

Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos

E. Chuvieco, Y. Cifuentes, S. Hantson, A. Agustín López,
R. Ramo y J. Torres

Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá

Resumen

Los puntos de calor del sensor MODIS se han utilizado extensamente como aproximación a la ocurrencia del fuego, especialmente en aquellos territorios en donde las estadísticas de incendios forestales no están disponibles. Con ser de gran interés, esta información no recoge completamente las características de los incendios en un determinado territorio, ya que está bastante influenciada por la duración y tamaño de los fuegos. En este trabajo se realiza una comparación entre perímetros de manchas quemadas, generados de imágenes multitemporales Landsat, y los puntos de calor MODIS para cinco imágenes situadas en distintas zonas mediterráneas de España, Portugal y Chile central. La serie incluye varios años de estudio en cada imagen, de cara a analizar las tendencias temporales.

La comparación entre las dos fuentes indica que los puntos de calor MODIS detectan la ocurrencia de grandes incendios (> 500 ha) con alta confiabilidad (errores de omisión generalmente inferiores al 5%), pero son poco confiables para los pequeños (<50 ha), en los que se ha observado un error de omisión cercano al 80%. Los errores de comisión (falsos positivos) se estiman en un 15%, y están asociados principalmente a suelos agrícolas que alcanzan altas temperaturas en verano. No se observa una relación muy clara entre el nivel de detectabilidad de incendios y las formas de los mismos. El nivel de confianza asignado por los diseñadores del producto MOD14 está altamente relacionado con el nivel de detección, si bien la categoría intermedia de fiabilidad también ofrece buenos resultados. Para las zonas de estudio, se estima que cada punto de calor equivale a una superficie quemada promedio de 81 ha.

Palabras clave: Detección de incendios, MODIS, puntos de calor, Landsat, Áreas quemadas, Validación

Abstract

Agreement between MODIS hotspots and burned area perimeters in mediterranean fires

MODIS hotspots have been widely used as a proxy of fire occurrence, especially in those areas where forest fire statistics are scarce or not available. Even acknowledging the interest of hotspots to analyze fire patterns, they do not show all characteristics of fire regimes in a particular area, as the detection rates are very much influenced by fire length and size. This paper compares a time series of fire perimeter data generated from multitemporal analysis of Landsat-TM data and hotspots derived from the MODIS sensor (MOD14). The five study sites are located in Mediterranean areas of Spain, Portugal and central Chile. The time series includes several years for each study site, to tackle temporal trends in fire occurrence to hotspots relations.

The comparison between hotspots and fire perimeters shows that the MODIS MOD14 product detects large fires (>500 ha) with high reliability (omission errors generally lower than 5%), but they do not properly detect small fires (<50 ha), which have omission errors close to 80%. Commission errors (false positives) are generally around 15% and mostly occur in agricultural areas with dry-hot soils in summer time. The confidence level assigned by the MOD14 product designers shows a clear relation

* Autor para la correspondencia: emilio.chuvieco@uah.es
Recibido: 31-10-11; Aceptado: 01-02-12

with the detection level, although the intermediate confidence level also shows good detection levels. For the study sites, the average burned surface for each hotspot was calculated at 81 ha.

Keywords: Fire detection, MODIS, hotspots, Landsat, Burned areas, Assessment.

Introducción

Numerosos autores han puesto de relieve la importancia que los incendios forestales o quemadas de biomasa tienen en el balance atmosférico del planeta (Randerson *et al.*, 2006; van der Werf *et al.*, 2010), así como en la distribución de la vegetación (Bond *et al.*, 2005; Kloster *et al.*, 2010) y en las transformaciones del uso del suelo (Bowman *et al.*, 2009).

Pese a esa importancia, todavía tenemos bastante incertidumbre sobre la cantidad e intensidad de los impactos del fuego. Al tratarse de un fenómeno global, que se produce mayoritariamente en zonas poco pobladas, los datos estadísticos sobre áreas quemadas son escasos y poco fiables, mientras apenas hay información sobre otros elementos de gran interés para entender los efectos de los incendios, como es el caso de la biomasa consumida en las quemadas o la severidad del fuego.

La teledetección supone una fuente de información crucial para entender mejor la magnitud e impacto de las quemadas. En lo que se refiere a la superficie quemada, los inventarios globales más recientes estiman que se queman anualmente en el mundo entre 3.2 y 3.8 millones de km² (Chang y Song, 2009; Giglio *et al.*, 2010; Roy *et al.*, 2008; Tansey *et al.*, 2008), una superficie similar a la de la India. Si comparamos esa cifra con los apenas 0.6 millones de km² que señalan las estadísticas oficiales de la FAO (Food and Agriculture Organization, 2010), se comprenden las limitaciones de las

fuentes oficiales, que no recogen información de muchos países tropicales en desarrollo, en donde el fuego tiene un impacto muy considerable.

Hasta el momento, las metodologías más empleadas en teledetección para evaluar los impactos de los incendios se han basado en dos tipos de información (tabla 1). Por un lado, en los focos activos detectados por sensores con bandas en el infrarrojo medio (en torno a 3.7 micras); por otro, los polígonos quemados tras el incendio, a partir de analizar el cambio en la reflectividad de algunos canales del espectro solar (principalmente infrarrojo cercano y SWIR). El primer enfoque ha sido el más extendido, pues un incendio lleva consigo un gran contraste con la temperatura ambiente y su detección es relativamente sencilla (siempre que el área ardiendo tenga un cierto tamaño y el sensor posea buena sensibilidad térmica). Sin embargo, con este enfoque no podemos detectar más que lo que esté ardiendo cuando pasa el satélite, por lo que supone un muestreo de lo que realmente ha ardido. Por el contrario, la detección de área quemada permite determinar toda la superficie afectada por el fuego, pero el contraste espectral con las zonas no quemadas es menos intenso que en el ámbito térmico, lo que lleva consigo mayores incertidumbres en la caracterización. Ambos enfoques comparten el mismo problema de la sensibilidad a la cobertura nubosa, si bien en el infrarrojo medio podría detectarse un foco activo si las nubes no son muy densas. También existen

Tabla 1. Enfoques empleados para estimar impactos de incendios forestales a escala global

	Puntos de Calor	Área quemada
Sensores	AVHRR, ATSR, MODIS, TRMM	AVHRR, ATSR, MODIS, VGT, MERIS
Disponibilidad temporal	Teórica >1981 (no global) Práctica (>2000)	Baja resolución >1981 (PAL) Alta (>2000)
Contraste espectral	Alto	Medio-bajo
Precisión espacial	Focos activos	Mancha quemada
Fiabilidad	Alta (>50 ha)	Variable

algoritmos híbridos, que consideran simultáneamente los puntos de calor y los cambios de reflectividad post-incendio (Giglio *et al.*, 2009)

Esa mayor facilidad para la detección explica que los puntos de calor se hayan utilizado en múltiples análisis sobre el impacto global de los incendios, tanto para estimación de emisiones (van der Werf *et al.*, 2004; van der Werf *et al.*, 2006), como para definir regímenes de incendio (Csiszar *et al.*, 2005; Chuvieco *et al.*, 2008; Dwyer *et al.*, 2000; Harrison *et al.*, 2010). Los sensores más empleados en esta tarea han sido el NOAA-AVHRR, el ERS-ATSR y el MODIS, a bordo de los satélites Terra-Aqua. Este último sensor es el único que se diseñó para detectar puntos de calor, por lo que cuentan con una sensibilidad térmica idónea para esta tarea y facilita los resultados más precisos.

A partir de los puntos de calor se ha intentado también estimar área quemada, bien aplicando alguna fórmula que relacionara el número de puntos detectados con la superficie total afectada (Giglio *et al.*, 2005b; van der Werf *et al.*, 2003), bien empleando los puntos de calor como semilla para guiar el algoritmo de área quemada sobre imágenes pre y post-incendio (Fraser *et al.*, 2000; Giglio *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2003; Pu *et al.*, 2007; Roy *et al.*, 1999). En ambos casos, resulta clave esclarecer qué relación hay entre punto de calor y superficie quemada, o dicho de otra forma, cuántos incendios no son detectados por los puntos de calor, cuántos de los puntos detectados como incendio son realmente tales, y, en caso afirmativo, a qué superficie quemada equivale cada punto detectado.

Este es el objetivo principal del presente artículo, que pretende comparar puntos de calor y superficies quemadas en varias zonas de ecosistema mediterráneo (España, Portugal y Chile central), determinando su grado de fiabilidad y su dependencia de algunos factores de error potencial, como el tipo de cobertura, el tamaño del incendio o su forma. Aunque hay varios trabajos que han validado la fiabilidad de los puntos de calor (Csiszar *et al.*, 2006; Morissette *et al.*, 2005; Schroeder *et al.*, 2008), siempre se ha hecho con imágenes térmicas de incendios activos (principalmente ASTER), que recogen también las características del

frente de llamas. Comparar puntos de calor con perímetros quemados no supone propiamente validar los puntos de calor, sino analizar qué ventajas y limitaciones tienen estos productos de cara a utilizarlos como buenos descriptores del impacto del fuego en un determinado territorio.

Métodos

Datos de partida

Para este trabajo se han seleccionado cinco áreas de estudio, correspondientes a distintas regiones de ecosistema mediterráneo (figura 1). Cada una de ellas se define por el área abarcada por una escena Landsat. Los sectores seleccionados cubren el centro de Portugal (escena 204/032 del catálogo Landsat), el occidente peninsular español (203/031), la región central española (próxima al P.N. Cabañeros, 201/033), el litoral mediterráneo (199/032) y la región central de Chile (escena 233/083). Todas estas zonas tienen una importante recurrencia de incendios, al tratarse de vegetación principalmente esclerófila (coníferas, matorrales y pastizales), afectada por una importante sequía estival y con actividades humanas que tienden a utilizar el fuego de modo recurrente.

Las imágenes empleadas para este trabajo se han descargado del servidor glovis (<http://glovis.usgs.gov/>). Se han seleccionado las imágenes de cada escena disponibles entre los años 2000 y 2010, preferentemente aquellas con menor cubierta nubosa y que no estuvieran afectadas por el efecto SLC-off (que su-

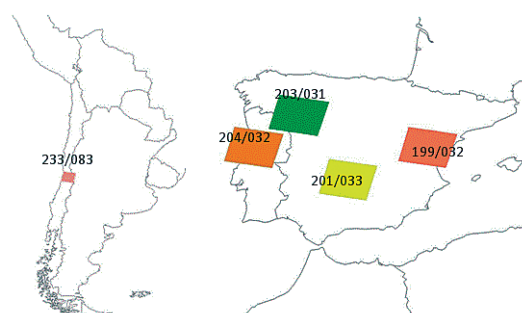


Figura 1. Áreas de estudio seleccionadas.

Tabla 2. Imágenes empleadas para este proyecto

Área de estudio	Descripción	Número de años	Número de imágenes	Número de años sin bandeado	Número de imágenes sin bandeado
203/031	Occ. España	7	23	3	8
201/033	Cabañeros	6	24	2	17
199/032	Litoral Med.	10	20	5	12
204/032	Portugal	9	18	3	6
233/083	Chile	10	20	4	8
Total		42	105	17	51

ponen pérdida de bandas entre las líneas observadas para las imágenes ETM+ a partir de 2003). En total se han procesado 122 imágenes Landsat, de las que se han extraído los perímetros quemados (tabla 2).

En aquellas imágenes que estaban afectadas por el bandeado de las imágenes ETM+ no fue posible realizar el cálculo de tamaño de los perímetros quemados, ya que pueden aparecer manchas quemadas interrumpidas por sectores no observados por el sensor. Eso implicaría que el tamaño real del perímetro quemado no correspondería a la realidad, ya que varias zonas afectadas no se incluirían en el mismo, o que la misma mancha quemada se fraccione en varias, distorsionando también el número real de perímetros quemados (figura 2). Por esta razón, tratamos de utilizar imágenes TM en lugar de ETM+ cuando fuera posible. En caso de que hubiera una buena cantidad de imágenes ETM+ en el archivo disponible, se han empleado varias imágenes para cada temporada de incendios, de tal forma que pudieran completarse los perímetros quemados con datos de otras fechas post-incendio. Para los años en los que no ha-

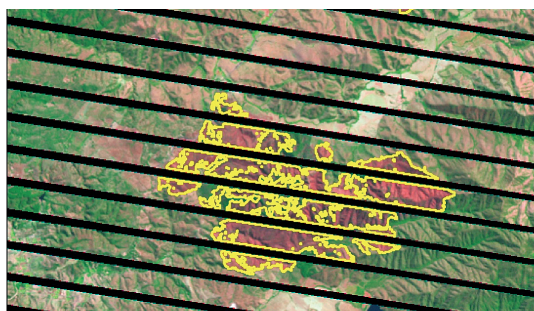


Figura 2. Perímetros quemados interrumpidos por efecto del bandeado de las imágenes ETM+ (ejemplo de una imagen en Chile central, escena 233/083).

bía disponible esa serie de imágenes en el archivo Landsat, no se consideraron en los análisis, salvo para calcular los errores de comisión.

Para los mismos periodos y zonas correspondientes a las imágenes Landsat, se descargaron los puntos de calor MODIS, empleando el servidor cartográfico del proyecto FIRMS (<http://firefly.geog.umd.edu/download/>). Estos datos provienen del producto MOD14 (Collection 5), y están en formato shape de ArcGISTM, disponibles en coordenadas geográficas (WGS 84), donde el punto representa el centroide de un pixel de 1 km. Para cada punto, se indica también su grado de fiabilidad en tres categorías: baja, media y alta, extraída de los datos de calidad que incluye el producto estándar MOD14 (Giglio, 2005). Los puntos de calor MODIS corresponden a las adquisiciones de este sensor a bordo de los satélites Terra (desde 2000 en adelante) y Aqua (desde 2002 en adelante). El primero pasa en torno a las 10.30 y 22.30 h por el Ecuador y el segundo a las 13.30 y 1.30 h. Por tanto, hay al menos cuatro adquisiciones diarias disponibles (para las zonas boreales, habrá más, al tener mayor solape), a partir de 2002, y dos entre 2000 y 2002, lo que afecta a la detectabilidad de incendios que realiza este sensor.

Extracción de los perímetros quemados

La obtención de los perímetros quemados para cada área de estudio y año de referencia se realizó utilizando un programa semi-automático desarrollado por Aitor Bastarrika para la cartografía de áreas quemadas sobre imágenes Land-

sat (Bastarrika *et al.*, 2011). Este programa parte de imágenes multitemporales (antes y después del incendio), admitiendo varias posteriores y realizando posteriormente su integración en la serie anual. El algoritmo se basa en una metodología de dos fases, semillado y contexto, y emplea diversos índices espectrales. Los umbrales se generaron a partir de una clasificación en árbol realizada por los autores del algoritmo, pero pueden modificarse por el usuario. La fase de contexto parte de las semillas obtenidas en la primera fase y aplica un algoritmo de crecimiento de regiones, a partir de una variable de crecimiento generada por regresión logística sobre la imagen post-incendio.

Los resultados de la extracción automática se validaron visualmente comparando las imágenes anteriores y posteriores al incendio, corrigiéndolos manualmente cuando se vio necesario. La validación se realizó por un intérprete que no había intervenido en la generación de los perímetros, de tal forma que se asegura una alta calidad en el proceso. En caso de desacuerdos se revisaron los perímetros entre los dos intérpretes o se acudió a un tercero que resolviera las diferencias.

Es importante tener en cuenta que el algoritmo empleado distingue entre zonas quemadas, no quemadas y no observadas. Estas últimas refieren a sectores de la imagen sobre las que no hay datos fiables, ya sea por fallos en el sensor (efecto SLC en las imágenes ETM+), o por nubes. En el caso de las nubes, se enriqueció la interpretación automática con una máscara visual en aquellos sectores mal detectados automáticamente. Las zonas no observadas se excluyen del análisis de áreas quemadas, puesto que no podemos saber si están bien o mal detectadas.

Proceso de los datos

Para cada escena, se extrajeron los puntos de calor que correspondían a las fechas incluidas entre las imágenes de referencia, tomadas como anterior y posterior a los incendios. Lógicamente se extrajeron sólo los puntos correspondientes al marco abarcado por las imágenes, incluyendo un pequeño corredor de 500 m en torno al mismo, ya que las coordenadas

de los puntos de calor se refieren al centro de cada píxel, pero realmente corresponden a píxeles de 1 km² aproximadamente.

Con estos datos, se calcularon una serie de métricas descriptivas, como sería la superficie quemada en cada año, el número de incendios totales y los correspondientes a cuatro rangos de tamaño: < 50 ha, 50-100 ha, 100-500 ha, y > 500 ha.

A partir de distintos análisis espaciales, se calcularon las siguientes métricas para cada área de estudio y año:

— Incendios omitidos por tamaño de incendio. Se considera que existe un error de omisión cuando el perímetro quemado no tienen ningún punto de calor a menos de 1500 m de sus bordes. La franja de 1500 m se considera una estimación conservadora del efecto de posibles desplazamientos geométricos entre la imagen MODIS y la Landsat. Se asume que los incendios más pequeños serán más difícilmente detectables.

— Incendios omitidos por nivel de fiabilidad. El mismo planteamiento anterior, pero, en este caso, se analiza la tasa de omisión en función de la confiabilidad de los puntos de calor. Este dato se asigna por el algoritmo de detección del producto MOD14 en función de la calidad esperable en la detección (Giglio *et al.*, 2003). Se asume que los puntos con mayor nivel de confiabilidad presentarán tasas de detección mejores.

— Incendios omitidos por tipo de cobertura. Se relacionan los incendios detectados y omitidos por los puntos de calor con la cobertura del suelo dominante del área quemada en cada incendio. En este caso, se parte de la hipótesis que la cobertura del suelo afecta a la calidad de las detecciones, siendo más sencillos de detectar los que corresponden a cubiertas con mayor biomasa, puesto que tendrán temperaturas de combustión más altas. En el caso de España, la cobertura del suelo se extrajo de la base cartográfica del Corine Land Cover 2000 (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database>). Para Chile central, esta información se obtuvo del «Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile» (CONAF-CONAMA-BIRF 1999)

— Errores de omisión por forma. La compacidad de la forma del perímetro quemado se consideró que podría afectar a la detección, siendo más sencillo detectar áreas con perímetros circulares y que sería más complejo detectar los alargados, para un mismo tamaño obviamente. Se definió la forma a partir del índice de compacidad de Gravelius (Bendjou-di y Hubert, 2002), que relaciona el perímetro de una mancha (P) y el perímetro de una circunferencia con la misma superficie que esa mancha (Ac):

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{Ac}} \quad [1]$$

La mancha será tanto más circular cuanto el índice sea más cercano a 1, aumentando cuando la mancha sea ovalada a rectangular.

— Errores de comisión. Aquellos puntos que no tienen ningún perímetro quemado a menos de 1.500 m de distancia se consideran detecciones incorrectas (falsos positivos). Se evalúa la cantidad total de puntos no asociados a perímetros, respecto al total de puntos de calor.

— Errores de comisión por cobertura del suelo. Puntos de calor no asociados a perímetros quemados para cada tipo de cobertura respecto al total de detectados. Se considera que las falsas detecciones pueden asociarse a cubiertas con presencia mixta de vegetación y suelo, a zonas urbanas o a suelos calientes.

— Finalmente, hemos calculado el número medio de puntos de calor que cae en cada perímetro quemado, considerando tamaños de incendios. Esto permitiría estimar superficies a partir de puntos.

Resultados

Incidencia del fuego en las áreas de estudio

En los 25 años acumulados y 5 zonas de estudio que presentamos en este trabajo se han cartografiado un total de 3.953 incendios, que han quemado 363.498 hectáreas. En la serie analizada, destaca especialmente el dato de Portugal, en 2003, momento en el que se quemaron más de 132.000 ha en 92 incendios. Este dato altera notablemente la serie, y fue debido a una estación particularmente severa de incendios en nuestro país vecino. El promedio de tamaño para los incendios para todas las zonas de estudio es de 92 ha, pero si exceptuamos el dato anómalo de Portugal 2003, el tamaño baja hasta 60 ha quemadas por incendio. Los incendios son más pequeños en Chile, con un promedio de 39 ha, tienen un valor intermedio en el centro de España (Cabañeros, 96 ha) y Portugal (95 ha, exceptuando el 2003) y son más altos en el interior de Valencia, con un promedio de 202 ha.

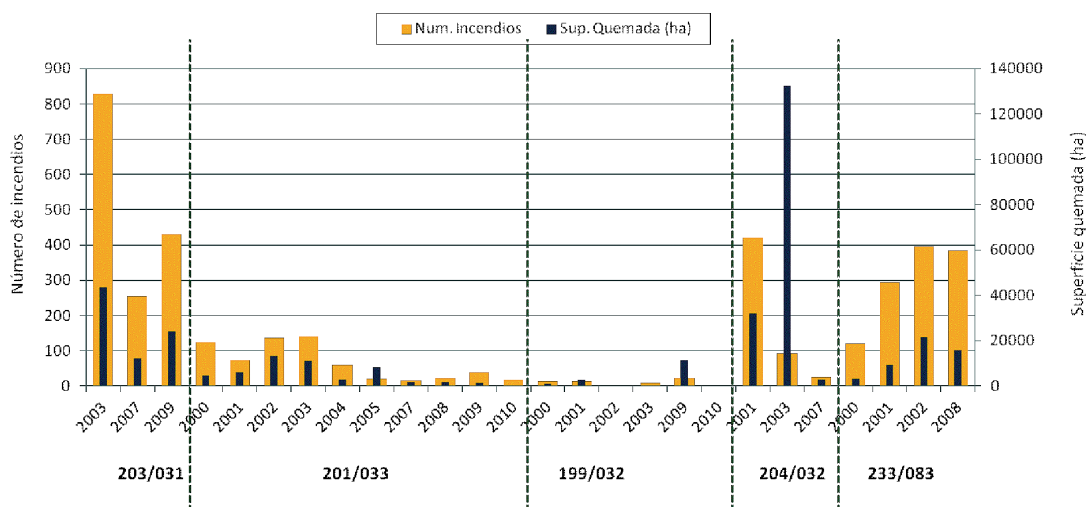


Figura 3. Distribución del número de incendios (línea) y superficie quemada (barras) por años en las distintas zonas de estudio.

Tabla 3. Distribución de los incendios por tamaños

Tamaño (ha)	Número de incendios	%	Área quemada (ha)	%
< 50 ha	3.216	81,36	38.923	10,71
50-100 ha	298	7,54	21.009	5,78
100-500 ha	349	8,83	72.366	19,91
> 500 ha	90	2,28	231.200	63,60
Total	3.953	100,00	363.498	100,00

Se observa una relación clara entre el número de incendios y la superficie quemada $r^2 = 0.87$ si exceptuamos el dato de Portugal de 2003, que alterna sustancialmente toda la serie. También sin considerar ese caso anómalo, el tamaño promedio de los incendios tiene una baja correlación tanto con el número de incendios ($r^2 = 0.04$) como con la superficie quemada ($r^2 = 0.001$), lo que indica que son bastante estables en cada zona de estudio, independientemente de que sea una temporada especialmente grave o no, siempre que no sea catastrófica. Por ejemplo, en el occidente peninsular (escena 203/031) el año 2003 se quemó casi cuatro veces más superficie que en 2007, y dos veces más que en 2009, pero el área promedio es muy similar en los tres años. En Cabañeros (201/033), los años de mayores incendios no se dan en las peores estaciones, ya que el mayor tamaño promedio anual (391 ha) se da en un año de incidencia media-alta, pero no extrema. Aquí sí se observa una mayor variabilidad de tamaños entre estaciones, desde los 14 ha por incendio de 2010 hasta las 390 de 2005.

La distribución del conjunto de los incendios por tamaños muestra un claro sesgo hacia

los incendios más pequeños, como es habitual en este fenómeno (tabla 3). El 81% de los incendios son menores de 50 ha, pero queman únicamente el 11 % de la superficie afectada. Por el contrario, el 2% de los incendios más grandes (superiores a 500 ha) queman más del 63% de la superficie, que se eleva al 84% si consideramos los superiores a 100 ha.

Relación entre puntos de calor y superficie quemada

Antes de analizar con más detalle las diferencias y acuerdos entre la detección de incendios que realizan los puntos de calor y los perímetros quemados Landsat, conviene hacer un primer análisis que muestre las tendencias entre estos dos conjuntos de datos. La relación entre puntos de calor y número de incendios es bastante baja ($r^2 = 0.10$: figura 4), puesto que existe una gran dispersión en los tamaños de los incendios, sobre todo si se consideran los datos de Portugal 2003, con una gran cantidad de incendios de gran tamaño, como hemos indicado. Si prescindimos de ese año, la relación aumenta notablemente ($r^2 = 0.76$), si bien se observan

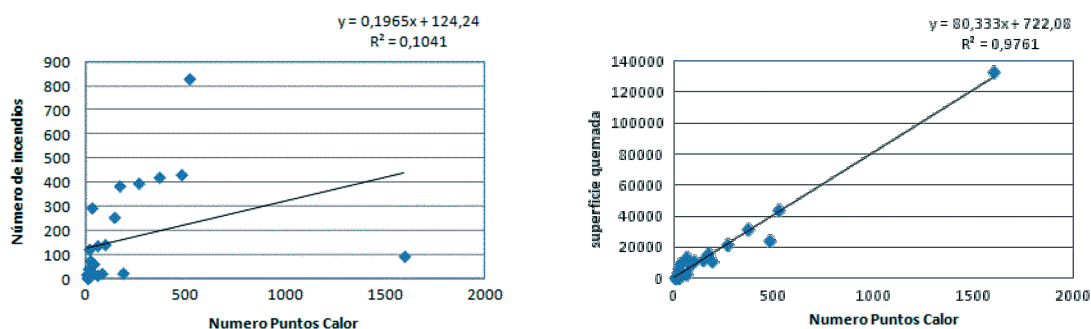
**Figura 4.** Relaciones entre puntos de calor y número de incendios (arriba) y superficie quemada (abajo).

Tabla 4. Error de omisión del producto MOD14 por tamaño de incendios

	< 50 ha	50-100 ha	100-500 ha	> 500 ha
203/031	0,86	0,73	0,62	0,30
201/033	0,80	0,69	0,43	0,29
199/032	0,73	0,00	0,00	0,00
204/032	0,68	0,46	0,31	0,00
233/083	0,87	0,74	0,52	0,56
Total	0,83	0,69	0,51	0,20

años con múltiples incendios pequeños en la imagen del occidente peninsular (203/031).

Por el contrario, las relaciones entre número de puntos de calor y superficie quemada es magnífica, tanto incluyendo la zona de Portugal 2003 ($r^2 = 0,976$), como sin considerar ese periodo especialmente catastrófico ($r^2 = 0.879$)

Incendios omitidos por los puntos de calor

En lo que se refiere a la capacidad de los puntos de calor para detectar perímetros quemados, dividimos la exposición entre los errores de omisión (falsos negativos) y los de comisión (falsos positivos). En teoría, la omisión puede venir dada o bien porque el incendio es muy pequeño para ser detectado por el sensor, o bien muy corto en el tiempo para estar activo en el momento de pasar el satélite.

En el caso del conjunto de datos que estamos analizando, se cumplen las expectativas iniciales, ya que claramente el error de omisión disminuye directamente con el tamaño de los incendios (tabla 4). Para los incendios más pequeños de 50 ha, los errores son muy altos en todas las zonas de estudio (entre 0.68 de Portugal y 0.87 de Chile), con un valor promedio de 0.83. Por el contrario, los incendios mayores tienen tasas de omisión relativamente bajas, salvo en el caso de Chile, en donde se observa una detección bastante baja, puesto que de los 9 incendios mayores a 500 ha sólo se detectaron 4. Para el centro de Portugal y el litoral mediterráneo, las tasas de detección de los incendios mayores son muy buenas (no hay errores de omisión), mientras en el occidente y centro peninsular se sitúan en torno al 0.3. La media global para los incendios superiores

a 500 ha es de 0.2, llegando a 0.4 si incluyéramos los incendios más grandes de 100 ha.

En la figura 5 se observa visualmente la relación entre perímetros y puntos de calor, para los casos de las escenas de Cabañeros y de Chile central. Se detecta cómo los incendios pequeños frecuentemente no tienen asociados puntos y algunos de los grandes, sólo en su inicio o finalización.

Para analizar la calidad de las tasas de detección en los distintos niveles de confiabilidad que señala el producto estándar MODIS, comparamos el número de perímetros detectados en cada nivel de confiabilidad, respecto al total detectado. Como cabría esperar (tabla 5), la tasa de detección aumenta para los puntos de calor más fiables, aunque no hay una diferencia muy evidente entre el nivel 2 y 3 (confiabilidad mayor del 30% o del 80%, respectivamente). De hecho, la tasa de detección es algo mayor para la confiabilidad intermedia en algunas de las zonas de estudio (Portugal), mientras se iguala en Chile central y costa mediterránea, y es ligeramente inferior en las otras dos. La confiabilidad más baja (<30%) presenta tasas de detección muy pequeñas, casi siempre inferiores al 5%.

En cuanto a la influencia de la cobertura del suelo en la tasa de detección, se ha considerado la clase de cobertura más frecuente en cada área (tabla 6), incluyendo sectores periurbanos, en donde son frecuentes los incendios en la zona de Chile central. Tal y como podíamos asumir, la tasa de detección es más alta (la omisión disminuye) para las clases con mayor biomasa (cubierta arbolada o matorral), frente al pastizal o vegetación estacional (humedales). En el primer grupo los errores de omisión se sitúan entre el 0.43 y el 0.48, mientras en el segundo rondan el 0.7. Las zonas agrícolas y pe-

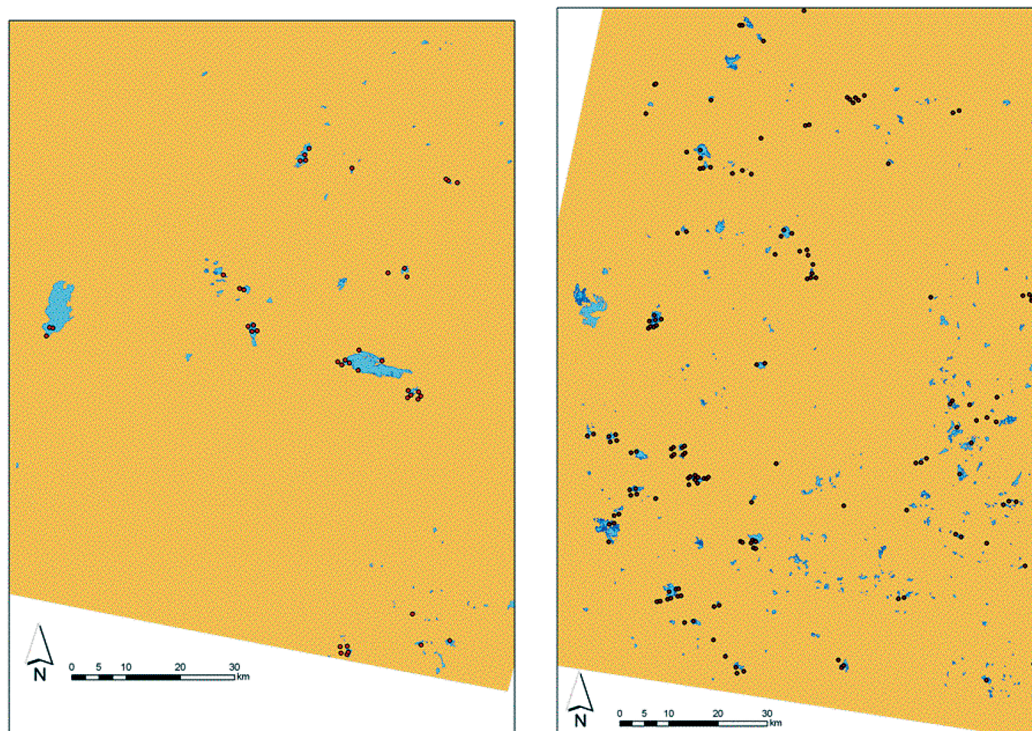


Figura 5. Perímetros quemados y puntos de calor para dos zonas y periodos de estudio: izquierda, 201/033 del año 2002 (centro de España); derecha, imagen 233/083 del año 2008 (Chile central).

Tabla 5. Proporción de perímetros detectados en cada nivel de fiabilidad respecto al total de perímetros detectados

	<30%	>30%-<80%	≥80%
203/031	0,07	0,39	0,54
201/033	0,02	0,45	0,53
199/032	0,00	0,50	0,50
204/032	0,14	0,81	0,55
233/083	0,02	0,49	0,49
Total	0,07	0,53	0,53

riurbanas se sitúan a medio camino entre ambos grupos, con errores de omisión entre 0.51 y 0.57.

Respecto al efecto de la forma en la detectabilidad de los incendios, no se observa una tendencia clara en los incendios de menor tamaño (< 50 ha), mientras en los de medio tamaño sí se aprecia que los errores disminuyen cuanto más alargado se hace el perímetro, aunque conviene considerar que en incendios más grandes el índice de Gravelius casi siempre supera el valor umbral de 1.5, y apenas hay casos de incendios compactos (tabla 7). Por esta

Tabla 6. Proporción de perímetros detectados por tipo de cobertura del suelo

	Detectados	No detectados	Error omisión
Urbana	52	55	0,51
Agrícola	511	684	0,57
Pastizal	77	161	0,68
Superficie arbolada	533	491	0,48
Matorral	916	704	0,43
Humedales	34	79	0,70
Total	2.123	2,174	0,51

Tabla 7. Errores de omisión en función del tamaño y forma de los incendios, de acuerdo al índice de compacidad de Gravelius

	<1,25	1,25 - 1,5	>1,5	Promedio
< 50 ha	0,858	0,836	0,828	0,831
50-100 ha	1,000	0,688	0,690	0,692
100-500 ha	1,000	0,500	0,450	0,452
> 500 ha	—	—	0,202	0,202
Total	0,861	0,830	0,756	0,772

razón, aunque el contraste entre formas arroja una tendencia clara, debería matizarse por el escaso número de casos en los intervalos más circulares.

Puntos de calor erróneos

Los errores de comisión se definen como puntos de calor que no se asocian a ningún perímetro quemado y, por tanto, pueden considerarse como falsos positivos. Para reducir el impacto de un posible desplazamiento entre imágenes MODIS y Landsat, se ha considerado como error de comisión al punto de calor que se situaba a más de 1500 m de cualquier perímetro quemado. Eso supone conceder un margen de desplazamiento de 1 pixel sobre la resolución original del producto MOD14.

En este análisis sí se han considerado todas las imágenes disponibles para todas las zonas de estudio, independientemente de que tuvieran o no el efecto del bandeo, ya que aquí no consideramos el tamaño de las manchas quemadas. De los casi 8000 puntos de calor detectados para todas las zonas y años disponibles, se han registrado algo más de 1.200 (un 15%) que no estaban asociados a ningún perímetro quemado (tabla 8). La tasa de error es similar

en las distintas zonas de estudio salvo el caso de Portugal que ofrece un bajísimo error (0.02). El occidente peninsular, la costa del Mediterráneo y Chile central presentan valores similares, en torno al 20%, mientras el centro de la Península ofrece un valor próximo al 10%.

En lo que se refiere a las cubiertas del suelo que presentan mayores errores de comisión, destacan las zonas agrícolas, en las que se sitúan más de un 30% de los falsos positivos, con especial importancia en la zona de Cabañeros, que superan el 50% (tabla 9). Siguen en importancia las zonas arboladas y de matorral, con una proporción cercana al 25%. Las zonas urbanas arrojan errores altos de comisión considerando la superficie que ocupan.

Finalmente, hemos calculado el número medio de puntos de calor por cada perímetro quemado, en función de su tamaño. La tendencia general es bastante clara, pero se observan diferencias notables entre las distintas áreas de estudio, con los valores promedio más bajos para la zona de Cabañeros, donde sólo hay 9 puntos de calor por cada incendio de más de 500 ha, frente a la zona del centro de Portugal con más de 56 puntos de calor. Lógicamente, la distribución en tamaños incluye notables diferencias, especialmente en esta última categoría y considerando los grandes incendios de

Tabla 8. Errores de comisión del producto MOD14 para las distintas zonas de estudio

Zona	Puntos > 1.500 m	Número puntos	Error comisión
203/031	756	3.784	0,20
201/033	42	344	0,12
199/032	74	410	0,18
204/032	41	1.997	0,02
233/083	303	1.441	0,21
Total	1.216	7.976	0,15

Tabla 9. Proporción de puntos de calor erróneos en distintas coberturas del suelo

	203/031	201/033	199/032	204/032	Promedio
Urbana	0,00	0,12	0,32	0,02	0,12
Agrícola	0,31	0,52	0,24	0,34	0,35
Pastizal	0,03	0,12	0,01	0,02	0,05
Arbolado	0,18	0,10	0,20	0,44	0,23
Matorral	0,47	0,02	0,22	0,15	0,22
Humedales	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01

Tabla 10. Número medio de puntos de calor por cada área quemada para las distintas áreas de estudio

	203/031	201/033	199/032	204/032	233/083	Promedio
< 50 ha	2,26	1,16	0,50	1,78	1,25	1,43
50-100 ha	3,54	2,33	0,75	3,63	2,25	2,56
100-500 ha	4,96	3,39	4,00	4,29	3,37	4,16
> 500 ha	16,16	8,92	48,75	56,93	29,00	32,69

Portugal del 2003. También se observa el impacto de grandes incendios en la imagen del litoral mediterráneo (con casi 50 puntos de calor por área quemada para los incendios superiores a 50 ha).

Discusión

La muestra que hemos utilizado para la mayor parte de los resultados de este trabajo puede considerarse bastante representativa de los incendios que ocurren en el ecosistema mediterráneo, ya que incluye una serie temporal amplia (10 años en algunos casos) y espacial diversa (5 escenas en 3 países distintos). La tendencia promedio en la ocurrencia se aproxima a los datos disponibles para el conjunto de España, por ejemplo, donde la base de datos del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino indica que el 40% de la superficie quemada del país se produce en incendios mayores a 500 ha, alcanzando el 68% para los incendios mayores a 100 ha. Nuestros datos superan ambos umbrales, pero siguen marcando la importancia de los incendios medios y grandes en la ocurrencia global del fuego. En la serie analizada, destaca la altísima ocurrencia de Portugal en el 2003, y también el alto número de puntos de calor para la escena 203/031 en 2003, aunque con incidencia mucho más limitada.

Del análisis realizado en este artículo podemos concluir que los puntos de calor son buenos descriptores de los incendios medios y grandes ocurridos en una determinada zona, pero no describen adecuadamente la ignición, por un lado, ya que apenas recogen incendios de tamaño pequeño y, por otro, muchos puntos de calor pueden referirse al mismo incendio si es suficientemente grande y extenso en el tiempo. Por estas razones, la correlación calculada entre número de incendios y número de puntos de calor es bastante baja, especialmente si incluimos la escena y el periodo de mayor impacto (Portugal 2003).

No obstante, puesto que esos incendios pequeños son poco representativos en términos de superficie afectada, la relación entre número de puntos de calor y superficie quemada es muy alta, con coeficientes de determinación superiores al 97%. Similares resultados se han observados por otros autores, si bien las relaciones encontradas eran bastante dependientes de la proporción de arbolado y de la distribución del tamaño de incendios (Giglio *et al.*, 2005a)

Cada punto de calor en el modelo de regresión resultante equivale a unas 81 hectáreas quemadas. Los valores más altos se observaron en los primeros años de la serie (2001 y 2002), lo cual puede estar afectado por tres factores: a) la revisión del algoritmo de detección

que se realizó en 2003, b) la incorporación de una nueva máscara de nubes y, sobre todo, el lanzamiento del satélite Aqua, con otro sensor MODIS a bordo, que mejoró notablemente las tasas de detectabilidad obtenidas previamente solo con Terra.

En relación con la distribución de la ocurrencia del fuego por tamaño de incendio se observa una clara limitación del producto MOD14 para detectar los incendios de menor tamaño (<50 ha), con errores que superan con frecuencia el 80% de los casos. La confiabilidad del producto aumenta a medida que los incendios son más grandes, lográndose errores de omisión muy bajos con incendios superiores a 500 ha, salvo en los primeros años de la serie donde se mantienen errores próximos al 25%. En suma, al menos para ecosistemas mediterráneos, los puntos de calor solo recogen parcialmente la variedad en los regímenes de incendio y sería algo arriesgado basarse en estos datos para establecer funciones entre número de eventos y superficie afectada.

En cuanto a los factores de control, nuestros resultados indican que los valores de fiabilidad alto y muy alto que recoge el producto ofrecen similares niveles de detectabilidad, siendo conveniente por tanto incluir ambos para mejorar la muestra de puntos para detectar perímetros quemados. Respecto a los tipos de cobertura, se observaron diferencias sustanciales entre los pastos y humedales, con niveles más altos de omisión, y las clases con mayor biomasa, principalmente arbolado y matorral, donde es lógico suponer que los incendios tendrán mayor temperatura. La forma del perímetro quemado no puede considerarse un factor muy destacado en la detectabilidad, si bien tienen a ser mejor discriminados los incendios alargados que los circulares.

La detección de falsos positivos se sitúa en torno al 15% de los puntos de calor, con valores algo más altos en Chile central y más bajos en el litoral mediterráneo y en la zona de Cabañeros. Las principales confusiones se dan en zonas agrícolas, principalmente en la zona de Cabañeros.

En caso de que se utilizaran los puntos de calor como semilla para correr algoritmos de crecimiento de regiones o contexto, nuestros resultados indican que la fiabilidad de las de-

tecciones sería alta para incendios medios y grandes (>100 ha), donde cada perímetro tiene una alta probabilidad de tener al menos un punto de calor (generalmente son bastantes más). No obstante, ese enfoque dejaría fuera los incendios más pequeños, y se tendría que establecer algún criterio para evitar los errores de comisión, que podrían incrementar notablemente las falsas detecciones, especialmente en zonas agrícolas, donde la continuidad espacial es muy alta.

Agradecimientos

Parte de este trabajo se ha realizado con apoyo del proyecto fire_cci financiado por la Agencia Espacial Europea. Se agradecen sinceramente las sugerencias de los revisores anónimos.

Referencias

- BASTARRIKA, A., CHUVIECO, E., & MARTÍN, M. P. 2011. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*. 115: 1003-1012.
- BENDJOUDI, H., & HUBERT, P. 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des basins versants. *Hydrological Sciences Journal*, 47(6): 921-930.
- BOND, W. J., WOODWARD, F. I., & MIDGLEY, G. F. 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist*. 165: 525-537.
- BOWMAN, D. M. J. S., BALCH, J. K., ARTAXO, P., BOND, W. J., CARLSON, J. M., COCHRANE, M. A., D'ANTONIO, C. M., DEFRIES, R. S., DOYLE, J. C., HARRISON, P. S. P., JOHNSTON, F. H., KEELEY, J. E., KRAWCHUK, M. A., KULL, C. A., MARSTON, J. B., MORITZ, M. A., PRENTICE, I. C., ROOS, C., SCOTT, A., SWETNAM, T., VAN DER WERF G., & PYNE, S. J. 2009. Fire in the Earth system. *Science*. 324: 481-484.
- CSISZAR, I., DENIS, L., GIGLIO, L., JUSTICE, C. O., & HEWSON, J. 2005. Global fire activity from two years of MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*. 14: 117-130.
- CSISZAR, I. A., MORISETTE, J. T., & GIGLIO, L. 2006. Validation of active fire detection from moderate-resolution satellite sensors: The MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Trans-*

- actions on *Geoscience and Remote Sensing*. 44: 1757-1764.
- CHANG, D., & SONG, Y. 2009. Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007. *Journal of Geophysical Research*. 114.
- CHUVIECO, E., ENGLEFIELD, P., TRISHCHENKO, A. P., & LUO, Y. 2008. Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. *Remote Sensing of Environment*. vol. 112: 2381-2396.
- DWYER, E., PEREIRA, J. M. C., GRÉGORIE, J.-M., & 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.
- FAO 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main report. Food and Agricultural Organization, *Forestry Paper* 163, Rome.
- FRASER, R. H., LI, Z., & CIHLAR, J. 2000. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*. 74: 362-376.
- GIGLIO, L. 2005. MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide. Version 2.2. University of Maryland, Colle Park.
- GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C. O., & KAUFMAN, Y. J. 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 87: 273-282.
- GIGLIO, L., LOBODA, T., ROY, D. P., QUAYLE, B., & JUSTICE, C. O. 2009. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*. 113: 408-420.
- GIGLIO, L., RANDERSON, J. T., VAN DER WERF, G. R., KASIBHATLA, P. S., COLLATZ, G. J., MORTON, D. C., & DEFRIES, R. S. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences Discuss*. 7: 1171-1186, doi:1110.5194/bg-1177-1171-2010,.
- GIGLIO, L., VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., & KASIBHATLA, P. 2005a. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 5: 11091-11141.
- GIGLIO, L., VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., & KASIBHATLA, P. S. 2005b. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 5: 11091-11141.
- HARRISON, S. P., MARLON, J. R., & BARTLEIN, P. J. 2010. Fire in the Earth System. en J. Dodson (Ed). *Changing Climates, Earth Systems and Society*. Springer Netherlands, pp. 21-48.
- KLOSTER, S., MAHOWALD, N., RANDERSON, J., THORNTON, P. E., HOFFMAN, F., LEVIS, S., LAWRENCE, P., FEDDEMA, J., OLESON, K., & LAWRENCE, D. 2010. Fire dynamics during the 20th century simulated by the Community Land Model. *Biogeosciences Discuss*. 7: 1877-1902.
- LI, Z. Q., FRASER, R., JIN, J., ABUELGASIM, A. A., CSISZAR, I., GONG, P., PU, R., & HAO, W. 2003. Evaluation of algorithms for fire detection and mapping across North America from satellite. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 108: D2, 4076, doi:10.1029/2001JD001377.
- MORISSETTE, J. T., GIGLIO, L., CSISZAR, I., & O. JUSTICE, C. 2005. Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*. 26: 4239-4264.
- PU, R. L., LI, Z. Q., GONG, P., CSISZAR, I., FRASER, R., HAO, W.-M., KONDRAGUNTA, S., & WENG, F. 2007. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire North America from NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 108: 198-208.
- RANDERSON, J. T., LIU, H., FLANNER, M. G., CHAMBERS, S. D., JIN, Y., HESS, P. G., PFISTER, G., MACK, M. C., TRESEDER, K. K., WELP, L. R., CHAPIN, F. S., HARDEN, J. W., GOULDEN, M. L., LYONS, E., NEFF, J. C., SCHUUR, E. A. G., & ZENDER, C. S. 2006. The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science*. 314: 1130-1132.
- ROY, D. P., BOSCHETTI, L., & JUSTICE, C. O. 2008. The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*. 112: 3690-3707.
- ROY, D. P., GIGLIO, L., KENDALL, J. D., & JUSTICE, C. O. 1999. Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. *International Journal of Remote Sensing*. 20: 1031-1038.
- SCHROEDER, W., PRINS, E., GIGLIO, L., CSISZAR, I., SCHMIDT, C., MORISSETTE, J., & MORTON, D. 2008. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*. Volume 112: 2711-2726.
- TANSEY, K., GRÉGOIRE, J. M., DEFOURNY, P., LEIGH, R., PECKEL, J. F., BOGAERT, E. V., & BARTHOLOME, J. E. 2008. A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution. *Geophysical Research Letters*. 35, L01401, doi:10.1029/2007GL03156.
- VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., & GIGLIO, L. 2003. Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*. 9: 547-562.
- VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., GIGLIO, L., KASIBHATLA, P. S., ARELLANO, A. F., OLSEN, S. C., & KASISCHKE, E. S. 2004. Continental scale-partitioning

- of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science*. 303: 73-76.
- VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., GIGLIO, L., COLLATZ, G., MU, M., KASIBHATLA, P. S., MORTON, D. C., DEFRIES, R. S., JIN, Y., & VAN LEEUWEN, T. T. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10: 11707-11735.
- VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., GIGLIO, L., COLLATZ, G. J., KASIBHATLA, P. S., & ARELLANO, A. F. 2006. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6: 3423-3441.