

Análisis de la influencia de la PSF SEVIRI en la determinación de parámetros de incendios, mediante procesos bi-espectrales.

Calle, Abel^{a,1}; Vegas, Alberto^b y González-Alonso, Federico^c

^(a)Laboratorio de Teledetección. Universidad de Valladolid. Valladolid. España.

^(b)Laboratorio Teledetección CIFOR-INIA. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid. España

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis del impacto de la Función de Dispersión Puntual (PSF) del píxel del sensor MSG-SEVIRI, sobre los parámetros térmicos de los incendios. Se analiza la influencia de la PSF sobre la temperatura de brillo de la banda 3.9 mm, relevante en los procesos de detección, y se evalúan los errores de la temperatura de fuego calculada por técnica bi-espectral debidos a la no-coincidencia de las PSF de las bandas espectrales utilizadas.

Palabras claves: PSF, SEVIRI, Incendios

ABSTRACT

This work shows an analysis of influence of pixel Point Spread Function, of the MSG-SEVIRI sensor, on thermal fire parameters. Influence of brightness temperature in the 3.9 mm spectral band on detection algorithms is analyzed. Errors in the fire temperature, retrieved by bi-spectral technique, due to not coincidence in the PSF involved is analyzed too.

Keyboards: PSF, SEVIRI, Hot-spot

Introducción

Existen pocos conceptos en teledetección tan ambiguos y escurridizos como el concepto de píxel (Picture element) y ello a pesar de que su dimensión, es la principal magnitud que caracteriza los sensores, a través de la resolución espacial. El concepto de píxel parece sencillo pero no siempre se toman en consideración matices que pueden ser relevantes en la interpretación posterior de las imágenes y, por supuesto, en la cuantificación de ciertas magnitudes. A este respecto resulta de gran interés la revisión de Cracknell, 1998, acerca de diferentes consideraciones realizadas sobre el píxel a la hora de discriminar diferentes facetas en las imágenes. Por ello, la respuesta a la pregunta:

¿Qué contiene un píxel?, precisamente el título del trabajo de Cracknell, pasa por analizar, de forma precisa la zona del terreno de la que procede la radiancia que llega al sensor, que nunca coincide exactamente con la resolución espacial que se asigna a éste ni con la forma cuadrada con la que nos imaginamos los elementos matriciales de una imagen. El concepto simplificado de imagen como mosaico de elementos está muy alejado de la realidad y ello se pone de manifiesto cuando pretendemos entrar en el detalle aportado por imágenes o incluso en la comparación de imágenes de diferentes sensores dotados de la misma resolución espacial. Por otra parte, la determinación de muchas magnitudes en teledetección está basada en la

¹ Contacto autor: Telf: +34 983 423952

Correo electrónico: abel@latuv.uva.es

Copyright: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

resolución de procesos multiespectrales, como por ejemplo la determinación de temperaturas mediante procedimientos split-window o el cálculo de parámetros térmicos en los hot-spot cuando se aplica el método de Dozier (Dozier, 1981). En ellos se asume que los píxeles de las bandas utilizadas corresponden a la misma zona y contribuyen con la misma sensibilidad a la medida de la radiancia. Aún en el caso de que la co-registración entre bandas fuera perfecta, la suposición anterior no se cumple debido a la diferente distribución de la sensibilidad espacial de cada banda. En este trabajo presentamos de forma muy breve las magnitudes que caracterizan la información del píxel de las imágenes y utilizamos el sensor MSG-SEVIRI para la determinación de los errores en lo que se puede incurrir al calcular parámetros térmicos de puntos calientes detectados debido a la forma particular y a la no-coincidencia de las funciones de dispersión puntual de las bandas involucradas en el análisis.

Teoría

El valor radiométrico de un píxel sobre la imagen que procesa un sensor es la representación de la radiancia captada por el sensor a nivel del terreno, superficie abarcada por el IFOV (*Instantaneous Field of Vision*). La señal representada está perturbada por diferentes factores como la óptica del instrumento, la electrónica involucrada, los efectos atmosféricos y también el proceso de remuestreo propio de cada sensor que, casi siempre, presenta cierto solapamiento entre píxeles contiguos. Todos esos efectos están descritos a través de la PSF (*Point Spread Function*), traducida al castellano como función de dispersión puntual. Si todos los factores involucrados en el funcionamiento del sistema sensor los englobamos bajo la función de transformación S , encontramos que:

$$punto(x,y)=\delta(x)\delta(y) \Rightarrow PSF(x,y)=S[punto(x,y)]$$

El significado de la PSF es que el sensor no sólo responde a la radiancia procedente del píxel que consideramos en la resolución espacial, sino que también procede de los píxeles que se encuentran alrededor. Por ello, resulta de gran interés en estudios relacionados con la discriminación de facetas de imagen y en la detección de bordes. En este caso, se define la función LSF (*Line Spread Function*) como la respuesta dada por el sistema de captación a una línea procedente del terreno. Su representación matemática es de la forma:

$$línea(x,y)=\delta(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(x)\delta(y)dy=$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} punto(x,y)dy \Rightarrow LSF(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x,y)dy$$

La PSF puede ser expresada como una función que depende de las coordenadas del terreno (p,q) y de las coordenadas de la imagen (x,y) , de la forma $PSF(p,q,x,y)$; así, la radiancia $R(x,y)$ de un píxel de la imagen, que procede de un objeto espacial del terreno $g(p,q)$, se expresa mediante la siguiente convolución:

$$R(x,y)=\iint PSF(x-p,y-q)g(p,q)dpdq$$

La determinación experimental de la PSF de un sensor es una tarea complicada y en pocos casos se aporta una representación o función que la define. Resulta instructivo el trabajo de Mannstein and Gesell (1991) en el que presentan una aproximación tridimensional de la PSF para el sensor AVHRR. En cualquier caso, podemos imaginarnos esta función muy cercana a una gaussiana tridimensional cuyo eje vertical representa la sensibilidad del sensor para ponderar la radiancia proveniente de cada punto del terreno. Esta aproximación, de hecho, ha sido propuesta en algunos sensores, como el caso de MODIS (Huang, et al., 2002) en estudios de deconvolución. En este caso la función PSF vendría dada por una función del tipo:

$$PSF(x,y,p,q)=\exp\left[-\frac{(x-p)^2+(y-q)^2}{2\sigma^2}\right]$$

en la cual, el tamaño del píxel del sensor está determinado por la dispersión σ .

La magnitud más extendida para expresar la resolución espacial de un sensor es la MTF (*Modulation Transfer Function*) o también Función de Transferencia de Modulación. Esta función está expresada en el espacio de las frecuencias y establece la capacidad para resolver matices a diferentes frecuencias espaciales. A medida que la frecuencia crece, va disminuyendo la capacidad de resolución de forma que existe un límite superior a partir del cual el sensor no puede distinguir los detalles; dicho límite es la denominada Frecuencia de Nyquist. La relación entre PSF y MTF viene dada a través de la transformada de Fourier, de forma que MTF es el módulo de la transformada de Fourier de la PSF; es decir:

$$MTF(u, v) = |\mathcal{F}\{PSF(x, y)\}|$$

Siendo (u,v) las coordenadas en el dominio de las frecuencias. La determinación inversa es la que sirve para generar la PSF a partir de la MTF; sin embargo dado que MTF es un módulo no puede realizarse la transformada de Fourier inversa por lo que la PSF se determina mediante la transformada de Hankel:

$$PSF(x, y) = H\{MTF(u, v)\}$$

La determinación de la función MTF en órbita requiere de la preparación de escenarios homogéneos con características radiométricas de alto contraste. Este procedimiento ha sido empleado con éxito para la medida de la MTF en satélites de alta resolución espacial. Concretamente para el caso de Ikonos y QuickBird, Helder et al. (2006) utilizaron paneles plastificados con alto contraste de reflectancia desde 3.6% hasta 52.1%. La función que representa el cambio de señal entre los dos paneles sobre los píxeles de imagen aporta la función ESF (*Edge Spread Function*), la cual en el caso ideal sería la «función escalón». La derivada de dicha función es precisamente la LSF, la cual no es otra cosa que la PSF en una dimensión. Finalmente, la MTF es determinada mediante la transformada de Fourier de la LSF. En forma analítica:

$$LSF(x) = \frac{d[ESF(x)]}{dx};$$

$$MTF(u) = |\mathcal{F}[LSF(x)]| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(x) e^{-i2\pi xu} dx \right|$$

Donde MTF(u) se refiere a una dimensión; o lo que es lo mismo: $MTF(u) = MTF(u, 0)$

Funciones MTF y PSF del sensor SEVIRI

Las funciones MTF del sensor SEVIRI, al que se refiere este trabajo fueron aportadas por EUMETSAT. A modo de ejemplo, la figura 1 muestra la MTF del sensor SEVIRI que corresponde a la banda espectral de 3.9 mm; las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste están especificadas en la figura, así como las plantillas umbrales requeridas. Hemos presentado esta banda espectral por ser la de mayor importancia en el análisis de la parametrización de los incendios forestales mediante técnica bi-espectral; las MTF del resto de bandas IR muestran

el mismo comportamiento aproximado, mostrando una diferencia cuantitativa en el alcance de las MTF norte-sur y este-oeste.

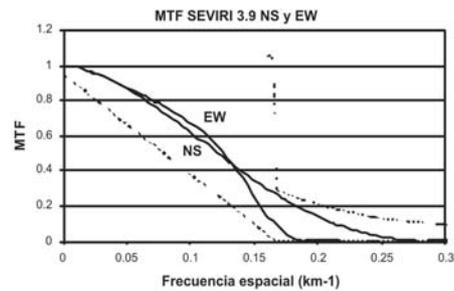


Fig. 1: Funciones MTF del sensor SEVIRI, para la bandas de 3.9 mm.

La determinación de la PSF se ha realizado aplicando una transformada de Hankel. La figura 2 presenta las funciones PSF de las bandas 3.9 mm y 10.8 mm, en la dirección de orientación Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente.

A la vista de la figura, la primera característica destacable es la forma de la PSF prácticamente coincidente con una función gaussiana. Por otra parte destaca de forma importante la extensión de dicha función en ambas orientaciones. Téngase en cuenta que la parte representada corresponde a medio píxel de alcance y representa un sensor con una distancia de remuestreo de 3km en su punto nadir. Esto representa una fuerte dispersión respecto a la función PSF ideal, representada por una función escalón limitada en 1.5 km. Otra característica que debe hacerse notar es la asimetría de la función PSF en direcciones cruzadas, NS y EW, mostrando un mayor alcance de sensibilidad la dirección EW. Finalmente, la no coincidencia de las funciones de ponderación a partir de 1.5 km en la PSF NS y de 1.0 km en la PSF EW debería tener consecuencias cuantitativas en la aplicación de cálculos bi-espectrales.

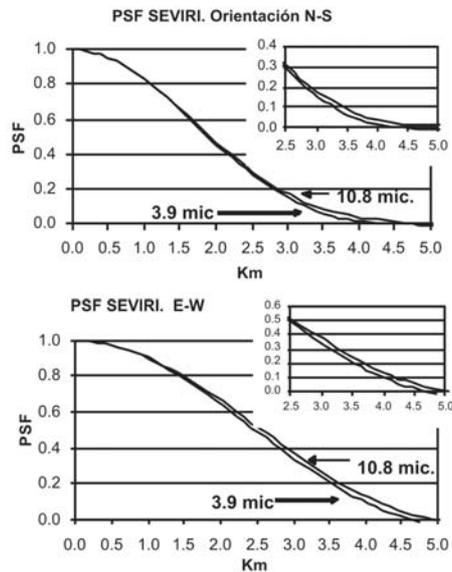


Fig. 2: PSF del sensor SEVIRI, para las bandas de 3.9 μm y 10.8 μm . a) norte-sur y b) este-oeste

Metodología

En este trabajo queremos poner de manifiesto discrepancias en resultados obtenidos en la aplicación de cálculos bi-espectrales debidas a la no coincidencia de las funciones PSF de las bandas involucradas en el cálculo; y ello aplicado a la detección y parametrización de incendios.

Tras la detección de hot-spots, la determinación de los parámetros de fuego, como la temperatura, el área ardiendo y la potencia radiativa FRP (Fire Radiative Power), aportan información de gran interés para la estimación posterior de la severidad. La metodología clásica para la determinación de la temperatura del fuego y el área ardiendo es una técnica bi-espectral. Esta técnica propone la resolución de un sistema de ecuaciones en el que interviene la radiancia de las bandas que utiliza las bandas espectrales infrarrojo medio, 3.9 μm , e infrarrojo térmico, 10.8 μm (Dozier, 1981; Matson & Dozier, 1981). El punto débil de esta metodología es la introducción adecuada de la temperatura de la superficie no afectada por el incendio; valor que no es conocido y es obtenido mediante el promedio de píxeles circundantes no afectados. Pequeños errores de esta variable provocan grandes errores en los resultados.

Una metodología derivada de la anterior, pero que ofrece resultados más realistas es la propuesta por Giglio & Kendall (2001), quienes sugieren introducir la radiancia de los píxeles circundantes de forma que los efectos atmosféricos y la influencia de la emisividad son tomadas en cuenta, así como la componente de la reflexión solar en imágenes diurnas. Dicha metodología está resumida en el siguiente sistema de ecuaciones bi-espectrales:

$$L_i = \tau_i p B(\lambda_i, T_{\text{fire}}) + (1 - p)L_{\text{background},i} + pL_{\text{atmos},i}$$

$$i = 3.9\mu\text{m}, 10.8\mu\text{m}$$

En la que τ es la transmitancia atmosférica de cada banda espectral, l es la longitud de onda, T_{fire} es la temperatura del fuego, $L_{\text{background}}$ es la radiancia que procede de la superficie y llega al nivel del sensor, y L_{atmos} es la radiancia que procede de la atmósfera, y cuyo término multiplicado por la fracción afectada del píxel, p , puede ser despreciado. Dicho sistema de ecuaciones no tiene solución analítica por lo que debe ser resuelto mediante métodos numéricos. Los resultados de las ecuaciones anteriores, T_{fire} y p están subordinados a que la radiancia obtenida en cada banda espectral, procedente de toda la superficie abarcada por la PSF del píxel, se encuentre ponderada por los mismos factores en las dos bandas espectrales involucradas. Diferencias en la ponderación de la radiancia en diferentes localizaciones del píxel no aportará resultados realistas en la resolución del sistema.

La localización de un incendio detectado dentro del píxel al que se asigna la detección puede no ser importante en sensores de alta resolución espacial térmica, como ASTER, y puede ser discutible en otros sensores como MODIS o AVHRR, pero en sensores de satélites geoestacionarios, como SEVIRI, puede cobrar gran importancia al tratarse de áreas cercanas a 12 km^2 como sucede en la latitud de la Península Ibérica. Para analizar el impacto de la localización de un incendio en el interior de un píxel hemos llevado a cabo simulaciones mediante el código MODTRAN (Berk *et al.*, 1994) utilizando condiciones atmosféricas correspondientes a verano medias latitudes, con valores de transmitancias atmosféricas en cada banda espectral de 0.73 para la banda MIR y 0.69 para la TIR, con un tipo de aerosoles continental de 50 km de visibilidad. Por lo que respecta a los incendios se han simulado dos tipos con una temperatura de fuego de 400K y 500K, respectivamente, que representan incendios con dos grados térmicos

no extremos. En ambos casos se ha considerado, para la fracción del píxel no afectada por el fuego, una superficie de temperatura de 300K. Las simulaciones fueron realizadas en una sola dimensión para comparar y separar los efectos provocados por los diferentes valores de la PSF en las dos orientaciones norte-sur y este-oeste. La fracción de fuego unidimensional utilizada fue diferente para cada incendio, buscando situaciones que pudieran provocar la saturación discriminada del píxel. Así, en el caso del incendio 400K, la fracción unidimensional p_{xy} fue de 200 m, que significa un píxel no-saturado para cualquier localización del fuego. En el caso del incendio de 500K se utilizó un $p_{xy}=100$ m, lo que significa saturación del píxel cuando el fuego ocupa la zona central y no saturación en otros casos. Esta elección de temperaturas de fuego y fracciones de píxel cubre todas las situaciones posibles. El rango de análisis, con origen en el centro del píxel fue extendido hasta 4.6 km, distancia en la que ambas funciones PSF no son efectivas. Por otra parte, para comparar el efecto de discrepancia en los resultados, provocado por la no coincidencia de las dos funciones PSF utilizadas, la radiancia de la banda TIR fue simulada mediante la ponderación de su PSF real y utilizando la misma PSF que la de la banda MIR. La diferencia entre estos resultados establece el impacto de no coincidencia en los factores de ponderación.

Resultados y análisis

Dividiremos el análisis de los resultados en dos secciones: en primer lugar vamos a mostrar la influencia de la posición del incendio en el interior del píxel mediante el análisis de la temperatura de brillo registrada por el sensor; esta magnitud es la que sirve de referencia habitualmente en los modelos de detección, por lo que sus diferentes valores mostrados pueden repercutir en detección positiva o negativa. En segundo lugar mostraremos la influencia de la no-coincidencia de la PSF en las bandas implicadas en el análisis bi-espectral sobre la temperatura del fuego determinada.

La figura 3 muestra el valor de la temperatura de brillo de la banda de 3.9mm detectada por el sensor en función de la distancia de alejamiento del incendio al centro del píxel. La parte a) representa el incendio de temperatura 400K con fracción unidimensional de 200m, situación en la que no ocurre saturación del sensor en ningún caso; la parte b) representa el incendio de 500K con fracción unidimensional de 100 m.

Ambas gráficas ponen de manifiesto las diferencias encontradas entre las orientaciones NS y EW. Cuando el incendio se encuentra en el centro del píxel, la temperatura de brillo registrada en la orientación EW es inferior a NS debido a que la cobertura de la PSF es mayor en aquél caso. Por otra parte, como era de esperar la temperatura de brillo va descendiendo a medida que el incendio se va alejando del centro del píxel debido a la ponderación de la PSF. Cuando ésta no es efectiva (en el borde) el valor registrado es la temperatura de superficie (300K) atenuada por el efecto atmosférico.

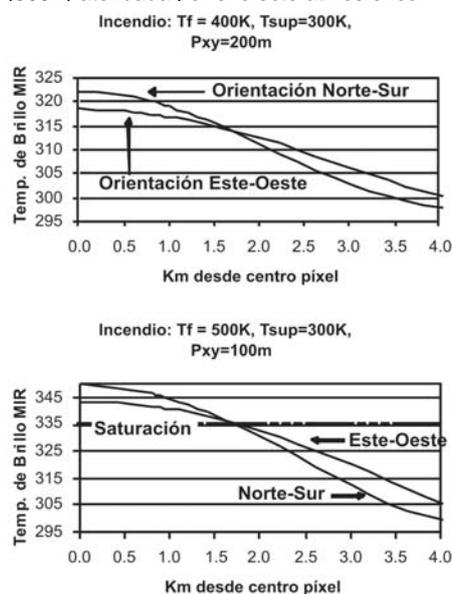


Fig. 3: Evolución de la temperatura de brillo detectada por el sensor de la banda de 3.9mm, para diferentes incendios y las dos orientaciones cruzadas.

En todos los casos analizados en el texto, los valores de dicha temperatura de brillo son: MIR=297.4K y TIR=296.8K. El descenso es más pronunciado en el caso de la orientación NS, de forma que entre el centro y una distancia de 1.8 km, la diferencia es de hasta 10K en el incendio menos caliente. El impacto de esta diferencia es clave en los modelos de detección puesto que si el umbral se encuentra en este intervalo de descenso, la detección estará condicionada a la posición del incendio. Por otra parte, obsérvese que en el caso del incendio de 500K y fracción de 100m, el píxel se encontraría saturado

solamente cuando el incendio se encuentra en un radio de 1.8 km desde el centro del píxel.

La segunda línea de análisis que presentamos es la influencia de la no-coincidencia de las funciones PSF de las dos bandas involucradas en las ecuaciones bi-espectrales utilizadas para determinar la temperatura del fuego. Como hemos mostrado en las figuras 1 y 2 existe un desdoblamiento de dichas funciones apreciable a partir de los 2.0 km. Para realizar el análisis de la influencia de este desdoblamiento hemos simulado los dos incendios anteriores para dos casos diferentes: una primera simulación utilizando las funciones PSF reales de las dos bandas MIR y TIR, y una segunda simulación utilizando la radiancia MIR con su PSF MIR y la radiancia TIR con la misma función PSF MIR. Al primer caso le hemos llamado PSF real y al segundo PSF coincidente. Posteriormente hemos resuelto el sistema de ecuaciones bi-espectrales por métodos numéricos para la determinación de la temperatura del fuego.

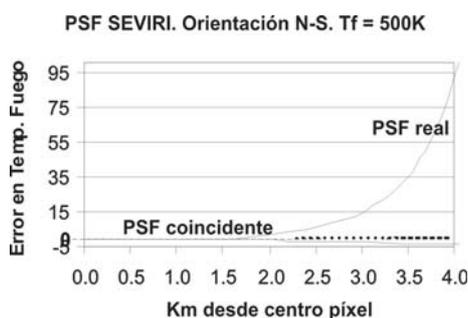


Fig. 4: Evolución de la temperatura del fuego calculada por el sistema de ecuaciones bi-espectrales en los casos de utilizar las funciones PSF reales o PSF coincidentes.

Los resultados obtenidos aparecen resumidos en la figura 4, en la que se muestra el error encontrado en la temperatura del fuego en ambos casos. Como se puede apreciar, hasta un alejamiento de 1.5 km del centro del píxel no existe ninguna diferencia entre utilizar PSF reales o coincidentes. A partir de ese punto, la no coincidencia de las PSF tiene como consecuencia que la solución del sistema real tiene un error que aumenta exponencialmente. La figura sólo muestra el caso del incendio de 500K con fracción unidimensional de 100m y en la orienta-

ción NS, pero todos los casos analizados muestran un comportamiento similar.

Por lo que respecta a la otra variable resultado, la fracción de fuego ardiendo, este parámetro es más inestable de forma que pequeñas variaciones de los valores de la radiancia producen diferencias en la fracción calculada que sobrepasa el 50%, lo cual no debe causar alarma al tratarse de superficies muy pequeñas comparadas con el área total del píxel, y mas para sensores de muy baja resolución espacial. En cualquier caso, el comportamiento de dicho parámetro fue similar en los dos casos analizados.

Conclusiones

El trabajo que se presenta cubre una línea académica que con mucha frecuencia pasa desapercibida y es el verdadero significado del concepto de píxel. La influencia de la forma de la PSF, e incluso su no coincidencia entre bandas no debería causar grandes errores cuando las superficies analizadas tienen una distribución homogénea de la radiancia. Sin embargo, en los incendios forestales ocurre lo contrario, y la localización de un HTE (evento de alta temperatura) puede influenciar los resultados obtenidos.

La temperatura de brillo detectada por el sensor en la banda de 3.9mm es la principal magnitud involucrada en la detección de incendios, dado que se compara su valor con un umbral establecido. Como hemos visto, la localización de un incendio dado proporciona muy diferentes valores de la temperatura de brillo en función de la distancia de alejamiento al centro del píxel. Incluso, puede causar o no la saturación del sensor.

Finalmente, el análisis de la no coincidencia de las PSF es muy importante a la hora de decidir el modelo para la determinación de la Potencia Radiativa del Fuego. Algunos autores apuntan a la utilización de procedimientos monocanal para determinar la FRP (Kaufman and Justice, 1998; Wooster et al., 2005) con la intención de evitar estos errores, proponiendo para ello una fórmula empírica basada en aplicar una potencia a la temperatura de brillo detectada. Sin embargo, como se ha visto en este trabajo este procedimiento también puede conllevar grandes errores por el desconocimiento de la localización del incendio dentro del píxel.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto titulado: "Estudio y seguimiento de los incendios forestales en Castilla y León, en tiempo real, mediante técnicas de teledetección espacial", ref. VA017A05 financiado por la Junta de Castilla y León. Los autores desean agradecer a esta Institución su apoyo.

Referencias

- Berk, A., Bernstein, L.W. and Robertson, D.C. (1996), MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, *Philips Laboratory, Report AFGL-TR-83-0187*, Hanscom ARB, MA. 1983.
- Cracknell, A.P. (1998). Review article synergy in remote sensing-what's in a pixel?. *Int. J. Rem. Sen.*, 19, pp. 2025-2047.
- Dozier, J. (1981), A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution, *Rem. Sens. of Env.*, 11, 221-229
- Giglio, L and Kendall, J.D., (2001), Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization. A sensitivity analysis, *Rem. Sens. of Env.*, 77, 34-49.
- Helder, D., Choi, J. and Anderson, C. (2006). On-orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurements for IKONOS and QuickBird. Proceedings of 2006 Civil Commercial Imagery Evaluation workshop, Laurel, Maryland, March 14-16 USA, Sponsored by Joint Agency Commercial Imagery Evaluation (JACIE) Team
- Huang, C., Townshend, J.R.G., Liang, S, Kalluri, S.N.V. and DeFries, R.S. (2002). Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Rem. Sen. of. Env.* 80 (2002), pp. 203-212
- Kaufman, Y. and Justice, C. (1998), MODIS Fire Products, Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS Science Team. EOS ID#2741.
- Mannstein, H. and Gesell, G (1991). Deconvolution of AVHRR data. Proceedings of 5th AVHRR data users' meeting. Tromso, Norway, 25-28 June 1991. EUM P 09 (Darmstadt-Eberstadt:EUMETSAT), pp. 53-58
- Matson, M. and Dozier, J. (1981), Identification of sub-resolution high temperatures sources using a thermal IR sensor. *Photo Engr. and Remote Sensing*, 47(9), 1311-1318.
- Wooster, M.J., Roberts, G., Perry, G.L.W and Kaufman, Y.J (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *Journal of Geophysical Research*, 110, D24311, doi: 10.1029/2005JD006318