

# Estudio de la operacionalidad del futuro sensor Sentinel-3/SLSTR para la parametrización del fuego activo

A. Calle<sup>1</sup>, P. Salvador<sup>2</sup> y F. González-Alonso<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Univ. de Valladolid

<sup>2</sup> Laboratorio de Teledetección de la Univ. de Valladolid

<sup>3</sup> CIFOR-INIA. Madrid

---

## Resumen

La estimación de parámetros térmicos en los fuegos activos, como la FRP (*Fire Radiative Power*) es un método adecuado para determinar la severidad del incendio. En la literatura se encuentran varios métodos semiempíricos para calcular la FRP. Por otra parte el instrumento Sentinel-3/SLSTR dispone de dos bandas espectrales dedicadas a la observación del fuego activo, que permite parametrizar el fuego en una gran variedad de condiciones no afectadas por la saturación del sensor. Esta contribución analiza dichas aproximaciones, que serán implementadas en el futuro sensor Sentinel-3/SLSTR, para clarificar sus requerimientos y restricciones.

**Palabras clave:** FRP, Sentinel-3, SLSTR.

## Abstract

### Suitability study of the future sensor Sentinel-3/SLSTR for monitoring the active fire

The estimation of thermal parameters on the active fires, as the FRP (*Fire Radiative Power*) is a suitable method in order to analyze the fire severity. In the literature it's possible to find several semi empiric methods to calculate the FRP. On the other hand, the Sentinel-3/SLSTR instrument has two spectral bands dedicated to active fire observation to parameterize the fire in a range of conditions not affected by the sensor saturation. This contribution analyzes several technical approaches to be implemented in the future Sentinel-3/SLSTR, in order to clarify the requirements and restrictions.

**Key words:** FRP, Sentinel-3, SLSTR.

---

## Introducción

Los incendios forestales y las quemaduras de biomasa tienen un gran impacto en el cambio climático y en el ciclo del carbono a nivel global, pues cada año emiten 0,5 Pg de C netos, no compensados por la regeneración de la vegetación. Esta cantidad representa aproximadamente el 50% de las emisiones LUC (*Land Use Change*) y el 5% de las emisiones totales de C en el mundo, de aproximadamente 10 Pg de C en el año 2010.

De acuerdo al documento GCOS (*Global Climate Observing System*) «*Systematic Observa-*

*tion Requirements for Satellite-based products for Climate*», y la iniciativa de la ESA de estudio de variables climáticas esenciales, las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, producidas por los incendios y la quema de biomasa, son importantes factores de forzamiento climático, contribuyendo en promedio entre 25-35% al total de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, así como el CO, metano y aerosoles.

La pérdida del satélite ENVISAT ha supuesto un grave inconveniente para el estudio de los incendios forestales en el mundo y esta circunstancia da una mayor importancia al pa-

---

\* Autor para la correspondencia: abel.calle@fa1.uva.es  
Recibido: 05-11-13; Aceptado: 28-11-13.

pel que deberán desempeñar los futuros satélites Sentinel 3 y Sentinel 2 en este tipo de aplicaciones. El gran reto de los satélites Sentinel-3 y Sentinel-2 en el estudio y monitorización de los incendios forestales en el mundo, será la implementación de un sistema global operacional que permita realizar el seguimiento de los focos activos y las áreas quemadas en tiempo real en internet, para de esta forma dar cumplimiento al requerimiento realizado por GCOS en esta materia. Este futuro sistema deberá ser complementario del sistema MODIS *Web Fire Mapper* y su continuación con el sistema VIIRS-NPP recientemente lanzado.

En el estudio de los incendios forestales mediante técnicas de teledetección se pueden considerar varias temáticas como los mapas de riesgo, la cartografía de áreas quemadas, la detección y los parámetros térmicos de los focos activos y la estimación de la severidad (González-Alonso *et al.*, 2006). Las principales magnitudes físicas de los incendios son la FRE (*Fire Radiative Energy*), en el caso de las plataformas geostacionarias y FRP (*Fire Radiative Power*), en el caso de los satélites de órbita polar. Estas magnitudes son importantes en la evaluación de la gravedad de los incendios y las consecuencias ecológicas de los mismos, y pueden ser el punto de partida para evaluar las emisiones producidas por las quemaduras de biomasa. El producto de detección de incendios proporcionados por el ATSR (*Advanced Along-Track Scanning Radiometer*) Atlas Mundial de Incendios ha sido una valiosa herramienta indispensable para el seguimiento de los focos activos.

La FRP (*Fire Radiative Power*) es la magnitud asociada a la radiancia térmica que explica los efectos ecológicos provocados por la actividad del fuego; es la componente química liberada a partir de la quema de la vegetación y emitida como radiación durante el proceso de combustión. La FRP fue introducida por Kaufman *et al.* (1996) como una magnitud útil para estimar la velocidad de combustión de la biomasa y las emisiones asociadas. Ichoku *et al.* (2008) también emplearon la FRP y el FRE para clasificar la severidad de los incendios forestales en base a la biomasa quemada en los mismos.

El método de Dozier inicialmente desarrollado para su implementación en las imágenes

AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) es una técnica biespectral que usa la radiancia en el MIR (*Middle InfraRed*, 3-4  $\mu\text{m}$ ) y TIR (*Thermal InfraRed*, 10-12  $\mu\text{m}$ ) para estimar la fracción del píxel afectado por el fuego y la temperatura del fuego (Dozier, 1981), ambos valores están involucrados en la estimación de la FRP. Sin embargo la parametrización del fuego mediante técnicas de Teledetección presenta múltiples fuentes de error debido a las condiciones atmosféricas indeterminadas y el valor desconocido de la emisividad, principalmente, de forma que el sistema de ecuaciones biespectrales debe ser resuelto por métodos numéricos.

Por lo que respecta a sensores heliosíncronos, el algoritmo de detección de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Giglio *et al.*, 2003) es la metodología de referencia para aplicar a otros sensores. El producto de fuego de MODIS, descrito por Justice *et al.* (2006) propone la estimación de la FRP empleando una relación empírica con la temperatura de brillo de la banda MIR, evitando así la resolución del sistema de ecuaciones biespectral. A partir del algoritmo de MODIS, antes mencionado, Wooster *et al.* (2012) han desarrollado un algoritmo de detección de fuego activo para ser implementado en el futuro sensor Sentinel-3/SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) con resultados validados; para calcular la FRP proponen una relación semiempírica basada en estudios previos sobre el satélite BIRD (Bi-spectral InfraRed Detection) (Wooster *et al.*, 2003).

El programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), ahora *Copernicus*, es una iniciativa de la Comisión Europea y la ESA, cuyo objetivo es evaluar la capacidad europea para el suministro y el uso de los servicios operativos. La contribución de GMES al estudio de los incendios forestales está representada por los satélites Sentinel-3 y Sentinel-2. Debe tenerse en cuenta que, actualmente, con la interrupción de los servicios de Envisat, el estudio de idoneidad de los algoritmos de detección de focos activos que se apliquen a Sentinel-3 es una tarea científica necesaria y urgente. El futuro instrumento Sentinel-3/SLSTR, descrito por Coppo *et al.* (2010), es una versión mejorada de Envisat/AATSR (*Advanced*

**Tabla 1:** Características radiométricas de las bandas espectrales térmicas del sensor SLSTR sensor. Esta tabla está adaptada de Coppo *et al.* (2010) donde puede ser encontrada una descripción extensa del sensor.

Banda	Región	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Rango $T$ (K)	Temp. ref.	$NE\Delta T$ (mK)
S7	MIR	3.74	0.38	200-323	270	56
S8	TIR	10.85	0.9	200-321	270	29
S9	TIR	12	1.0	200-318	270	21
F1	MIR	3.74	0.38	285-500	285-500	680-16
F2	TIR	10.85	0.9	230-400	230-400	79-35

$\lambda$  es la longitud de onda central,  $\Delta\lambda$  es la anchura espectral,  $T$  es la temperatura de brillo en el techo de la atmósfera,  $NE\Delta T$  es el ruido equivalente en diferencia de temperatura.

*Along-Track Scanning Radiometer*) que se pondrá en marcha dentro de Copernicus. SLSTR proporcionará mediciones en nueve bandas espectrales, que cubre la región espectral [0.55-12] micras, dos de los cuales están optimizados para la vigilancia de incendios. El principal objetivo de la misión Sentinel-3 es medir la topografía de la superficie marina, temperatura del mar y tierra y el color de océano con una precisión de alta calidad y fiabilidad en apoyo de los sistemas de predicción oceánica, y para la vigilancia del medio ambiente y el clima. El sensor SLSTR proporciona una corrección atmosférica más avanzada de AATSR; su resolución espacial en las bandas visible e infrarrojo medio es de 500 m, a 1 km en los canales de infrarrojo térmico. La Tabla 1, adaptada de Coppo *et al.* (2010) muestra las bandas espectrales térmicas (con una resolución espacial de 1 km), y sus características radiométricas. Las bandas espectrales dedicadas a la observación fuego son F1 y F2.

En este trabajo presentamos una discusión acerca de la idoneidad de los procedimientos anteriormente mencionados para la determinación de la FRP. Dichas técnicas son aplicadas a situaciones simuladas mediante un modelo de transferencia radiativa, basado en las características espectrales de SLSTR, con el objetivo de analizar el impacto de las condiciones atmosféricas en las estimaciones de FRP. Los principales resultados técnicos de esta aportación se encuentran recogidos en Calle and Salvador (2013); aquí han sido añadidos algunos resultados correspondientes al análisis de la función de respuesta espectral y las condiciones de saturación del sensor, entre otros.

## Algoritmos para estimar la FRP

Los parámetros del incendio, temperatura de fuego  $T_f$ , y fracción del píxel ardiendo,  $p$ , pueden ser obtenidos mediante la metodología de Dozier (1981) que está basada en la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} L_{MIR} = p B(\lambda_{MIR}, T_f) + (1-p) B(\lambda_{MIR}, T_{surf}) \\ L_{TIR} = p B(\lambda_{TIR}, T_f) + (1-p) B(\lambda_{TIR}, T_{surf}) \end{cases} \quad [1]$$

donde  $L_{MIR}$  y  $L_{TIR}$  son las radiancias salientes del píxel a nivel de la superficie, en las regiones espectrales de 3-4  $\mu\text{m}$  y 11  $\mu\text{m}$ , respectivamente, y  $B(\lambda, T)$  es la función de Planck que involucra la longitud de onda,  $\lambda$ , y la temperatura,  $T$ .  $T_{surf}$  es la temperatura de la superficie no afectada por el fuego. Puede consultarse un esquema basado en esta metodología en términos de radiancias atmosféricas en Giglio y Kendal (2001). La FRP es determinada mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$FRP = p A_{sampler} \sigma T_f^4 \quad [2]$$

donde  $A_{sampler}$  es el area total del píxel (en  $\text{km}^2$ ),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) y FRP está expresada en MW.

En el producto de incendios de MODIS (Justice *et al.*, 2006) la FRP se determina mediante la relación empírica (Kaufman *et al.*, 1998):

$$FRP_{8th} = C \left( T_{MIR}^8 - \bar{T}_{MIR}^8 \right) A_{sampler} \quad [3]$$

donde  $T_{MIR}$  es la temperatura de brillo en 4  $\mu\text{m}$  en el píxel detectado,  $\bar{T}_{MIR}$  es el promedio de la temperatura de brillo del fondo (no afectada por fuego) en 4  $\mu\text{m}$ , y  $A_{sampler}$  es el área total (en  $\text{km}^2$ ) del píxel.  $C$  es una constante empírica de-

terminada para la banda espectral de 4  $\mu\text{m}$  de MODIS ( $C_{MODIS} = 4.34 \times 10^{-19} \text{ MWK}^{-8} \text{ km}^{-2}$ ). La  $FRP$  (en MW) será denominada, en adelante,  $FRP_{8th}$ , debido a su dependencia en la 8ª potencia de la temperatura de brillo.

Un algoritmo para la detección del fuego activo ha sido propuesto para ser aplicado al sensor Sentinel-3/SLSTR por Wooster *et al.* (2012). En cada pixel afectado por fuego, la  $FRP$  es calculada usando la radiancia  $MIR$  mediante el método explicado por Wooster *et al.* (2003):

$$FRP_{4th} = \frac{A_{sampler}}{10^6 \tau_{MIR}} \left( \frac{\sigma}{a} \right) \left( L_{MIR} - \bar{L}_{MIR} \right) \quad [4]$$

Donde  $A_{sampler}$  es el área de la proyección del FOV (*Field Of View*) del sensor, en  $\text{m}^2$ ,  $s$  es la constante de Stefan-Boltzmann constante,  $\bar{L}_{MIR}$  es la radiancia espectral, en la banda  $MIR$ , del pixel afectado por el fuego ( $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ), es el promedio de la radiancia espectral  $MIR$  de los pixeles de fondo ( $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ),  $\tau_{MIR}$  es la transmitancia atmosférica en la banda espectral  $MIR$  (calculada como una función del contenido total de la columna de vapor de agua) y  $a$  ( $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Im}^{-1} \text{K}^{-4}$ ) es el factor de la relación entre la radiancia espectral y la 4ª potencia de la temperatura; esto es: la radiancia espectral  $L(\lambda, T)$  emitida por un cuerpo negro a la longitud de onda  $\lambda$  está dada por la función de Planck, la cual puede ser aproximada, en el rango de las 4  $\mu\text{m}$ , por la relación potencial:  $L(\lambda) = aT^{4.0}$ ; debe notarse que el método de la radiancia es válido solamente para temperaturas de fuego superiores a 600 K; no existe comportamiento lineal por debajo de dicho valor.  $FRP_{4th}$  está expresada en MW.

## Metodología

Una diversidad de incendios han sido simulados mediante MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmision*) (Berk *et al.*, 1996) para calcular la radiancia emitida al nivel TOA (*Top of Atmosphere*) y recibida por el sensor SLSTR. Los escenarios de datos simulados son descritos por los intervalos de los parámetros:  $T_f \in [400 \text{ K}, 1100 \text{ K}]$ ,  $p \in [1e-5, 0.4]$  y transmitancia atmosférica  $\tau_{MIR} \in [0.69,$

0.88];  $\tau_{TIR}$  fue calculada de forma que  $\tau_{MIR}$  y  $\tau_{TIR}$  estaban relacionados mediante perfiles atmosféricos estándar (no se consideraron variaciones arbitrarias entre ellas). La radiancia espectral fue integrada usando funciones de respuesta cuadrada para las bandas del fuego SLSTR, F1 ( $\lambda = 3.74 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.38 \mu\text{m}$ ) y F2 ( $\lambda = 10.85 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ ) (para una descripción de SLSTR consultar Coppo *et al.*, 2012), y usando un valor nominal de  $A_{sampler}$  de  $1 \text{ km}^2$ . La  $FRP$  de los fuegos simulados (en adelante  $FRP_{TRUE}$ ) fue calculada mediante los valores simulados de  $p$  y  $T_f$  y la ecuación [2] (Notar que  $FRP_{TRUE}$  no depende de la transmitancia atmosférica). La temperatura de la superficie no afectada por el fuego fue considerada a 300 K. Respecto a los valores representativos de emisividad de fondo se tomaron  $\epsilon_{MIR} = 0.85$  (banda de 3.74  $\mu\text{m}$ ) y  $\epsilon_{TIR} = 0.9$  (banda de 10.85  $\mu\text{m}$ ) y el fuego fue considerado como cuerpo negro. Aunque dichos valores son bajos para vegetación verde, son adecuados para vegetación senescente, de acuerdo a Salisbury y D'Aria (1994, a y b).

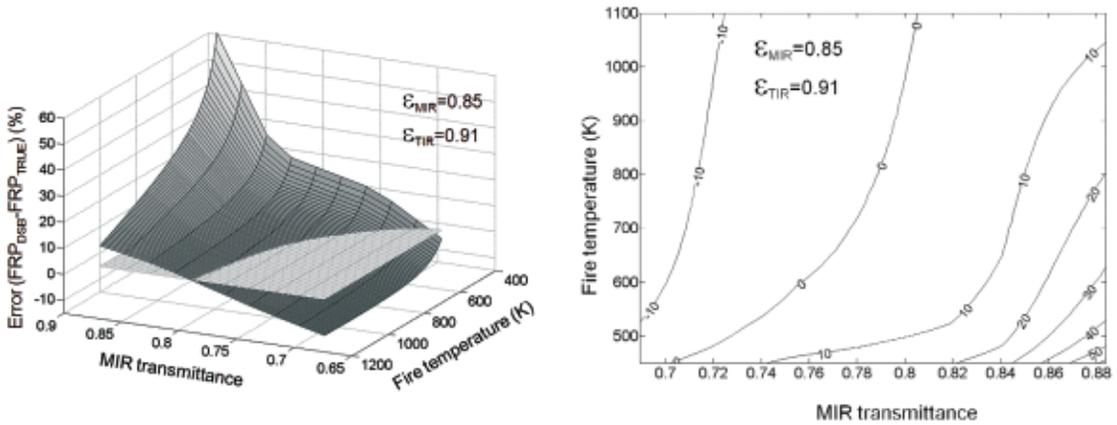
Para estimar la  $FRP$  mediante el método de Dozier y la ley de Stefan-Boltzmann (en adelante  $FRP_{DSB}$ ), se propone un algoritmo iterativo, basado en las radiancias  $TOA$   $MIR$  y  $TIR$  observadas por el sensor, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$L_j = \tau_j p B(\lambda_j, T_f) + (1-p) \bar{L}_j \quad j = MIR, TIR \quad [5]$$

donde  $j$  es la banda espectral ( $MIR$  y  $TIR$ ),  $L_j$  es la radiancia  $TOA$  proporcionada por el sensor,  $\tau_j$  es la transmitancia atmosférica,  $B(\lambda, T)$  es la función de Planck,  $T_f$  es la temperatura del fuego,  $p$  es la fracción del píxel afectada por el fuego, y  $\bar{L}_j$  es el promedio de la radiancia  $TOA$  de los pixeles de fondo; notar que este término incluye la dependencia con la transmitancia atmosférica y la emisividad. Para determinar  $T_f$ , se resuelve la siguiente ecuación mediante método iterativo:

$$\frac{\left( L_{MIR} - \bar{L}_{MIR} \right)}{\tau_{MIR} B(\lambda_{MIR}, T_f) - \bar{L}_{MIR}} = \frac{\left( L_{TIR} - \bar{L}_{TIR} \right)}{\tau_{TIR} B(\lambda_{TIR}, T_f) - \bar{L}_{TIR}} \quad [6]$$

La fracción del fuego,  $p$ , se determina, finalmente, desde cualquiera de las dos ecuaciones [5] y la  $FRP$  ( $FRP_{DSB}$ ) se obtiene de la ecuación [2]. Teniendo en cuenta que las condiciones atmosféricas son desconocidas cuan-



**Figura 1.** a) Porcentaje de error, en la estimación de  $FRP_{DSB}$ ; gráfica del error como función de la transmitancia  $MIR$  y la temperatura del fuego; el nivel de error 0% es mostrado como referencia. b) Líneas de error, generadas como la intersección de la gráfica 3D con planos de error en el intervalo  $[-10\%, 50\%]$ .

do el método es aplicado, en la simulación de los fuegos han sido usados promedios de  $\tau_{MIR}$  y  $\tau_{TIR}$ . Los errores en  $T_f$  y  $p$  no son significativos cuando varía la transmitancia atmosférica usada en la simulación.

Cuando se usa una transmitancia promediada los errores máximos encontrados, en el intervalo de transmitancias descrito anteriormente, fueron de 60 K, en  $T_f$ , y 70%, en  $p$  (para  $p = 10^{-3}$ ). Notar que, en la estimación de la  $FRP$ , el impacto del error en  $p$  es muy inferior al error en  $T_f$ .

Por lo que respecta a la estimación de  $FRP_{8th}$ , usada en el producto MODIS, fue determinada una nueva constante para SLSTR,  $C_{SLSTR}$ , para ser utilizada en la ecuación [3]. Para dicho cálculo solo se aplicaron condiciones de pixel no saturado; así, mediante  $FRP$  simuladas y características espectrales del sensor SLSTR, la constante  $C_{SLSTR} = 4.48 \times 10^{-19} \text{ MWK}^{-8} \text{ km}^{-2}$  fue estimada mediante una regresión lineal ( $R^2 = 0.94$ ). Notar que  $C_{SLSTR}$  es ligeramente diferente de  $C_{MODIS}$ .

La metodología aplicada a  $FRP_{4th}$  descrita por la ecuación [4] no es adecuada para temperaturas inferiores a 600 K. La constante a válida para el sensor SLSTR, previamente estimada mediante transmitancias atmosféricas promediadas en los fuegos simulados, fue  $a_{SLSTR} = 1.05 \times 10^{-9} \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{ K}^{-4}$  ( $R^2 = 0.99$ ).

## Resultados y discusión

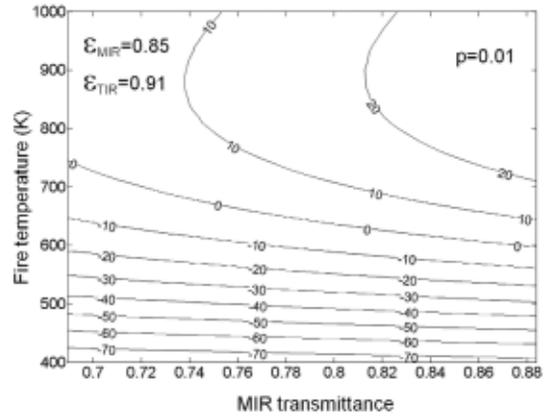
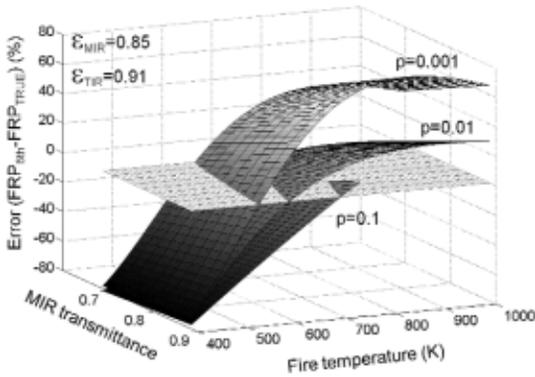
El porcentaje de error proporcionado por  $FRP_{DSB}$  no depende de la fracción del fuego. El

error se incrementa con  $\tau_{MIR}$  y  $\tau_{TIR}$  y disminuye con  $T_f$ . La restricción de este procedimiento es que, para  $T_f$  inferior a 450 K, no existe convergencia en la ecuación [6]. Esos resultados se muestran en la Figura 1.

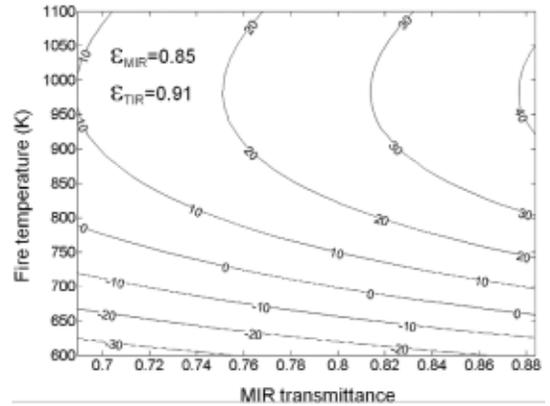
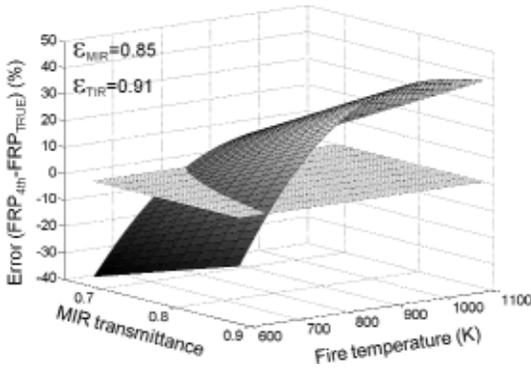
El porcentaje de error en  $FRP_{8th}$  muestra una fuerte dependencia con la fracción del fuego cuando la temperatura del fuego aumenta. La Figura 2 muestra la gráfica 3D de los errores obtenidos para tres valores de  $p$  ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$ ). Notar que  $p = 10^{-1}$  es incompleta debido a la saturación del sensor SLSTR (a partir de  $T_f$  de 740 K para  $p = 10^{-1}$ ). La dependencia en  $\tau_{MIR}$  es débil.  $FRP_{8th}$  muestra un buen comportamiento con errores dentro del intervalo  $\pm 10\%$ , para  $p = 10^{-2}$ , para  $T_f \in [540 \text{ K}, 600 \text{ K}]$  cuando  $\tau_{MIR}$  es alta y  $T_f \in [600 \text{ K}, 740 \text{ K}]$  para bajos valores de  $\tau_{MIR}$ . Si  $p$  disminuye, el rango de error  $\pm 10\%$  corresponde a intervalos de  $T_f$  más estrechos y desplazados a bajas  $T_f$ . Esos resultados se muestran en la Figura 2.

El porcentaje de error proporcionado por  $FRP_{4th}$  no muestra ninguna dependencia con la fracción del fuego. Altos valores de  $\tau_{MIR}$  son más sensible a errores, de forma que  $FRP_{4th}$  está dentro del intervalo  $\pm 10\%$  para el intervalo de  $T_f \in [625 \text{ K}, 700 \text{ K}]$  para valores altos de  $\tau_{MIR}$  y  $T_f \in [720 \text{ K}, 900 \text{ K}]$  para bajos valores de  $\tau_{MIR}$ .  $FRP_{4th}$  sobre-estima  $FRP_{TRUE}$  para valores altos de  $T_f$ . Estos resultados se muestran en la Figura 3.

Este análisis se ha realizado teniendo en cuenta un escenario de vegetación senescente que ocuparía la zona que rodea al pixel con fue-



**Figura 2.** Porcentaje de error, en la estimación de  $FRP_{8th}$ ; gráfica de error como función de la transmitancia  $MIR$ , temperatura de fuego y fracción del píxel; se muestra el nivel de error 0% como referencia. Notar que  $p = 0.1$  es incompleta debido a la saturación del sensor SLSTR. b) Líneas de error, generadas como la intersección de la gráfica 3D con planos de error en el intervalo  $[-70\%, 20\%]$ .

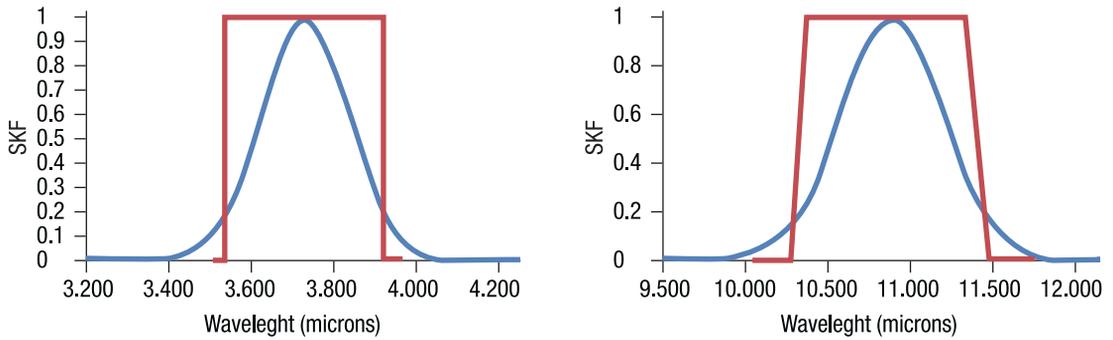


**Figura 3.** Porcentaje de error, en la estimación de  $FRP_{4th}$ ; gráfica de error como función de la transmitancia  $MIR$  y la temperatura del fuego; el nivel de error 0% se muestra como referencia. b) Líneas de error, generadas como la intersección de la gráfica 3D con planos de error en el intervalo  $[-30\%, 40\%]$ .

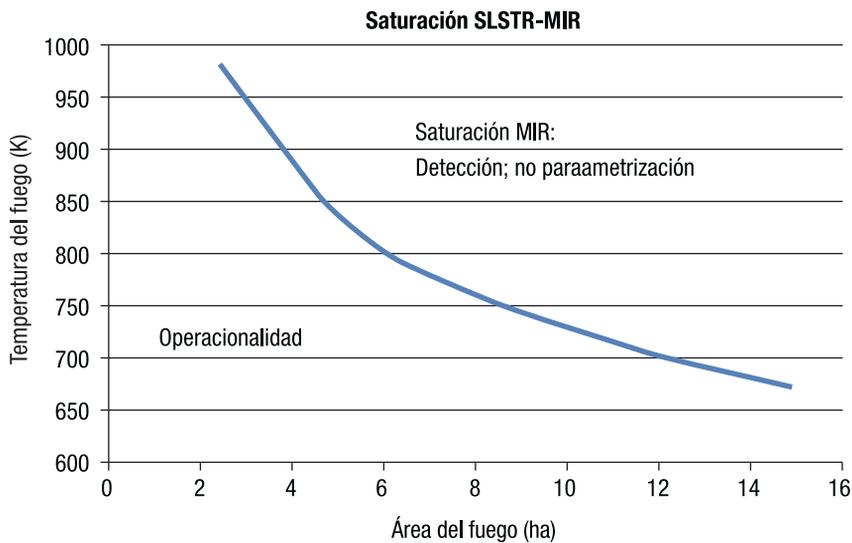
go (pero no afectado por el fuego); ello ha sido así para optar por valores conservadores de emisividad. La vegetación verde no sería realista en escenarios de fuego, pero aunque se produjera, los errores serían menores al tratarse de valores más cercanos al comportamiento de cuerpo negro. Sin embargo, el mismo análisis se realizó teniendo en cuenta previamente un fondo de cuerpo negro, los errores fueron los mismos para los tres algoritmos. Ello era esperable una vez que la temperatura de brillo utilizada en el análisis era magnitud TOA. Para la fracción de fuego, sin embargo, el comportamiento de cuerpo negro puede ser asumido de forma razonable, siempre que la longitud de la trayectoria de línea de visión a través de las llamas es suficientemente gruesa

(Laangas, 1995), de modo que la ecuación (5) no incluye la corrección de emisividad.

Otro efecto a discutir es la forma de la SRF (*Spectral Response Function*); dado que su forma no es conocida aún, los cálculos fueron realizados con una función cuadrada. No obstante otras formas fueron analizadas para estimar su impacto en los errores encontrados en las estimaciones finales de la FRP. Por ello, se ha simulado una función de Gauss, cuya campana de dispersión excedía a la función cuadrada, a longitudes de onda a izquierda y derecha del espectro, en valores de respuesta del 20%. Esta función de respuesta espectral es ligeramente diferente a la forma anterior, debido a la radiancia integrada a la izquierda y derecha de la función cuadrada. Se encontraron



**Figura 4.** Dos *SRF* diferentes fueron consideradas para cada banda espectral (*MIR* y *TIR*): gaussiano y la *SRF* cuadrada. La función de Gauss fue obligada a rebasar los requisitos de la función cuadrada, con el fin de calcular el impacto de este rebasamiento de la ventana espectral en la radiancia obtenida por el sensor.



**Figura 5.** Representación de la línea umbral de saturación del sensor SLSTR-MIR. La zona derecha permite la detección de incendios pero no la parametrización (Temperatura, área afectada y *FRP*). La zona izda. representa escenarios de total operabilidad en la observación del fuego.

ligeras diferencias poco relevantes en la temperatura de brillo como por ejemplo, para el caso  $p = 0,001$ , las diferencias de temperatura de brillo son 0.3 K (*MIR*) y 3.2 K (*TIR*); sin embargo, los errores encontrados en la temperatura del fuego y las fracciones de píxel afectadas por el fuego son los mismos que los mencionados previamente ( $\pm 2,6\%$  en promedio). Por lo tanto, los procedimientos de cálculo de la *FRP* descritos aquí no serán dependientes de la forma final de la función de respuesta espectral SLSTR. Observar la Figura 4, donde se muestra una comparación entre las funciones de respuesta cuadrada y gaussiana.

Por último, fue realizada una estimación de las condiciones del incendio que pueden producir saturación del sensor. Así, la saturación de la banda *MIR* sólo se produce en escenarios con una potencia de fuego muy elevada, debido a altas temperaturas y grandes áreas afectadas simultáneamente; algunos ejemplos significativos son los siguientes: a partir de (980 K, 2.5 hectáreas), (840 K, 5 ha), (770 K, 7.5 ha), (730 K, 10 ha), (670 k, 15 ha). La Figura 5 muestra la línea de umbral de saturación de la banda *MIR*; el resultado es que el futuro sensor SLSTR será adecuado para la vigilancia de incendios en una muy amplia variedad de condiciones físicas del fuego.

## Conclusiones

Por lo que respecta a los resultados técnicos planteados a lo largo del trabajo, cabe destacar que los métodos  $FRP_{4th}$  y  $FRP_{DSB}$  muestran mejores resultados en un intervalo más ancho de temperaturas de fuego, que el procedimiento  $FRP_{8th}$ , y además no muestran dependencia con la fracción del píxel afectada. Sin embargo, sus errores se incrementan dramáticamente cuando la temperatura de fuego cae a valores por debajo de un cierto valor: 450 K para  $FRP_{DSB}$  debido a la convergencia imprecisa en la resolución del sistema de ecuaciones [6] y 650 K para  $FRP_{4th}$  debido a que la relación de la radiancia en función de  $T^{4.0}$  no es válida; ésta es una restricción del método cuando el nivel de confianza, en la detección del fuego, es bajo. Notar que un fuego con reducida área activa o cuya temperatura es baja es difícil de detectar. El método  $FRP_{DSB}$  muestra mejores resultados que  $FRP_{4th}$  y  $FRP_{8th}$ , y su rango de aplicabilidad es más ancho; sin embargo es más sensible a la imprecisión en las condiciones atmosféricas y usa  $\tau_{MIR}$  y  $\tau_{TIR}$ .

Como comentarios adicionales acerca de la idoneidad y estrategias de vigilancia de incendios debe hacerse notar que la magnitud  $FRP$  es considerada de importancia crucial; sin embargo, las consecuencias ecológicas continuadas de la acción de la  $FRP$  son las que integran la información en el tiempo. Por esta razón todos los cálculos y análisis efectuados sobre satélites de órbita polar deberían encaminarse a la determinación de la  $FRE = \int FRP \cdot dt$  y ésta sólo es posible mediante sensores geoestacionarios. Por lo tanto, la coordinación entre plataformas polares, que aportan la resolución espacial, y las plataformas geoestacionarias, que aportan la continuidad temporal, debería ser el objetivo estratégico de los programas de observación de incendios; en otro caso, la información de los hot-spots se limitará a una utilidad estadística.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto CAT-1 de la ESA ID: 11846, cuyo título es: «Study of suitability of Sentinel-3 to fire monitoring»

## Referencias

- BERK, A., BERNSTEIN, L. W., & ROBERTSON, D.C. 1996. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, *Rep. AFGL-TR-83-0187*, Philips Lab., Hanscom Air Force Base, Mass. 1996
- CALLE, A., & SALVADOR, P. 2013. The active fire FRP Estimation: study on Sentinel-3/SLSTR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 10 (5), 1046-1049, September 2013
- COPPO, P., RICCIARELLI, B., BRANDANI, F., DELDERFIELD, J., FERLET, M., MUTLOW, C., MUNRO, G., NIGHTINGALE, T., SMITH, D., BIANCHI, S., NICOL, P., KIRSCHSTEIN, S., HENNIG, T., ENGEL, W., FRERICK, J., & NIEKE, J. 2010. SLSTR: a high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space. *Journal of Modern Optics*, 2010, Vol. 57, 1815-1830.
- DOZIER, J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 1981, Vol. 11, 221-229.
- GIGLIO, L., & KENDALL, J. D. 2001. Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization. A sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 77, 34-49.
- GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C. O., & KAUFMAN, Y. J. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, 273-282.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., CALLE, A., & ROLDÁN, A. 2006. Comparison of Fire Severity and Fire Parameters using Remote Sensing Images. *Proceedings Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS II)*. pp. 125-130. Valencia, 2006
- ICHOKU, C., GIGLIO, L., WOOSTER, M. J., & REMER, L. A. 2008. Global characterization of biomass burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112(6), 2950-2962.
- JUSTICE, C., GIGLIO, L., BOSCHETTI, L., ROY, D., CSISZAR, I., MORISSETTE, J., & KAUFMAN, Y. 2006. MODIS Fire Products. *Algorithm Technical Background Document*, version 2.3, 1 October 2006, EOS ID# 2741. MODIS Science Team, (p. 12)
- KAUFMAN, Y., REMER, L., OTTMAR, R., WARD, D., RONG-R, L., KLEIDMAN, R., FRASER, R., FLYNN, L., MCDOUGAL, D., & SHELTON, G. 1996. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In J. Levine (Ed.), *Global biomass burning*, 1996, (pp. 685-696). MA: MIT Press.
- KAUFMAN, Y. J., JUSTICE, C. O., FLYNN, L. P., KENDALL, J. D., PRINS, E. M., GIGLIO, L.,

- WARD, D. E., MENZEL, W. P., & SETZER, A. W. 1998, Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, 32215-32238.
- LANGAAS, S. 1995. A critical review of sub-resolution fire detection techniques and principles using thermal satellite data. *PhD thesis, Department of Geography*, University of Oslo, Norway.
- SALISBURY, J. W., & D'ARIA, D. 1994. Emissivity of Terrestrial Materials in the 3-5 mm Atmospheric Window. *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 47, 345-361.
- SALISBURY, J. W., & D'ARIA, D. 1994. Emissivity of Terrestrial Materials in the 8-14/tm Atmospheric Window. *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 42, 83-106.
- WOOSTER, M. J., ZHUKOV, B., & OERTEL, D. 2003. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, 83-107.
- WOOSTER, M. J., XU, W., & NIGHTINGALE, T. 2012. Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, 236-254.