, en el experimento 2 se excluyó el suelo quemado y en el experimento 3 se excluyeron las cubiertas ceniza, suelo quemado y suelo.

Del número total de modelos desarrollados en cada análisis de regresión la selección del modelo final fue hecha considerando los umbrales generales de estadísticos de colinealidad: tolerancia y factor de inflación de la varianza. A partir de las regresiones consideradas válidas de acuerdo con

Tabla 3. Resumen de resultados del análisis de regresión: coeficientes de determinación y error estándar de las estimaciones.

Cubierta superficial postfuego	Reflectividad (R)		Primera derivada de la reflectividad (PDR)		Profundidad de banda (PB)		Bandas Landsat-TM simuladas (TM)	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Ceniza	0,729 (2)	13,799	0,745 (2)	13,383	-	-	0,771 (2)	12,676
Carbón	0,524 (1)	22,101	0,623 (2)	19,665	0,308 (2)	26,647	0,465 (2)	23,436
Veg. quemada	-	-	0,418 (2)	12,956	0,326 (2)	13,939	-	-
Vegetación	0,780 (2)	11,635	0,813 (2)	10,711	0,827 (1)	10,302	0,553 (2)	16,580
Suelo	0,469 (2)	24,398	0,569 (2)	21,981	-	-	0,144 (1)	30,973

(entre paréntesis el número de bandas seleccionadas)

(en negrita los coeficientes de determinación superiores a 0,5)

estos criterios, los modelos finalmente seleccionados fueron aquellos con el menor número posible de variables para evitar el sobreajuste del modelo y garantizar su parsimonia (Hair *et al.*, 1999).

La tabla 3 muestra el ajuste R² y el error estándar de la estimación (RMSE) para cada experimento y cada cubierta superficial.

Los resultados muestran que las informaciones R y PDR alcanzan buenos resultados en la estimación de la ceniza, el carbón y la vegetación con R² en torno a 0,7-0,75, 0,5-0,6 y 0,8, respectivamente. Entre las dos informaciones la PDR obtiene siempre valores de R² ligeramente superiores y mejores valores de RMSE. Ninguno de los grupos de información espectral es buen estimador del producto vegetación quemada aunque la PDR es la información que registra los valores más altos. La PDR es también la única capaz de estimar la cubierta suelo. La información de PB sólo alcanza buenos resultados en la estimación de la vegetación pero, por contra, es la información que mejor estima esta cubierta obteniendo el R² más elevado (0,827) y el RMSE más bajo. Finalmente, las bandas equivalentes de Landsat-TM estiman con resultados aceptables las cubiertas ceniza y vegetación (R² de 0,77 y 0,55, respectivamente), obteniendo coeficientes de determinación muy bajos para las restantes cubiertas. La tabla 4 muestra las ecuaciones de regresión derivadas de los mejores modelos de regresión indicando las bandas seleccionadas, los coeficientes no estandarizados y los valores de las constantes.

CONCLUSIONES

El análisis de correlación ha mostrado que la R y la PDR son los dos grupos de información espectral más correlacionados con las variaciones de las cubiertas superficiales postincendio. En ambos casos es posible observar longitudes de onda individuales o rangos espectrales altamente sensibles a los cambios en los porcentajes de ocupación postincendio. La información de PB alcanza buenos resultados sólo con las cubiertas de vegetación (quemada y no quemada), no siendo sensible a los cambios en las restantes cubiertas. Las bandas Landsat-TM simuladas alcanzan resultados similares a los obtenidos a partir de R pero con coeficientes de correlación inferiores.

Tabla 4. Resumen de resultados del análisis de regresión: ecuaciones de regresión.

Cubierta superficial postfuego	Ecuación de regresión
	Reflectividad (R)
Ceniza	$(6,665 * R_{415,9}) - (0,377 * R_{900,01}) - 10,155$
Carbón	$(-2,552 * R_{752,84}) + 75,535$
Vegetación	$(3,642 * R_{759,11}) - (4,405 * R_{688,86}) + 2,514$
	Primera derivada de la reflectividad (PDR)
Ceniza	$(112,762 * PDR_{402,11}) - (101,206 * PDR_{402,86}) + 4,748$
Carbón	$(-1358,156 * PDR_{498,61}) - (147,336 * PDR_{807}) + 77,056$
Vegetación	$(167,533 * PDR_{709,15}) + 1,552$
Suelo	$(555,925 * PDR_{635,67}) + (65,547 * PDR_{773,23}) + 4,624$
	Profundidad de banda (PB)
Vegetación	$(166,691 * PB_{637,06}) - 3,597$
	Bandas Landsat-TM simuladas (TM)
Ceniza	$(12,167 * TM1) - (4,809 * TM3) - 20,370$
Vegetación	$(2,314 * TM4) - (3,221 * TM3) + 8,709$

Las regresiones arrojan resultados muy similares para R y PDR aunque con la PDR se obtienen valores ligeramente superiores y parece ser más sensible a cubiertas como la vegetación quemada y el suelo. Ambos conjuntos de información son capaces de estimar ceniza, carbón y vegetación no quemada con valores de R^2 superiores a 0,5. El análisis de regresión aplicado a los datos de PB sólo alcanza buenas estimaciones con la vegetación no quemada aunque obtiene para esta cubierta el valor más alto de los cuatro conjuntos de información espectral. Las bandas Landsat-TM simuladas obtienen resultados bastante buenos estimando la ceniza y la vegetación no quemada, sobre todo teniendo en consideración el menor número de bandas de este conjunto de información.

En relación con la severidad del fuego puede destacarse lo siguiente:

- La cubierta postincendio indicadora de la máxima severidad del fuego, la ceniza, es bastante bien estimada a partir de datos de R y PDR e incluso a partir de información multispectral como las bandas Landsat-TM simuladas.
- El carbón, que podría ser considerado indicador de la severidad media, es también bien estimado a partir de datos de R y PDR.
- La vegetación, el producto que representa el nivel no quemado, alcanza valores de estimación muy elevados con todas las informaciones espectrales aunque destaca la especial idoneidad de la información de PB.
- Las cubiertas postincendio representativas de la baja severidad del fuego como la vegetación quemada o el suelo quemado no son adecuadamente estimados.

Las conclusiones obtenidas en esta investigación sobre la severidad del fuego abren la posibilidad de desarrollar ecuaciones de aplicación general para, de forma rápida y sencilla, esti-

mar a partir de información espectral la ocupación de las cubiertas superficiales ligadas al proceso de combustión. Los resultados muestran también que las estimaciones son especialmente buenas cuando se aplican a cubiertas representativas de dos situaciones extremas: alta severidad del fuego y no quemado. De acuerdo con los resultados de este estudio la tradicional dificultad para discriminar el nivel de severidad intermedio no se supera totalmente con el uso de información hiperespectral. No obstante, es cierto que la información derivada a partir de técnicas hiperespectrales parece mostrar mayor sensibilidad a las cubiertas representativas de este nivel como la vegetación o el suelo quemados. Este hecho indica la posibilidad de obtener en el futuro mejores resultados para estas cubiertas continuando con esta línea de trabajo mediante un incremento de las áreas quemadas analizadas y del rango de la información espectral.

Respecto a las diferentes capacidades de los datos hiperespectrales y multiespectrales esta investigación ha demostrado la mayor precisión de los datos hiperespectrales (R PDR y PB). A pesar de ello y, sobre todo, teniendo en cuenta la considerable reducción del número de bandas del grupo de información multiespectral, se obtienen resultados considerablemente buenos a partir de los datos simulados del sensor Landsat.-TM para las cubiertas vegetación y, especialmente, ceniza.

En resumen, este trabajo ha mostrado la validez de la metodología aplicada para obtener una mejor comprensión de las variaciones de la severidad del fuego y sus relaciones con los datos espectrales. Las siguientes consideraciones deben ser tenidas en cuenta para futuras investigaciones: (i) los resultados deben ser validados aplicando los modelos a otras áreas quemadas; (ii) la estimación de las cubiertas representativas del nivel de severidad intermedio debe ser mejorada; (iii) es importante investigar las mejoras aportadas por el rango espectral del infrarrojo medio; y, (iv) de cara al proceso de cambio de escala deben considerarse las complejidades adicionales que afectan a los datos de teledetección desde satélite.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno Español (CGL2005-04863/CLI "RS_Fire") y el Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón (PIP098/2005 "PIR_Fire").

REFERENCIAS

- Clark, R.N. y Roush, T.L. 1984. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6329-6340.
- Dawson, T.P. y Curran, P.J. 1998. Technical note: A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2133-2139.
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F. y Pons, X. 2003. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1751-1763.
- Chuviéco, E., Riaño, D., Danson, F.M. y Martín, P. 2006. Use of a radiative transfer model to simulate the post-fire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research*, 111, G04S09.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C. 1999. *Análisis multivariante*. Prentice Hall Iberia. Madrid.

- Key, C.H. y Benson, N. 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio. En: D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson y L.J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. United States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountains Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-164. Ogden, UT.
- Kokaly, R.F. y Clark, R.N. 1999. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*, 67, 267-287.
- Kokaly, R.F., Rockwell, B.W., Haire, S.L. y King, T.V.V. 2007. Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 106, 305-325.
- Miller, J.D. y Yool, S.R. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481-496.
- Milton, E. 1987. Principles of spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1807-1827.
- Mutanga, O. y Skidmore, A.K. 2004. Hyperspectral band depth analysis for better estimation of grass biomass (*Cenchrus ciliaris*) measured under controlled laboratory conditions. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 5, 87-96.
- Pérez, B. y Moreno, J.M. 1998. Methods for quantifying fire severity in shrubland fires. *Plant Ecology*, 139, 91-101.
- Savitzky, A. y Golay, M.J.E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.
- Smith, A.M.S, Wooster, M.,J., Drake, N.A., Dipotso, F.M., Falkowski, M.J. y Hudak, A.T. 2005. Testing the potential of multispectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African Savannahs. *Remote Sensing of Environment*, 97, 92-115.

