

DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE INCENDIOS FORESTALES DESDE SATÉLITES DE TELEDETECCIÓN

EMILIO CHUVIECO SALINERO *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (A. Correspondiente). Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. Colegios 2- 28801. Alcalá de Henares, España.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un importante factor de transformación ambiental para una amplia variedad de ecosistemas mundiales (FAO, 2007). Tienen tanto impactos globales, afectando por ejemplo al equilibrio mundial de gases de efecto invernadero (Chuvieco, 2008), como regionales, relacionados con la degradación de suelos, la pérdida de biodiversidad y daños a personas e infraestructuras (Omi, 2005).

Aunque los incendios han sido bastante recurrentes en el territorio europeo, los cambios recientes en el uso tradicional del territorio han implicado un incremento de los efectos negativos del fuego, tanto en lo que afecta a la pérdida de vidas humanas, como al daño medioambiental que llevan consigo, ya que los incendios tienden a ser más severos y recurrentes que en condiciones naturales. Esta tendencia se agrava además por el impacto potencial del calentamiento terrestre, que supondrá en muchas zonas un aumento de la aridez y, en consecuencia, de la intensidad y duración de las temporadas de incendios (Pyne, 2001; Westerling *et al.*, 2006).

El uso de datos que proporcionan los satélites de observación de la tierra en la prevención y evaluación de los incendios forestales se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas (Chuvieco, 2009; Chuvieco, 2003). El rango de técnicas y sensores empleados en este tipo de aplicaciones es muy amplio. Intentaremos resumir estos enfoques en este trabajo. Finalmente, comentaremos algunos factores relacionados con el uso operativo de estas tecnologías. La

revisión se estructura en tres partes, de acuerdo a las tres fases de gestión del fenómeno: antes del incendio (determinación de condiciones de peligro), durante el incendio (detección de focos activos), y después del incendio (evaluación de daños).

2. RIESGO DE INCENDIO

La evaluación de las condiciones del riesgo de incendio debe considerar una gama variada de aspectos. Suelen distinguirse dos factores en la valoración del riesgo: por un lado, el peligro o probabilidad de que ocurra un incendio en un lugar y momento determinados, y, por otro, la vulnerabilidad, que hace referencia al daño potencial que el fuego supondría para ese lugar. Este es el esquema que hemos seguido en proyectos recientes de investigación (Chuvieco *et al.*, 2009), tal y como aparece graficado en la figura 1. La probabilidad de ocurrencia, a su vez, se divide en dos aspectos, por un lado el peligro de que se iniciara un incendio, y por otro de que se propagase. En la parte de vulnerabilidad, se consideraron los factores socio-económicos por un lado, y ecológico-paisajísticos por otro.

El peligro integrado de incendios se define como un producto de la ignición y la propagación. La ignición considera los aspectos físicos y humanos que explican el inicio del fuego, mientras en la propagación hace referencia a las condiciones promedio que explican la dispersión de un fuego una vez que se inicia.

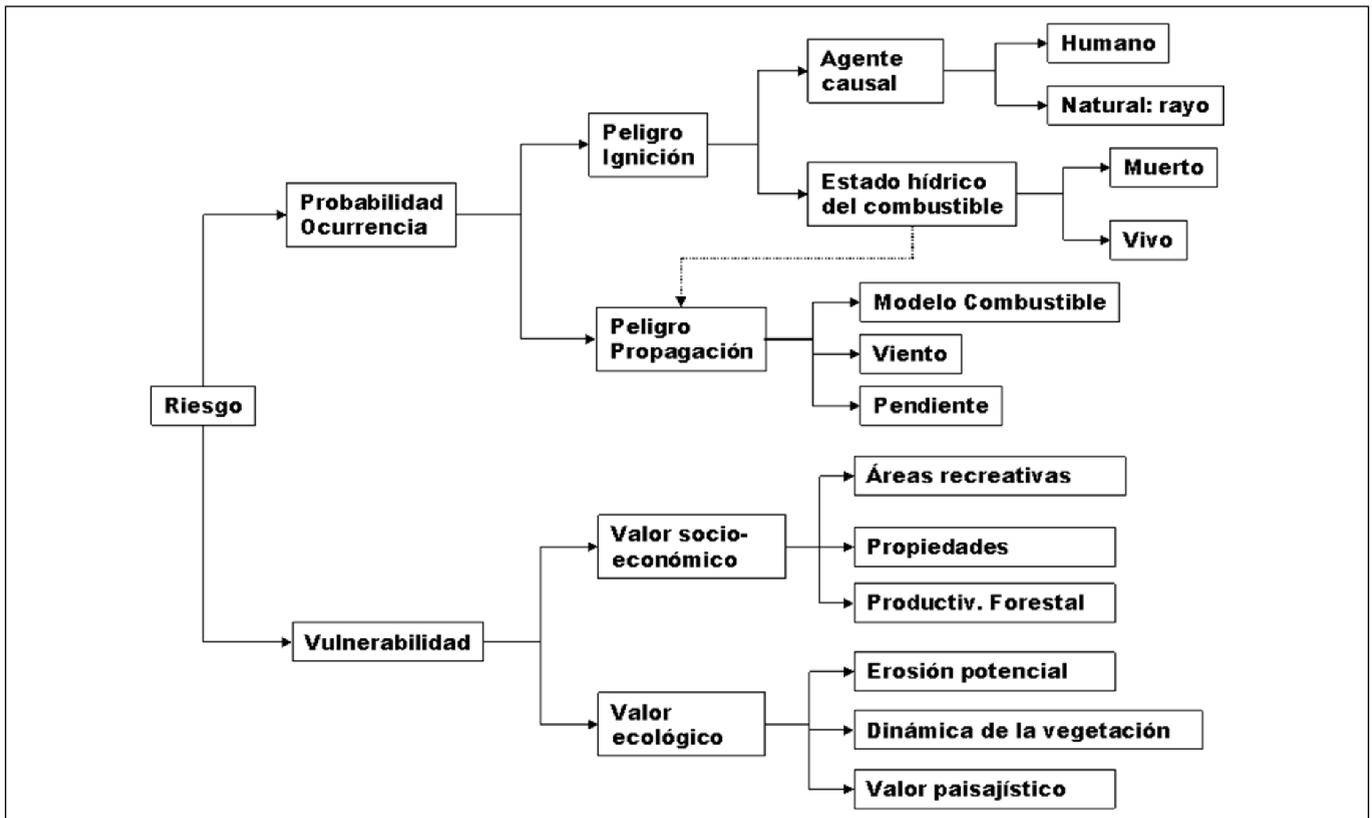


Figura 1. Esquema de un índice integrado de incendios (tomado de Chuvieco *et al.*, 2009)

El papel de la teledetección en la determinación de condiciones de riesgo puede centrarse en dos categorías, por un lado, en la generación de variables críticas para estimar la ignición o la propagación, y por otro en la evaluación de recursos potencialmente dañables por el fuego. La mayor parte de los trabajos publicados se centran en el primer grupo, y todavía hay pocos ejemplos del uso de las imágenes de satélite para determinar el valor del territorio. Una excepción a este comentario sería el uso de imágenes para actualizar la frontera urbano-forestal, sin duda una de los territorios más vulnerables al fuego (Radeloff *et al.*, 2005).

Entre los factores que se consideran en el peligro de ignición, destaca la determinación de condiciones hídricas del combustible, tanto vivo, como muerto, mientras que en la propagación, además de la humedad, es importante considerar las propiedades estructurales del combustible (biomasa, continuidad horizontal y vertical, densidad, etc.), así como las condiciones meteorológicas y topográficas. La teledetección se utiliza en todos estos aspectos.

El contenido de humedad del combustible (FMC) es una variable crítica en la ignición y propagación, ya que la cantidad de agua de la planta es inversamente proporcional a su inflamabilidad, así como a la velocidad de propagación (Dimitrakopoulos y Papaioannou, 2001; Nelson, 2001). Esta variable ha sido tradicionalmente estimada a partir de muestreos de campo o variables meteorológicas. Las primeras son más apropiadas para la vegetación viva, mientras las segundas proporcionan una buena estimación de los combustibles muertos (hojarasca, ramas, pasto seco) que descansan sobre el suelo forestal. Tanto las medidas de campo como las observaciones meteorológicas no proporcionan una buena visión territorial de cómo varían en el espacio las condiciones hídricas del combustible, por lo que se ha intentado en los últimos años emplear imágenes de satélite para obtener una visión espacialmente más completa de esta variable. Los enfoques en este tipo de estudios han sido muy variados, tanto empleando modelos empíricos (Chuvieco *et al.*, 2004b; Chuvieco *et al.*, 2002; Peters *et al.*, 2002; Sims y Gamon, 2003; Tian *et al.*, 2001), como otros basados en la ecuación de trans-

ferencia radiativa (Ceccato *et al.*, 2001; Ceccato *et al.*, 2003; Fourty y Baret, 1997; Yebra y Chuvieco, 2009; Yebra *et al.*, 2008; Zarco-Tejada *et al.*, 2003), incluyendo trabajos de laboratorio con mediciones espectro-radiométricas (De Santis *et al.*, 2006; Gillon *et al.*, 2004).

Los trabajos más interesantes desde el punto de vista de sus posibilidades de aplicación operativa son los basados en sensores de frecuencia temporal alta, que facilitan imágenes cada pocas horas con una resolución espacial suficientemente buena para estudios regionales. Entre ellos, destacan los basados en datos NOAA-AVHRR (Chladil y Nunez, 1995; Chuvieco *et al.*, 2004a; Hardy y Burgan, 1999; Paltridge y Barber, 1988) y, más recientemente con MODIS (Cheng *et al.*, 2006; Dennison *et al.*, 2005; Roberts *et al.*, 2006; Stow *et al.*, 2005; Yebra y Chuvieco, 2009; Yebra *et al.*, 2008; Zarco-Tejada *et al.*, 2003). Habitualmente las estimaciones se basan en la trayectoria temporal de los índices de absorción de la clorofila, habitualmente situados en la región del rojo e infrarrojo cercano del espectro (en este caso, se trataría de una estimación indirecta de la humedad), o los índices de absorción de humedad, comprendidos entre el infrarrojo cercano-infrarrojo medio reflejado (aquí sí hay una estimación directa del contenido del agua), o en la relación entre la dinámica hídrica y la temperatura de las plantas (Sandholt *et al.*, 2002; Vidal *et al.*, 1994).

En cuanto a la cartografía de variables estructurales en la vegetación, el empleo de los datos de teledetección es más complejo, porque algunas de las variables de interés (la altura, continuidad vertical y densidad) son difíciles de medir directamente con sensores remotos. Las técnicas más convencionales de teledetección se basan en información procedente de sensores ópticos pasivos, que permiten diferenciar algunos tipos de combustibles (Anderson *et al.*, 1993; Fazakas *et al.*, 1999; Riaño *et al.*, 2002), pero muestran más error para discriminar otros (matorral bajo arbolado, arbolado de diferente altura, etc.: (Arroyo *et al.*, 2008; Chuvieco *et al.*, 2003). Los últimos desarrollos en esta temática se basan en imágenes de muy alta resolución espacial, como son las adquiridas por los satélites Ikonos o Quickbird (Arroyo *et al.*, 2006), y en los datos RADAR y LIDAR. En ambos casos se trata de sensores activos, que permiten generar información sobre la rugosidad y

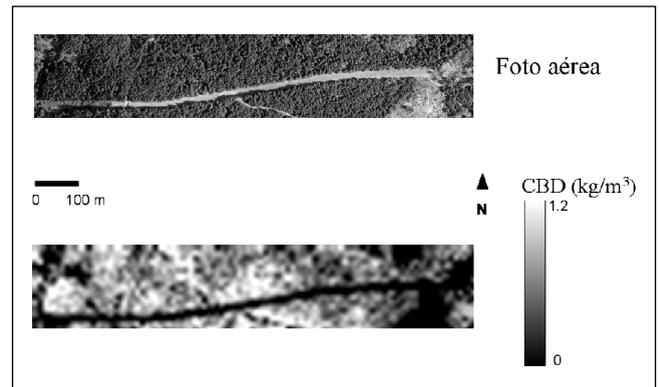


Figura 2. Ejemplo de estimación del volumen bruto de la copa (CBD) a partir de datos lidar (tomado de Riaño *et al.*, 2004).

la altura de las cubiertas observadas (Morsdorf *et al.*, 2004; Riaño *et al.*, 2004; Riaño *et al.*, 2003). En este sentido el sensor más destacado es el LIDAR, hasta el momento aeroportado, que aporta una información muy novedosa sobre la estructura tridimensional de un dosel vegetal, permitiendo generar variables de gran complejidad como sería la anchura de la copa o la densidad bruta de la copa (figura 2).

El principal problema de esta tecnología sería sus altos costes y su cobertura local, ya que el área observada en cada pasada del avión debe ser relativamente estrecha (pocos cientos de metros) para poder obtener una resolución adecuada.

3. DETECCIÓN DE INCENDIOS ACTIVOS

Tradicionalmente la detección de incendios activos en nuestro país se realiza visualmente desde torretas situadas en puntos prominentes del territorio. Esta observación es bastante tediosa y requiere muchos recursos humanos, por lo que sería deseable contar con alguna alternativa. Se han planteado algunas, basadas sobre cámaras terrestres de infrarrojos (detección de calor) o incluso visibles (detección de humo), pero los resultados y el coste de mantenimiento no garantizan todavía poder prescindir de los medios humanos.

Las imágenes de satélites pueden ser una buena alternativa en el futuro, pero actualmente ningún sensor activo proporciona la frecuencia temporal (a la resolución espacial adecuada) para que pueda conside-

rarse este método completamente fiable. No obstante, la detección que realizan los satélites de teledetección es de gran interés para aquellos países que no cuentan con infraestructura terrestre, ya que permiten tener una visión territorial bastante completa de los focos activos. Esta información también es muy interesante para obtener una visión global del problema, permitiéndose caracterizar regímenes de incendios a escala planetaria (Csiszar *et al.*, 2005; Chuvieco *et al.*, 2008; Dwyer *et al.*, 2000; Korontzi *et al.*, 2006).

La mayor parte de los métodos de detección de incendios activos desde satélite utilizados hasta el momento se basan en el contraste térmico entre el suelo no afectado y el foco de calor, utilizando sensores sensibles al infrarrojo medio (3 a 5 μm). En esta banda trabajan los sensores NOAA-AVHRR, ERS-ATSR y Terra-MODIS. El primero es el que cuenta con una mayor tradición, ya que está operativo desde 1979. Aunque no se diseñó con este propósito, y por tanto no tiene mucha sensibilidad térmica, se ha empleado para detección de focos activos en zonas tropicales y boreales (Kennedy *et al.*, 1994; Langaas, 1992; Pinnock y Grégoire, 1999), proporcionando imágenes diarias a 1 km^2 de resolución espacial. El ATSR es un sensor instalado en los satélites de la agencia espacial europea (ESA) desde 1991, si bien actualmente trabaja una versión mejorada a bordo del

satélite Envisat. Con estos datos se ha realizado un proyecto global de detección de incendios, parcialmente validado (Piccolini y Arino, 2000), ofreciendo una resolución temporal de dos días a 1 km^2 de resolución espacial. Esa misma resolución espacial tiene el sensor MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua de NASA, si bien en este caso se incluyeron bandas específicamente para detección de incendios, con mucha mejor sensibilidad térmica, lo que ha permitido reducir sensiblemente los errores de detección (Giglio *et al.*, 2003; Justice *et al.*, 2002). El MODIS se utiliza operativamente para transmitir información de incendios activos en tiempo real (fig. 3), siendo de especial utilidad en aquellos países que no tienen información de detecciones terrestres. Se han realizado diversos esfuerzos de validación de este producto, especialmente a partir de datos tomados simultáneamente por un sensor de mucha mayor resolución espacial (el ASTER, con 90m), lo que ha permitido confirmar la buena calidad de este sensor, siempre que no haya nubes o humo denso (Csiszar *et al.*, 2006; Morissette *et al.*, 2005).

Una alternativa a estos sensores de órbita polar es emplear la segunda generación de satélites geoestacionarios, que ofrecen mucho mejor resolución temporal (15 minutos para el *Meteosat Second Generation*), aunque un poco peor resolución espacial (3x3



Figura 3. Ejemplo de detección de focos activos a partir de imágenes MODIS (<http://maps.geog.umd.edu/firms/>)

km) que los de órbita polar. Esta altísima frecuencia les permite detectar múltiples focos que pasan desapercibidos a las órbitas diarias de los satélites polares (Calle *et al.*, 2006), y supone una alternativa de gran interés en la detección operativa que puede realizarse en el futuro.

Finalmente, también pueden citarse los resultados del sensor OLS a bordo del satélite militar DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*). En este caso, la detección de incendios se hace a partir del espectro visible, mediante el contraste lumínico entre las zonas que arden y el entorno en imágenes nocturnas (Elvidge, 2001).

4. EVALUACIÓN DE DAÑOS

La evaluación de efectos del fuego sobre la sociedad y los ecosistemas debería considerar los cambios que se hayan producido en un determinado territorio como consecuencia del fuego. Esos efectos están muy relacionados con la intensidad y severidad del mismo, así como el tiempo de residencia, lo que a su vez está relacionado con la cantidad de combustible previo, el grado de humedad de los combustibles, la topografía, los vientos concurrentes y los medios de extinción empleados.

La teledetección se ha empleado para analizar impactos del fuego en escalas regionales y globales. Los más comunes han sido los estudios basados sobre sensores de resolución espacial media (como Landsat-TM/ETM+, SPOT-HRV, IRS-WIFS/AWIFS), con píxeles comprendidos entre los 30×30 y 100×100m. (García, 2003; Koutsias *et al.*, 1999; Salvador *et al.*, 2000; Siljeström y Moreno, 1995). Ahí se ha pretendido principalmente cartografiar las áreas quemadas, lo cual puede considerarse bastante exacto cuando se trate de incendios de tamaño medio (por encima de 25 hectáreas). Más recientemente, se han publicado estudios para determinar condiciones de severidad post-incendio a partir de imágenes. Esta tarea resulta especialmente interesante para evaluar más certeramente los daños y establecer condiciones potenciales de regeneración (Lentile *et al.*, 2006). Actualmente se está desarrollando un programa operativo por parte del USGS de EE.UU. para cartografiar áreas afectadas por grandes incendios forestales en todo el país a partir de un método semi-empírico desa-

rollado sobre imágenes Landsat (Key y Benson, 2006). Este método ha dado buenos resultados en diversos ecosistemas (Brewer *et al.*, 2005; Cocke *et al.*, 2005), pero plantea problemas en otros (Kasischke *et al.*, 2007), por lo que más recientemente se ha planteado emplear modelos de simulación para mejorar la determinación de los niveles intermedios de severidad (De Santis y Chuvieco, 2007; De Santis y Chuvieco, 2009; De Santis *et al.*, 2009).

A escala más global se están utilizando imágenes de satélite para generar una evaluación mundial de las áreas quemadas. Para esta tarea, se están empleando principalmente datos de los sensores SPOT-Vegetation, Terra-MODIS y ERS-ATSR. Frente a los estudios que se dirigen a determinar incendios activos, en este caso se trata de discriminar la señal del carbón o al menos la pérdida de cubierta vegetal post-incendio. Esta señal es más estable que la de los incendios activos, pero tiene menor contraste espectral, por lo que no resulta fácil diferenciarla de otros cambios en la vegetación como pueden ser debidos a talas, cosechas, inundaciones o sombras de nubes. Entre los productos globales, destaca la serie Globcarbon, realizada por la ESA (Piccolini y Arino, 2000; Tansey *et al.*, 2004), y la basada en imágenes MODIS (Roy *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2002). Ambas cubren todo el planeta, con resolución diaria (siempre que lo permitan las nubes), desde 2000 a la actualidad.

5. REFLEXIONES SOBRE EL EMPLEO OPERACIONAL DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS

Acabamos este trabajo con unas reflexiones sobre las actuales limitantes y potenciales para el uso operativo de datos de satélite en la prevención, detección y evaluación de incendios. Como principales ventajas conviene citar la capacidad de la teledetección para cubrir todo el territorio a intervalos de tiempo sistemáticos, lo que permite una visión espacial comprensiva. Esos datos se registran y transmiten en formato digital, lo que permite procesarlos con ayuda de equipos informáticos, garantizando un tratamiento automático, rápido y razonablemente objetivo. Además, pueden conectarse fácilmente con otras bases de datos espaciales, para generar productos integrados en

el entorno de un Sistema de Información Geográfica (Bolstad, 2008; Bosque, 1997; Longley *et al.*, 2005).

Como principales retos que se plantean para el futuro, destaca la necesidad de construir servicios sobre misiones operacionales, ya que la mayor parte de los productos hasta ahora disponibles estaban basados en sensores experimentales. Con la excepción de los satélites meteorológicos, las misiones de teledetección hasta el momento se han considerado como misiones científicas, que no garantizan una cobertura permanente (las nuevas misiones no están aseguradas). Es preciso, en este sentido, asentar las aplicaciones ya operativas y solicitar a las agencias espaciales que diseñen misiones de largo alcance (que garanticen una observación sistemática durante una serie larga de años), para que puedan asegurarse las adquisiciones más allá de posibles problemas técnicos que surjan en una determinada misión. En este sentido, es preciso que los científicos seamos capaces de convencer a los gestores de los programas espaciales del interés ambiental de estos datos, de tal manera que, por un lado, se diseñen misiones con los requisitos que necesita la comunidad de usuarios y, por otro, que se asegure la continuidad de la financiación para que esas aplicaciones sean suficientemente estables.

REFERENCIAS

1. Anderson, G. L., Hanson, J. D. y Haas, R. J. (1993): Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 45: 165-175.
2. Arroyo, L. A., Healey, S. P., Cohen, W. B., Cocero, D. y Manzanera, J. A. (2006): Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 111: doi:10.1029/2005JG000120.
3. Arroyo, L. A., Pascual, C. y Manzanera, J. A. (2008): Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management (2008)* 256 1239-1252.
4. Bolstad, P. V. (2008): *GIS Fundamentals: A First Textbook on Geographic Information Systems*, White Bear Lake, MN, Eider Press.
5. Bosque, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*, Madrid, Rialp.
6. Brewer, C. K., Winne, J. C., Redmond, R. L., Opitz, D. W. y Mangrich, M. V. (2005): Classifying and Mapping Wildfire Severity: A Comparison of Methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71: 1311-1320.
7. Calle, A., Casanova, J. L. y Romo, A. (2006): Fire detection and monitoring using MSG Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) data. *Journal of Geophysical Research - Biosciences*, 111: doi:10.1029/2005JG000116.
8. Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S. y Grégoire, J. M. (2001): Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22-33.
9. Ceccato, P., Leblon, B., Chuvieco, E., Flasse, S. y Carlson, J. D. (2003): Estimation of Live Fuel Moisture Content, en *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data* (editado por E. Chuvieco). Singapore, World Scientific Publishing: 63-90.
10. Cocke, A. E., Fule, P. Z. y Crouse, J. E. (2005): Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 189-198.
11. Csiszar, I., Denis, L., Giglio, L., Justice, C. O. y Hewson, J. (2005): Global fire activity from two years of MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 117-130.
12. Csiszar, I. A., Morisette, J. T. y Giglio, L. (2006): Validation of active fire detection from moderate-resolution satellite sensors: The MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44: 1757-1764.
13. Cheng, Y. B., Zarco-Tejada, P. J., Riaño, D., Rueda, C. A. y Ustin, S. (2006): Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105: 354-366.
14. Chladil, M. A. y Nunez, M. (1995): Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania. The application of remote sensing and empirical models for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire*, 5: 165-171.
15. Chuvieco, E., Riaño, D., Aguado, I. y Cocero, D. (2002): Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2145-2162.
16. Chuvieco, E. (Ed.) (2003): *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*, Series in Remote Sensing, vol. 4, Singapore, World Scientific Publishing.

17. Chuvieco, E., Riaño, D., Van Wagtenok, J. y Morsdorf, F. (2003): Fuel Loads and Fuel Type Mapping, en *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data* (editado por E. Chuvieco). Singapore, World Scientific Publishing: 119-142.
18. Chuvieco, E., Cocero, D., Aguado, I., Palacios-Orueta, A. y Prado, E. (2004a): Improving Burning Efficiency Estimates through Satellite Assessment of Fuel Moisture Content. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109, D14S07, doi:10.1029/2003JD003467: 1-8.
19. Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, M. P., Martínez-Vega, J., De La Riva, J. y Pérez, F. (2004b): Combining NDVI and Surface Temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92: 322-331.
20. Chuvieco, E. (2008): Satellite observation of biomass burning: implications in global change research, en *Earth Observation and Global Change* (editado por E. Chuvieco). New York, Springer: 109-142.
21. Chuvieco, E., Giglio, L. y Justice, C. O. (2008): Global Characterization of Fire Activity: Towards Defining Fire Regimes From Earth Observation Data. *Global Change Biology*, 14: 1488-1502.
22. Chuvieco, E. (Ed.) (2009): *Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems*, Berlin Heidelberg, Springer
23. Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., De La Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A. y Zamora, R. (2009): Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.
24. De Santis, A., Vaughan, P. y Chuvieco, E. (2006): Foliage moisture content estimation from 1-D and 2-D spectroradiometry for fire danger assessment. *Journal of Geophysical Research - Biosciences*, 111: doi:10.1029/2005JG000149.
25. De Santis, A. y Chuvieco, E. (2007): Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108: 422-435.
26. De Santis, A. y Chuvieco, E. (2009): GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113: 554-562.
27. De Santis, A., Chuvieco, E. y Vaughan, P. (2009): Short-term assessment of burn severity using the inversion of PROSPECT and GeoSail models. *Remote Sensing of Environment*, 113: 126-136.
28. Dennison, P. E., Roberts Dar, A., Peterson, S. H. y Rechel, J. (2005): Use of Normalized Difference Water Index for monitoring live fuel moisture content. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 1035-1042.
29. Dimitrakopoulos, A. y Papaioannou, K. K. (2001): Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37: 143-152.
30. Dwyer, E., Pereira, J. M. C., Grégorie, J.-M. y Dacamara, C. C. (2000): Characterization of the spatio-temporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993. *Journal of Biogeography*, 27: 57-69.
31. Elvidge, C. D. (2001): DMSP-OLS estimation of tropical forest area impacted by surface fires in Roraima, Brazil: 1995 versus 1998. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2661-2673.
32. FAO (2007): *Fire management - global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*, Rome, FAO Forestry Paper 151.
33. Fazakas, Z., Nilsson, M. y Olsson, H. (1999): Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99: 417-425.
34. Fourty, T. y Baret, F. (1997): Vegetation water and dry matter contents estimated from top-of-the-atmosphere reflectance data: a simulation study. *Remote Sensing of Environment*, 61: 34-45.
35. García, M. (2003): Assessment of the potential of the SAC-C/Multispectral Medium Resolution Scanner (MMRS) Imagery for mapping burned areas, *Fourth international workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management. Innovative concepts and methods*, Ghent, University of Ghent.
36. Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O. y Kaufman, Y. J. (2003): An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87: 273-282.
37. Gillon, D., Dauriac, F., Deshayes, M., Vallette, J. C. y Moro, C. (2004): Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 51-62.
38. Hardy, C. C. y Burgan, R. E. (1999): Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the Western U.S. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65: 603-610.
39. Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., Roy, D. P. y Morisette, J. T. (2002): An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing*

- of Environment*, 83: 3-15.
40. Kasischke, E., Hoy, E. E., French, N. H. F. y Turetsky, M. R. (2007): Post-fire evaluation of the effects of fire on the environment using remotely-sensed data, en *Towards an Operacional Use of Remote Sensing in Forest Fire Management* (editado por I. Gitas y C. Carmona). Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 34-52.
 41. Kennedy, P. J., Belward, A. S. y Grégoire, J. M. (1994): An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 2235-2255.
 42. Key, C. H. y Benson, N. (2006): Landscape Assessment (LA). Sampling and Analysis Methods, en *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Integration of Standardized Field Data Collection Techniques and Sampling Design With Remote Sensing to Assess Fire Effects* (editado por D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Carattiet al). Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: LA1-LA51.
 43. Korontzi, S., Mccarty, J., Loboda, T., Kumar, S. y Justice, C. O. (2006): Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Global Biogeochemical Cycles*, 20: GB2021, doi:10.1029/2005GB002529.
 44. Koutsias, N., Karteris, M., Fernández, A., Navarro, C., Jurado, J., Navarro, R. y Lobo, A. (1999): Burnt land mapping at local scale, en *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (editado por E. Chuvieco). Berlin, Springer-Verlag: 123-138.
 45. Langaas, S. (1992): Temporal and spatial distribution of Savanna fires in Senegal and the Gambia, West Africa, 1989-90, derived from multi-temporal AVHRR night images. *International Journal of Wildland Fire*, 2: 21-36.
 46. Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E. y Benson, N. C. (2006): Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15: 319-345.
 47. Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. y Rhind, D. W. (2005): *Geographic Information Systems and Science*, New York, John Wiley and Sons.
 48. Morisette, J. T., Giglio, L., Csiszar, I. y Justice, C. O. (2005): Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4239-4264.
 49. Morsdorf, F., Meier, E., Kotz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M. y Allgower, B. (2004): LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment*, 92: 353-362.
 50. Nelson, R. M. (2001): Water Relations of Forest Fuels, en *Forest fires : behavior and ecological effects* (editado por E. A. Johnson y K. Miyanishi). San Diego, Calif., Academic Press: 79-149.
 51. Omi, P. N. (2005): *Forest fires : a reference handbook*, Santa Barbara, Calif., ABC-CLIO.
 52. Paltridge, G. W. y Barber, J. (1988): Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 25: 381-394.
 53. Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Viña, A., Hayes, M. y Svodoba, M. D. (2002): Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 71-75.
 54. Piccolini, I. y Arino, O. (2000): Towards a Global Burned Surface World Atlas. *Earth Observation Quarterly*, 65: 14-18.
 55. Pinnock, S. y Grégoire, J. M. (Eds.) (1999): *World Fire Web: A Global Fire Observation System*, Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, Luxembourg, Publications of the European Communities.
 56. Pyne, S. J. (2001): The Fires. This Time, and Next. *Science*, 294: 1005-1006.
 57. Radeloff, V. C., Hammer, R. B., Stewart, S. I., Fried, J. S., Holcomb, S. S. y Mckeefry, J. F. (2005): The wildland-urban interface in the United States. *Ecological Applications*, 15: 799-805.
 58. Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A. y Bastarrica, A. (2002): Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 1301-1315.
 59. Riaño, D., Meier, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E. y Ustin, S. L. (2003): Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86: 177-186.
 60. Riaño, D., Chuvieco, E., Condés, S., González-Matesanz, J. y Ustin, S. L. (2004): Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. *Remote Sensing of Environment*, 92: 345-352.
 61. Roberts, D. A., Peterson, S., Dennison, P. E., Sweeney, S. y Rechel, J. (2006): Evaluation of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) measures of live fuel moistu-

- re and fuel condition in a shrubland ecosystem in southern California. *Journal of Geophysical Research*, 111: G04S02, doi:10.1029/2005JG000113.
62. Roy, D., Lewis, P. E. y Justice, C. O. (2002): Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—a bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment*, 83: 263-286.
63. Roy, D., Jin, Y., Lewis, P. y Justice, C. (2005): Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97: 137-162.
64. Salvador, R., Valeriano, J., Pons, X. y Díaz-Delgado, R. (2000): A semi-automatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 655-671.
65. Sandholt, I., Rasmussen, K. y Andersen, J. (2002): A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79: 213-224.
66. Siljeström, P. y Moreno, A. (1995): Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 1577-1587.
67. Sims, D. A. y Gamon, J. A. (2003): Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84: 526-537.
68. Stow, D., Niphadkar, M. y Kaiser, J. (2005): MODIS-derived visible atmospherically resistant index for monitoring chaparral moisture content. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 3867-3873.
69. Tansey, K., Grégoire, J. M., Stroppiana, D., Sousa, A., Silva, J., Pereira, J. M., Boschetti, L., Maggi, M., Brivio, P. A., Fraser, R., Flasse, S., Ershov, D., Binaghi, E., Graetz, D. y Peduzzi, P. (2004): Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109, D14S03, doi:10.1029/2002JD003598: 2-22.
70. Tian, Q., Tong, Q., Pu, R., Guo, X. y Zhao, C. (2001): Spectroscopic determination of wheat water status using 1650–1850 nm spectral absorption features. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2329-2338.
71. Vidal, A., Pinglo, F., Durand, H., Devaux-Ros, C. y Mailet, A. (1994): Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR. *Remote Sensing of Environment*, 49: 296-303.
72. Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. y Swetnam, T. W. (2006): Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science*, 313: 940-943.
73. Yebra, M., Chuvieco, E. y Riaño, D. (2008): Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 523-536.
74. Yebra, M. y Chuvieco, E. (2009): Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: Solving the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment* 113: 2403-41.
75. Zarco-Tejada, P. J., Rueda, C. A. y Ustin, S. L. (2003): Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85: 109-124.