

Evaluación del riesgo de incendios forestales en las Islas Canarias usando datos AVHRR y MODIS

González-Calvo, Alejandro; Hernández Leal, Pedro A. ¹; Arbelo, Manuel; Barreto, África; Arvelo-Valencia, Luis

Departamento de Física, Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Facultad de Física, Universidad de La Laguna.
Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n. 38200. La Laguna. (España).

RESUMEN

Este trabajo muestra la utilización de datos de los sensores NOAA-AVHRR y TERRA-MODIS en la generación de un índice de riesgo de incendio dinámico para la Isla de la Palma (Canarias-España). En la modelización del riesgo de incendio se han considerado diferentes factores estáticos como la proximidad a carreteras, estadísticas de incendio, horas de insolación, entre otros, que junto a los datos de satélite permiten parametrizar el índice dinámico propuesto. Se analiza la respuesta de este índice en las fechas previas a un gran incendio acaecido en esta Isla en Septiembre del año 2005.

Palabras Clave: Riesgo incendios, NDVI, SIG

ABSTRACT

This work shows the use of NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS data in the generation of a Fire Risk Dynamic Index for La Palma Island (Canary Islands-Spain). Different static factors have been considered in the fire risk development like the proximity to main roads, fire statistics or insolation hours, amongst others. The synergy of static and dynamic factors provided by satellite data have let us model the dynamic index. Trends in this index before the date of a dramatic fire event that took place in this Island in September 2005 are also analyzed.

Keywords: Fire Risk, NDVI, GIS

Introducción

Los incendios forestales que cada año soporan nuestros bosques, constituyen un grave problema para la degradación del medioambiente a escala regional o incluso global. Considerando únicamente a la Unión Europea, cada año se contabilizan más de 50.000 incendios, con una extensión de las zonas quemadas que ha llegado a rondar las 500.000 Ha., siendo España y Portugal dos de los países que más se han visto afectados (Gabban, et al., 2006). Los programas espaciales más recientes (TERRA, AQUA, ENVISAT...) y los previstos en el futuro, con el aumento en sus resoluciones espacial, espectral, radiométrica y temporal, proporcionan una importante herramienta en la lucha contra incendios, para dar alertas inmediatas de focos

activos, además de una evaluación de las áreas con un mayor riesgo potencial y por supuesto, un cartografiado de la zona quemada y de su grado de afectación.

Durante las últimas décadas, gran parte de las aplicaciones de la teledetección en incendios forestales, han estado centradas en la detección temprana de los mismos usando datos de los sensores que captan información en el infrarrojo medio. En este sentido cabe destacar, entre otros la gran utilidad de satélites como los Meteosat Second Generation (MSG) que con una imagen cada 15 minutos, a través de su instrumento principal el Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), y una resolución mejorada respecto de sus predecesores,

¹Contacto autor: Te: +34 922318225 Fax: +34 922318228

Correo electrónico: pedro.hernandez@ull.es

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

ya ha demostrado en numerosas ocasiones su validez para la detección rápida de un incendio, con la posibilidad de dar una alerta inmediata a los servicios forestales (Calle et al., 2006). Especialmente reseñable es también el considerable esfuerzo que se ha realizado en el desarrollo de algoritmos para la estimación de las zonas quemadas (Pereira, 1999) o incluso la evaluación de diferentes niveles de afectación dentro de las zonas quemadas, utilizando índices espectrales como el denominado Normalized Burnt Ratio (NBR) (Roy et al., 2006).

Desafortunadamente, en lo que se refiere a las condiciones previas que determinan la aparición de un incendio forestal, existen menos referencias en la literatura. Una combinación de factores medioambientales, condiciones meteorológicas y causas antropogénicas parecen ser la causa de la mayor parte de los grandes incendios forestales. Las elevadas temperaturas en verano, junto con altas velocidades de viento, terrenos abruptos y la presencia de material con un bajo grado de humedad, altamente inflamable, en el suelo de los bosques son algunos de los factores que determinan una rápida generación y expansión de un incendio. No obstante, las actividades humanas siguen siendo una de las principales causas en su origen, haciendo que sea realmente compleja la generación de un mapa de riesgo que alerte de una manera efectiva acerca de cuáles son las zonas que finalmente pueden verse afectadas.

No obstante, los sensores de los satélites pueden aportar una información realmente útil de las zonas con un alto nivel de riesgo, dada su amplia cobertura espacial y temporal. En este sentido el contenido en agua de las plantas es una de las factores clave en los modelos desarrollados, con aplicación no sólo el terreno agrícola sino también en incendios forestales, siendo parametrizado a través del índice Fuel Moisture Content (FMC), definido como el porcentaje del peso de agua sobre el peso de la muestra seca para una determinada cobertura vegetal (Chuvieco et al., 2004). Se ha demostrado además, mediante el uso de largas series temporales de datos NOAA-AVHRR y más recientemente de TERRA-MODIS, que existe una buena correlación entre el FMC y un índice de vegetación como el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtenido a partir de bandas en el visible e infrarrojo próximo (Chladil et al., 1995). Además, la posibilidad de obtener la temperatura de la superficie a través de algoritmos de tipo Split-window aplicados a los canales térmicos, y la correlación negativa entre temperatura de la superficie y NDVI, ha conducido a utilizar

este último como un indicador del contenido en agua de la superficie (Jang et al., 2006).

En la generación de mapas de riesgo de incendio, se han utilizado por tanto los índices de vegetación y la temperatura de la superficie, obtenidos a partir de satélite, en conjunción con datos meteorológicos de estaciones en tierra (temperatura del aire, velocidad del viento, humedad...) y otros factores de riesgo estáticos como la proximidad a las carreteras o las horas de insolación, entre otros, de forma que dichos mapas representen de la mejor manera posible todos los factores involucrados (Chuvieco et al., 2003, Leblon, 2001)

En este trabajo se muestra un estudio centrado en la Isla de La Palma, situada en las Islas Canarias (España). Se han usado datos de dos sensores diferentes (AVHRR-1km y MODIS-250m) para evaluar las condiciones previas al incendio que tuvo lugar en esa isla durante la primera semana de Septiembre de 2005. Con ese objetivo, se define un índice dinámico de riesgo de incendio, denominado Fire Risk Dynamic Index (FRDI), en el cual la evolución temporal del estrés hídrico obtenida a partir del NDVI de datos AVHRR y MODIS, es modulada por una función de probabilidad estática de riesgo de incendio. Se analiza el comportamiento de este índice en 4 regiones diferentes de la isla que representan a los principales tipos de cobertura vegetal en dicha isla.

Datos y metodología

Para el desarrollo de nuestro índice de riesgo estático o «Fire Risk Static Index» (FRSI) se han utilizado dos series temporales de dos sensores diferentes: 8 meses de datos NDVI obtenidos a partir de los correspondientes canales del sensor NOAA-AVHRR (Marzo-Septiembre 2005) y 4 meses de datos de NDVI del sensor TERRA-MODIS (Junio-Septiembre 2005)

El mapa de riesgo estático es una cartografía digital de riesgo de incendio en una determinada región combinando varias capas temáticas constantes en el tiempo. Empleando el álgebra de mapas se construye un modelo de probabilidad de que se origine un incendio en un punto cualquiera de la isla de la Palma mediante regresión logística multivariante. Las variables que se han considerado en nuestro modelo como posibles factores de riesgo de incendio son: altura, pendiente e inclinación del terreno, proximidad a carreteras y cobertura vegetal.

A partir de la interpolación del mapa de curvas de nivel se obtiene el de altura. Aplicando módulos específicos del software, en los que se incluye el operador gradiente, conseguimos los

mapas de pendiente e inclinación (o insolación). Se considera que a mayor riesgo de incendio, mayor será el valor que adopte la variable considerada. Así, por razones de humedad y temperatura, en la Isla objeto de estudio, durante la época estival existe mayor riesgo en las zonas altas que en las bajas. Por otro lado, los terrenos con mayor pendiente no es que tengan un mayor riesgo de incendio, pero sí que, en caso de producirse, propagarían con mayor rapidez las llamas, constituyendo por tanto un factor añadido de riesgo. En cuanto a la orientación, las zonas orientadas al sur sufren un estrés hídrico superior al resto, por lo que es de esperar que posean una mayor probabilidad de riesgo de incendio.

El mapa de elementos lineales en el que se encuentra el trazado de las carreteras asfaltadas de la isla es tratado para determinar el mapa de proximidad a las mismas, esto es, para cada punto de la zona estudiada, se calcula cuál es la carretera más próxima a él. A mayor proximidad a la carretera, mayor será el riesgo de incendio provocado por la acción humana, ya sea de forma voluntaria o fortuita.

Por su parte, en el mapa de cobertura vegetal, sólo se han considerado cuatro especies vegetales: laurisilva, retama, pinar y zonas cultivadas. A cada una de ellas se les ha asignado un peso, considerando el diferente grado de estrés hídrico al que se pueden ver sometidas, altura media y densidad de las mismas. Dado que cada variable se mueve en intervalos diferentes, con distintos orden de magnitud, se ha decidido pesarlás en el mismo modo descrito en un trabajo previo realizado por nosotros, aplicado a la isla de Tenerife (Hernández-Leal et al., 2006).

Una vez tratadas las variables temáticas, se construye el modelo matemático de probabilidad de incendio. Para ello, es necesario un mapa que contenga la historia reciente de focos de incendio originados en la zona de estudio. Mediante un modelo de regresión logística múltiple se establece la probabilidad de que la variable dependiente adopte el valor 1, siguiendo la expresión:

$$P(Y = 1) = \frac{e^{\sum(\alpha + \beta_i X_i)}}{1 + e^{\sum(\alpha + \beta_i X_i)}} \quad (1)$$

siendo Y la variable dependiente, X_i las variables independientes y α, β_i números reales. Una regresión logística nos permite obtener como resultado una variable discreta para un conjunto de variables de partida que pueden ser conti-

nuas, discretas, discontinuas o una mezcla de ellas. La aplicación de esta técnica en modelos de prevención de incendio puede ser consultada en Cruz et al. (2003).

Conociendo los valores que adopta la variable dependiente (focos de incendio producidos en un periodo de 12 años), se puede determinar cómo influye cada una de las variables independientes a través de los coeficientes α y β_i . Una vez calculados, se sustituyen en la expresión (1) y se obtiene el mapa de probabilidades de riesgo de incendio debido a las variables independientes del tiempo. Todas las capas de riesgo del modelo de riesgo estático, las clases dentro de cada variable y el producto final o FRSI se muestran en la Fig. 1

Finalmente, con el objetivo de introducir las condiciones actuales de la vegetación, esto es el factor dinámico en nuestro producto final, se ha realizado un estudio de la dinámica del estrés hídrico de la vegetación, usando para ello los datos de NDVI de los sensores AVHRR y MODIS, para las regiones consideradas en la Isla y los periodos mencionados previamente. Para evitar en lo posible la utilización de datos con contaminación nubosa se han usado composiciones multitemporales de 7 días para el NDVI del sensor AVHRR y de 15 días para el caso de los datos MODIS, basadas ambas en el método del Most Value Composite (MVC), según el cual cada pixel de la imagen compuesta retendrá el valor máximo de NDVI para el periodo bajo composición (Holben, 1986). Se han analizado un total de 28 composiciones multitemporales de NDVI en el periodo Marzo-Septiembre de 2005 para el caso de los datos AVHRR, mientras que para los MODIS, debido a la falta de datos para esta zona durante los meses de Marzo a Mayo, se restringió la serie temporal a los 4 meses que comprende el periodo Junio-Septiembre de 2005.

Resultados

Se ha generado un mapa o índice de riesgo estático que hemos dado en llamar FRSI, considerando en él los diferentes factores de riesgo ya comentados, esto es: tipo de cobertura vegetal, pendiente, altitud, proximidad a carreteras, horas de insolación y estadísticas de incendio acaecidos desde el año 1992 al año 2004 en la Isla de la Palma (España). Estas estadísticas de incendio reflejan el punto geográfico de inicio del incendio y la estimación del total de hectáreas afectadas. El detalle de las capas utilizadas en este mapa probabilístico así como el resultado final se muestran en la Fig. 1.

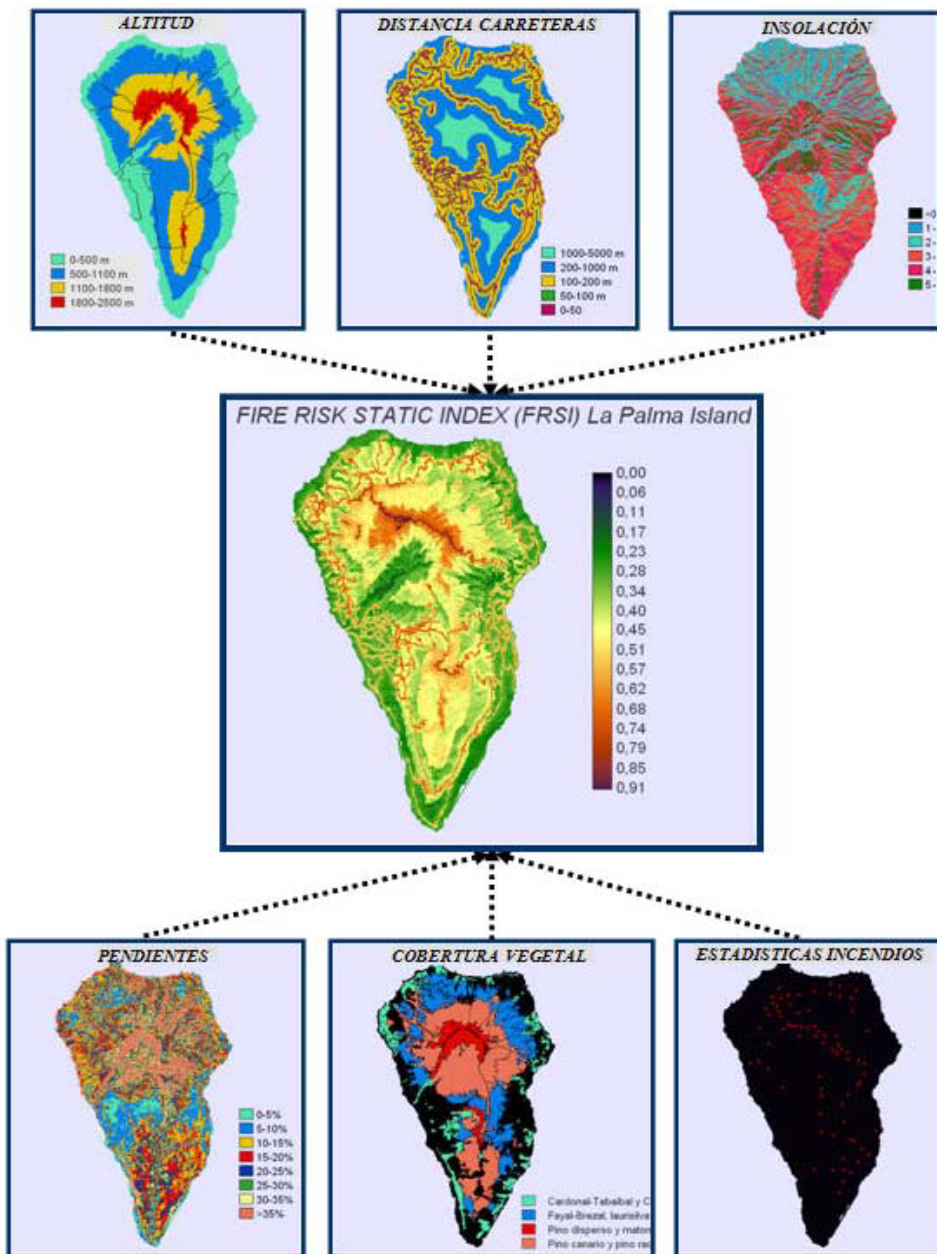


Fig. 1. Generación del mapa de riesgo estático de incendio o FRSI para la Isla de la Palma usando 6 capas temáticas: altitud, distancia a carreteras, insolación, pendientes, cubierta vegetal y estadísticas de incendios (periodo 1992-2004).

Ahora bien, con el objetivo de dar una representación dinámica del riesgo de incendio a través de una variable que pueda ser estimada a partir de datos de satélite, se ha recurrido a métodos indirectos de estimación del estrés hídrico de la vegetación. En los últimos años se han introducido diferentes variantes para la estimación de este parámetro (Ceccato et al., 2002), si bien el NDVI sigue siendo aún uno de los índices más utilizados como medida indirecta del estrés hídrico. Así, con el propósito de obtener una representación que tenga no sólo en cuenta las disminuciones en los valores de NDVI, como indicador del estrés, sino también las variables de riesgo incluidas en el índice estático o FRSI, se define un nuevo índice de riesgo, en este caso dinámico, que hemos denominado Fire Risk Dynamic Index (FRDI), definido como sigue:

$$FRDI = (1-NDVI)*FRSI \quad (2)$$

Se trata de un índice adimensional con valores comprendidos en el intervalo 0 a 1 para píxeles de tierra, de manera que valores más elevados representarán un mayor nivel de riesgo asociado a dicho píxel. Esta ecuación ha sido aplicada a las series de datos compuestos MVC de NDVI tanto de datos AVHRR como MODIS. Hemos seleccionado cuatro zonas diferentes (REG1..REG4) en la Isla de la Palma en las que la región 1, constituida fundamentalmente por una especie autóctona (*Pinus Canariensis*) abarca la zona que finalmente se vio afectada por el gran incendio de Septiembre de 2005 (Fig. 2). El resto de las regiones se han seleccionado como representativas de los principales tipos de cobertura del suelo presentes en la isla. La Fig. 2 muestra estas regiones sobre el mapa dinámico o FRDI obtenido por aplicación de la Eq. 2, tanto a las composiciones multitemporales del sensor AVHRR como a los MODIS, en este caso particular, se muestra el mapa de riesgo para la última composición previa al incendio cuyo inicio tuvo lugar el 4 de Septiembre de 2005.

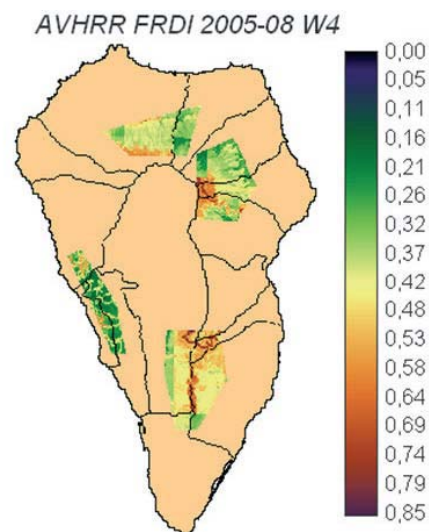
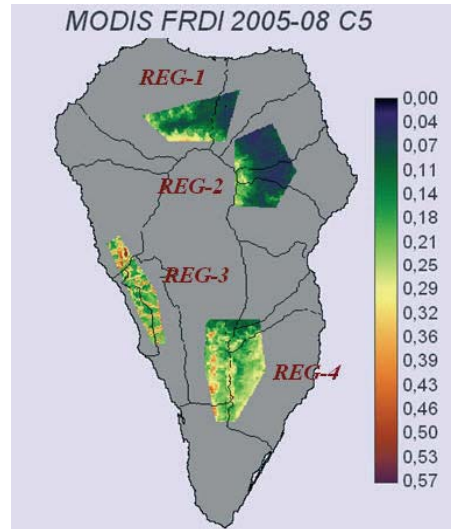


Fig. 2. Mapas de riesgo dinámico (FRDI) para las composiciones temporales de datos AVHRR y MODIS en los periodos previos al incendio del 5 de Septiembre de 2005.

El análisis de los gráficos de valores promedio de FRDI para todas las regiones, obtenido a partir de los datos AVHRR (Fig. 3), permite visualizar en las curvas de ajuste polinomial, el aumento gradual, durante las semanas previas al incendio, en el valor de riesgo asociado a dichas regiones.

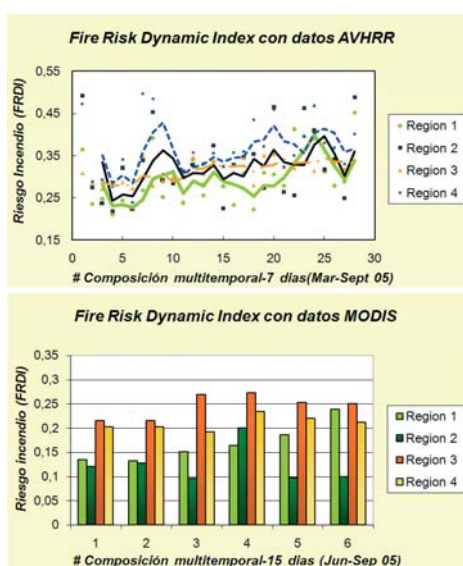


Fig. 3. Representaciones gráficas de la evolución del índice de riesgo dinámico (FRDI) tanto para datos AVHRR como MODIS, en las 4 regiones seleccionadas en la Isla de la Palma.

Esta tendencia es especialmente relevante en el caso de la región 1, esto es, la zona al Norte de la Isla que finalmente fue afectada por el incendio. Por su parte si analizamos la evolución de los valores promedio de FRDI para las composiciones MODIS, se observa una tendencia similar en los gráficos de barras de las regiones consideradas. El acortamiento de la serie temporal para el caso MODIS y la extensión temporal de cada periodo de composición (15 días- 2 MVC por mes), no nos permite realizar un análisis detallado de la evolución dinámica del estrés hídrico, aunque nos da una aproximación aceptable. En definitiva, ambas clases de datos de satélite demuestran su bondad para actuar como datos de entrada en modelos de predicción de las áreas con mayor riesgo. No obstante la mejor resolución espacial de los datos MODIS puede resultar más adecuada si se desea un análisis de riesgo más detallado, en zo-

nas con una extensión geográfica limitada, como es el caso de una isla de las proporciones de la que hemos analizado (720 km²).

Conclusiones

Se ha desarrollado un índice de riesgo de incendio de carácter estático para la isla de la Palma, que tiene en cuenta factores como la pendiente, proximidad a carreteras, horas de insolación, tipo de cubierta vegetal y estadística de incendios. Además, el uso de diferentes sensores de satélites ha contribuido a demostrar la utilidad de los mismos para la determinación indirecta del estrés hídrico y la introducción de este parámetro en un modelo dinámico de riesgo que hemos dado en denominar Fire Risk Dynamic Index

El análisis del Fire Risk Dynamic Index (FRDI) obtenido a partir de datos AVHRR y MODIS sobre la capa estática de riesgo o FRSI, nos permite observar con claridad el aumento en el indicador de riesgo para la semana y los 15 días previos al dramático incendio que tuvo lugar en la Isla de la Palma (Islas Canarias-España) durante la primera semana de Septiembre de 2005, con un resultado final de 2150 hectáreas quemadas. Aunque los valores de riesgo obtenidos para los datos AVHRR tienen una gran variabilidad en las 4 zonas seleccionadas, debido fundamentalmente a su abrupta orografía y a la posible persistencia de píxeles parcialmente contaminados por nubes, las curvas de ajuste polinomial muestran una marcada tendencia al alza en el índice de riesgo, particularmente en la región afectada, debido principalmente al efecto de la sequía originada por un verano especialmente caluroso como el de 2005

Finalmente es importante destacar que el trabajo aquí presentado forma parte de un proyecto de investigación, cuyo objetivo es el desarrollo del mapa completo de riesgo de incendios para todas las islas Canarias con cubierta forestal. La adecuación de los modelos de riesgo generados ha sido validada en trabajos previos con datos de incendios acaecidos en la Isla de Tenerife, pero aún ha de ser aplicado a otras islas y validados en diferentes condiciones de contorno. Nuestro próximo objetivo es la inclusión en el modelo de riesgo de datos de la red de estaciones meteorológicas de que disponen diversos organismos oficiales, así como la realización de diferentes campañas de medidas radiométricas in situ que permitan caracterizar de una forma más adecuada los diferentes tipos de superficies y la parametrización del nivel de riesgo asociado a las mismas.

Agradecimientos

Expresamos nuestra más sincera gratitud al Área de Medioambiente y Política Territorial del Excmo. Cabildo Insular de la Palma (Islas Canarias) por habernos proporcionado las estadísticas de incendio utilizadas en la generación del mapa de riesgo estático. Este estudio ha sido financiado por la DGUI del Gobierno Autónomo Canario (Proyecto de investigación PI042005/108) y por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto de Investigación CGL2004-06099-C03-02/CLI)

Referencias

- Calle, A, Casanova, J. L., Romo, A. Fire detection and monitoring using MSG Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SE-VIRI) data. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, G04S06, doi:10.1029/2005JG000116, 2006.
- Ceccato, P. Gobron, N. Flasse, S., et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. 1. Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82, 188-197, 2002.
- Chladil, M. A., Nuñez, M., Assessing grassland moisture and biomass in Tasmania. The application of remote sensing and empirical models for a cloudy environment. *International Journal of Wildland Fire*, 5, 165-171, 1995.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Cocero, D. et al. Design of and empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1621-1637, 2003.
- Chuvieco, E. Cocero D. Riaño, D., et al. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating, 92, 322-331, 2004.
- Cruz, M. G., Alexander, M. E., Wakimoto, R. H. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices. *Forestry Chronicle*, 79, 976-983, 2003.
- Gabban, A., San-Miguel-Ayanz, J. Barbosa, et al. Analysis of NOAA-AVHRR NDVI inter-annual variability for forest fire risk estimation. *International Journal of Remote Sensing*, (27) 8, 1725-1732, 2006.
- Holben, B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1511-1519, 1986.
- Hernandez-Leal P. A., Arbelo, M., Gonzalez-Calvo, A. Fire Risk assessment using satellite data, *Advances in Space research*, (37(4), 741-746, 2006.
- Jang, J.D. Thermal-Water stress index from satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, (27) 8, 1619-1639, 2006.
- Leblon, B. Forest wildfire hazard monitoring using remote sensing. A review. *Remote Sensing Reviews*, 20(1), 1-57, 2001
- Pereira, M. C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remotes Sensing*, 37, 217-226, 1999.
- Roy, D. P., Boschetti, L., Trigg, S. N. Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the performance of the Normalized Burn Ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, (3), 1, 112- 116, 2006.