

Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA-MODIS

Vegetation indices as fire risk indicators using TERRA-MODIS images

M. Bisquert¹, J. M. Sánchez², V. Caselles¹, M. I. Paz Andrade³ y J. L. Legido⁴
Maria.Mar.Bisquert@uv.es

¹ Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, Burjassot, 46100

² Dpto. Física Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, 02071

³ Dpto. Física Aplicada, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 15782

⁴ Dpto. Física Aplicada, Universidad de Vigo, Vigo, 36200

Recibido el 31 de julio de 2009, aceptado el 10 de diciembre de 2009

RESUMEN

Los incendios forestales son una catástrofe para la naturaleza. En zonas como Galicia los incendios forestales son muy frecuentes y devastadores, por lo que son muy importantes las tareas de prevención y los modelos de predicción de riesgo de incendio.

Los índices de vegetación y de humedad se pueden utilizar para caracterizar el estado de la vegetación, sin embargo, cada tipo de vegetación responde mejor a un índice en particular. En este trabajo recurrimos a ocho índices diferentes, para analizar cuál es más apropiado en la región de Galicia. También se extiende el estudio a la región colindante de Asturias. Se ha empleado una serie de 6 años de imágenes de los productos MOD09 A1 y MOD13 Q1 del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), así como información de los incendios registrados durante el mismo periodo en base a una cuadrícula de 10x10 Km. El porcentaje de casos afectados con incendio se ajusta bastante bien a la variación que experimentan algunos de los índices estudiados, tanto para Galicia como para Asturias, siguiendo una distribución lineal. El Enhanced Vegetation Index (EVI) se muestra como el más favorable de todos ellos, con un error de estimación de probabilidad de que se produzca incendio

ABSTRACT

Forest fires are a catastrophe for nature. In areas such as Galicia, forest fires are frequent and devastating. For these reasons, prevention tasks and the development of fire risk models become very important.

Vegetation and moisture indices can be used to monitor the vegetation status; however the different indices do not work the same in different vegetation species. In this paper, we have selected eight different spectral indices in order to analyze which is the most appropriate in Galicia. This study is extended to the adjacent region of Asturias. Six years of images from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) products MOD09 A1 and MOD13 Q1, together with fire data in a 10x10 km grid basis were used. The percentage of fire events fits the variations suffered by some of the spectral indices, following a linear distribution in both, Galicia and Asturias. The Enhanced Vegetation Index (EVI) seems to be the most appropriate, with an estimation error of the fire probability ranging between 11% in Galicia and 18% in Asturias. Based on these results we establish a three level risk classification. This work is a step forward in the labour of contributing to improve the efficiency of the fire prevention systems currently in use, by the application of remote sensing techniques.

variando entre el 11% para Galicia y el 18% para Asturias. En base a dicha probabilidad se establece una clasificación de las cuadrículas que permite identificar tres niveles diferentes de peligrosidad. Este trabajo supone un paso más en nuestra labor de contribuir a aumentar la eficiencia de los sistemas de prevención de incendios que se utilizan actualmente, mediante el uso de las técnicas de teledetección.

PALABRAS CLAVE: índices de vegetación, MODIS/Terra, riesgo de incendio, Galicia, Asturias.

KEYWORDS: vegetation indices, MODIS/Terra, fire risk, Galicia, Asturias.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los incendios forestales son un fenómeno altamente destructivo para la naturaleza. Los efectos de los incendios no se limitan únicamente a la vegetación, afectan también, y de manera muy importante, a los suelos, provocando su degradación y erosión (Martín *et al.*, 2009), a la diversidad de las especies (Lozano *et al.*, 2007) e incluso a vidas humanas. Además son una importante fuente de emisión de CO₂ así como de otros gases de efecto invernadero (Palacios-Orueta *et al.*, 2005).

En España, de acuerdo con las estadísticas del Ministerio de Medio Ambiente, entre los años 1996-2005 se produjeron una media anual de 20.887 incendios, de los cuales, aproximadamente el 60% fueron intencionados¹. En este período, la superficie forestal media quemada cada año alcanza las 123.459 ha. En concreto la Comunidad de Galicia es una zona especialmente afectada por los incendios forestales, en ella tienen lugar entorno al 50% de los incendios de España, mientras que en una región tan próxima como Asturias ocurren sólo el 8%. En cuanto a la superficie forestal afectada, en Galicia supone el 25% de toda la superficie forestal quemada en España, y en Asturias el 9%.

La prevención de los incendios forestales se está convirtiendo en un punto fundamental en la lucha contra el fuego. Existen distintos modelos que proporcionan índices de riesgo de incendio basándose en la combinación de distintas variables como pueden ser datos meteorológicos, historial de incendios en la zona, proximidad a carreteras y/o pueblos, etc., (Castro *et al.*, 2003; Alonso-Betanzos *et al.*, 2003;

Aguado *et al.*, 2007). Sin embargo en ocasiones es necesaria la recogida de información sobre el propio terreno, resultando muy costoso en términos económicos, de tiempo y de recursos humanos. El uso de la teledetección facilita en gran medida estas tareas, por lo que se ha aplicado ya en muchos estudios para obtener parámetros que se incluyen en modelos de peligro de incendio (Sebastián-López *et al.*, 2002; Chuvieco *et al.*, 2004; Maki *et al.*, 2004; Lozano *et al.*, 2008).

En diversos estudios se ha demostrado la existencia de una relación entre los incendios y el estado de la vegetación (Schneider *et al.*, 2008; Lozano *et al.*, 2007 y 2008), en concreto el estado hídrico de la vegetación es un factor decisivo en la generación y propagación de los incendios (Maki *et al.*, 2004). El parámetro más usado para la caracterización de la humedad de las plantas es el FMC (Fuel Moisture Content), sin embargo, la medida de este parámetro requiere de muestreos en superficie, por lo que su aplicación directa a la predicción de incendios se ve muy limitada. La teledetección se muestra como una buena alternativa a las medidas de campo. La vegetación presenta una curva espectral característica cuando está sana, sin embargo esta curva cambia con diferentes factores, como pueden ser la humedad, el contenido de clorofila, la estructura de la planta, etc. En la zona del infrarrojo medio se encuentran las bandas de absorción de agua donde son más apreciables las variaciones en la humedad de las plantas, en concreto la reflectividad en estas bandas aumenta al disminuir el FMC. Sin embargo una disminución del contenido en agua afecta a la cantidad de clorofila en la planta y a la estructura interna de las hojas y en consecuencia a la actividad fotosintética y a la respuesta espectral de la vegetación dando lugar a una disminución de las reflectividades en el

¹ http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios/index.htm

visible y en el infrarrojo cercano. Estas diferencias en las curvas espectrales de la vegetación sana y la vegetación con alguna deficiencia se pueden caracterizar mediante la medida de su reflectividad desde satélite. Se han llevado a cabo numerosos estudios en los que se ha relacionado el FMC con los datos de satélite (Dennison *et al.*, 2005; Stow *et al.*, 2005), en especial con índices que incluyen bandas del infrarrojo medio. Algunos estudios han ido más allá, demostrando que los índices de vegetación se pueden utilizar directamente para caracterizar el estado hídrico de la vegetación (Yebra *et al.*, 2008; Cheng *et al.*, 2006). En algunos trabajos ya se ha visto que los índices de vegetación, en ocasiones, son útiles para obtener índices de riesgo de incendio (Chuvieco *et al.*, 2004; Maselli *et al.*, 2003). Sin embargo en cada estudio se llega a conclusiones diferentes en cuanto al índice de vegetación que se debe utilizar para obtener el riesgo de incendio.

El motivo es que la respuesta espectral de la vegetación, según el contenido de humedad, puede variar en función de la especie. Por lo tanto hay que encontrar, en cada caso, el índice que mejor reproduce los cambios en el estado de la vegetación, y que, por consiguiente, mejor representa la relación entre el estado de la vegetación y los incendios en la zona de estudio. En el trabajo de Yebra *et al.* (2008), se llevó a cabo un estudio con el fin de encontrar el mejor índice para caracterizar el FMC en una zona de pastizal y otra de arbustos, encontrando que los índices basados en el rojo/infrarrojo cercano (EVI: Enhanced Vegetation Index, NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index) proporcionan mejores resultados en la zona de pastizal, mientras que los basados en el infrarrojo cercano e infrarrojo de medio (NDII: Normalized Difference Infrared Index, GVMI: Global Vegetation Moisture Index, NDWI: Normalized Difference Water Index) funcionan mejor en arbustos. Cheng *et al.* (2006) compararon diversos índices espectrales en una zona de cultivo y arbustos y otra de bosque de coníferas, observaron los mejores resultados con el EVI en la primera zona y con el NDWI en la segunda.

El trabajo que aquí presentamos tiene como objetivo estimar el estado del combustible vegetal a través de técnicas de teledetección con el fin de obtener un parámetro más a incluir en el sistema de predicción de riesgo de incendios en las regiones de Galicia y Asturias. En un primer trabajo (Sánchez *et al.*, 2008) se compararon el NDVI y el EVI como indicadores del estado de la vegetación con el fin de ob-

tener un índice de riesgo de incendio centrado en la comunidad de Galicia. Se eligió finalmente el EVI por representar mejor los cambios en el estado de la vegetación y porque el NDVI se satura en zonas con mucha vegetación, como es el caso de Galicia. En el presente trabajo se realiza un estudio más exhaustivo, comparando diferentes índices espectrales, rescatados de la bibliografía, como indicadores del riesgo de incendio en la propia comunidad de Galicia, y se extiende el estudio a la comunidad vecina de Asturias.

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

Galicia ocupa una superficie de 29.575 km² y Asturias 10.604 km². Cerca del 70% de la superficie de ambas regiones es forestal según el Segundo Inventario Forestal Nacional. En Galicia predominan los bosques de coníferas (especialmente de pino resinero), pero hay también una población muy importante de especies frondosas como son el roble, el eucalipto blanco y el castaño común. En Asturias son más abundantes los bosques de especies frondosas, principalmente formados por castaño común, hayas y robles, aunque se encuentran también poblaciones considerables de coníferas (pino resinero, pino rojo y pino de California). En ambas comunidades existen además grandes superficies de pastizales. El clima de estas regiones es lluvioso debido a los vientos dominantes del oeste que traen masas de aire húmedas, y las temperaturas son suaves.

Los organismos que luchan contra los incendios forestales, trabajan sobre una cuadrícula que divide España en casillas de 10x10 km de extensión, en base a la proyección UTM (Universal Transverse Mercator). Las series históricas de incendios forestales en España están basadas en esta cuadrícula. Por esta razón caracterizamos el estado de la vegetación con la misma resolución espacial.

En trabajos anteriores nos centramos en el estudio de la vegetación utilizando el producto MOD13 Q1 de MODIS, el cual proporciona datos de EVI y NDVI con una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días. En dichos trabajos se vio que la probabilidad de incendio se podía relacionar con la variación temporal del EVI. En esta ocasión hemos decidido ampliar el estudio y, además de utilizar el producto MOD13 Q1, hemos utilizado el producto MOD09 A1 de MODIS, que proporciona reflectividades en 7 bandas diferentes con una resolución es-

pacial de 500 m y temporal de 8 días, con el fin de obtener y comparar otros índices espectrales. Se obtuvieron las imágenes de ambos productos para el periodo 2001-2006 (<https://lpdaac.usgs.gov/content/view/sitemap/2>). Para ese mismo periodo, la Universidad de Santiago de Compostela nos facilitó los datos de incendios de Galicia y Asturias, con la excepción del año 2006 en Asturias.

MÉTODOS

El estudio llevado a cabo consiste en una comparación de ocho índices espectrales diferentes como indicadores del riesgo de incendio. La respuesta espectral de los distintos índices es diferente frente a los cambios experimentados por la vegetación.

En primer lugar se selecciona el periodo de estudio, a continuación se lleva a cabo el procesado de las imágenes MODIS, seguidamente se obtienen los distintos índices espectrales y se buscan relaciones empíricas entre las variaciones de los índices y la frecuencia de incendios en las distintas zonas de es-

tudio y finalmente se define una escala de niveles de riesgo de incendio.

Período de estudio

En la figura 1 se muestra el histograma del valor medio de número de incendios para el periodo de estudio. Observamos que la mayoría de los incendios se concentran entre el mes de febrero y la primera quincena de octubre en Galicia mientras que en Asturias la segunda quincena de octubre también es importante, por lo que restringimos el estudio a estos periodos. Además se aprecia una diferencia en cuanto a los picos de verano e invierno. Para Asturias el pico centrado en marzo es más importante que el de verano, mientras que en Galicia sucede todo lo contrario. El número de incendios es muy superior en Galicia, esto hace prever dificultades a la hora de encontrar relaciones en Asturias, por la escasa estadística que se plantea. Por todo esto, el estudio se realiza por separado en cada comunidad.

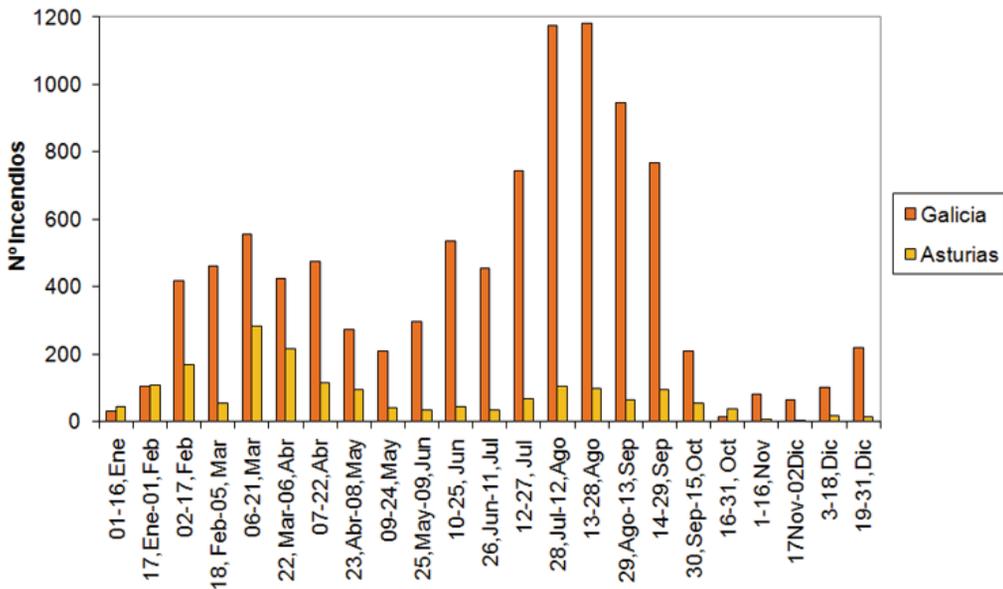


Figura 1. Número medio de incendios, acumulados en periodos de 16 días, de los años 2001 a 2006 en las regiones de Galicia, y de los años 2001 a 2005 en Asturias

Procesado de las imágenes MODIS

Las imágenes del producto MOD09 A1, son imágenes resultado de una composición de 8 días con una resolución espacial de 500 m frente a los 16 días y 250 m del MOD13 Q1. El tener una imagen composición de varios días permite obtener una mayor cobertura espacial delimitando el efecto de las nubes. Aún así siguen apareciendo píxeles cuya información no es fiable debido a la presencia de nubes, a algún error del sensor, etc. Por todo ello, en primer lugar realizamos un filtrado basándonos en la información contenida en la banda de calidad, incluida en el mismo producto, quedándonos solamente con los píxeles que no presentan nubes, sombras o nieve. Por otra parte, se crea una máscara de cuerpos de agua (océanos, ríos y lagos) y grandes ciudades, obtenida a partir de información del Corine Land Cover 2000. Estos píxeles quedarán fuera del estudio, ya que sabemos que no son píxeles de vegetación.

Además se ha necesitado un tratamiento especial para algunas de las imágenes del producto MOD09, en concreto para la banda 5, debido a la presencia de ruido. La banda 5 de MODIS es una banda de absorción de agua, con lo cual es importante para caracterizar el estado hídrico de la vegetación y se utiliza en uno de los índices más comunes para la estimación de la humedad de las plantas, el NDWI, por todo ello debe tratarse el problema del ruido observado y no descartar dicha banda. Este ruido es fácilmente visible debido a que presenta valores considerablemente superiores a los valores de los píxeles vecinos. Se presenta en forma de líneas diagonales de un píxel de grosor, con lo cual para eliminarlo es suficiente crear una matriz de 3x3 píxeles que recorra toda la imagen y calcule la diferencia entre el valor de cada píxel y la media de los píxeles de alrededor. Si esta diferencia es superior a un umbral preestablecido, el píxel central se considera píxel con ruido. Con los píxeles que presentan ruido creamos otra máscara que aplicamos a la imagen original. Una vez aplicadas estas máscaras, llevamos a cabo un proceso de rellenado con el objetivo de asignar valor a aquellos píxeles o pequeños grupos de píxeles que han sido enmascarados por considerarse no fiables o con ruido, dejando fuera del estudio los píxeles de agua o de zonas urbanas. El proceso de rellenado consiste en aplicar una matriz de 5x5 píxeles a aquellos píxeles catalogados como erróneos o sin datos y que asigna al píxel central el valor medio de los píxeles de alre-

dedor de los que sí disponemos de información. A continuación se hace la composición de dos imágenes consecutivas, para obtener una imagen cada 16 días, tomando la media de las dos imágenes para cada píxel si se tiene información de ambos píxeles o, en el caso de que uno de los píxeles esté enmascarado se asigna el valor del píxel de la otra imagen. Pese a que el producto MOD09 A1 proporciona datos con resolución temporal de 8 días se decidió seguir trabajando con 16 días porque una disminución del índice de vegetación durante un periodo prolongado es más significativa de cara a la predicción de incendios. Además, debido al clima de la zona, en el producto MOD09 A1 hay muchos problemas de nubes. Al hacer esta composición se gana información de algunos píxeles de los que podría no haber información en alguna de las dos imágenes. Finalmente superponemos la cuadrícula de 10x10 km con la que trabajan los organismos y autoridades encargados de la lucha contra incendios, y calculamos el valor medio de todos los píxeles con información contenidos en cada una de las celdas, siempre y cuando en la casilla haya al menos un 10% de tierra y tengamos información de al menos el 80% de los píxeles de tierra de la celda. Al trabajar con una resolución de 10x10 km se pierde detalle en la información pero es necesario hacerlo así para poder relacionar la información de la vegetación con el número de incendios.

Las imágenes del producto MOD13 Q1 se proporcionan con una resolución temporal de 16 días y no presentan ruido por lo que únicamente necesitan de los procesos de filtrado, rellenado y obtención del valor medio de las cuadrículas.

Obtención de los índices espectrales

Los índices espectrales elegidos para el estudio se presentan en la tabla 1. Esta recopilación está basada en los diferentes estudios que existen en la bibliografía (Maki *et al.*, 2004; Stow *et al.*, 2005; Dennison *et al.*, 2005; Verbesselt *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2006; Yebra *et al.*, 2008) en los que se usan estos índices para caracterizar el estado hídrico de la vegetación o para obtener un índice de riesgo de incendio. Se trata de diferentes combinaciones de las bandas del visible y/o infrarrojo del sensor MODIS, en concreto las bandas que se utilizan son: banda 1 (620-670nm), banda 2 (841-876nm), banda 3 (459-479nm), banda 4 (545-565nm), banda 5 (1230-1250nm) y banda 6 (1628-1652nm).

La mayoría de estudios se aplican a zonas de pas-

tizal y arbustos, obteniendo que, en las zonas de arbustos, los índices del infrarrojo cercano y medio (NDII, GVMI, NDWI) representan mejor el estado hídrico de la vegetación (Yebra *et al.*, 2008; Dennison *et al.*, 2005). Sin embargo, en Maki *et al.* (2004) en una zona de coníferas, se llega a la conclusión de que para conocer la humedad se puede utilizar el NDWI, pero para obtener el riesgo de incendio, se necesita, además, conocer la cantidad de vegetación, para ello utilizan el NDVI. Sin embargo en nuestras zonas de estudio hay zonas con vegetación muy densa donde algunos índices, como el NDVI, se saturan y no representan bien los cambios de la vegetación. Además, el NDVI se ve afectado por las contribuciones del suelo y de la atmósfera. Para evitar las contribuciones del suelo se definió el SAVI, el cual es una modificación del NDVI que incluye un parámetro relacionado con la cantidad de vegetación. Los índices GEMI y VARI se diseñaron para eliminar las perturbaciones atmosféricas, y el EVI tiene en cuenta los dos efectos, contribución del suelo y perturbaciones atmosféricas.

Relación entre la frecuencia de incendios y las variaciones de los índices espectrales

La variación de los índices entre dos fechas indica el aumento o disminución del verdor de la vegetación, lo cual está relacionado con el estado hídrico de las plantas. Basándonos en la idea de que el riesgo de incendio es mayor en zonas y épocas de sequía, enfrentamos las variaciones de los índices entre dos periodos de 16 días y la frecuencia de incendios en el periodo posterior.

El proceso es el mismo para todos los índices. En primer lugar, restamos dos imágenes consecutivas. A continuación, agrupamos las casillas en intervalos de 0,01 en términos de variación del índice y contamos las casillas en las que se ha registrado algún incendio en cada intervalo. Para que las variaciones sufridas por los índices sean realistas, es decir, que no sean consecuencia de algún incendio, filtramos la base de datos, eliminando del estudio las casillas en las que se haya registrado algún incendio durante las dos semanas anteriores al periodo de estudio, ya que al haber un incendio se produciría una

Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1 + L} (1 + L) \quad L=0,25$	Huete, 1988
Normalized Difference Infrared Index	$NDII = \frac{\rho_2 - \rho_6}{\rho_2 + \rho_6}$	Hunt and Rock, 1989
Global Environmental Monitoring Index	$GEMI = \frac{\rho_2 - 0,125}{1 - \rho_1} - \frac{\rho_1 - 0,125}{1 - \rho_1}$ $eta = \frac{2(\rho_2^2 - \rho_1^2) + 1,5\rho_2 + 0,5\rho_1}{\rho_2 + \rho_1 + 0,5}$	Pinty and Verstraete, 1992
Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5}$	Gao, 1996
Visible Atmospheric Resistant Index	$VARI = \frac{\rho_4 - \rho_1}{\rho_4 + \rho_1 - \rho_3}$	Gitelson <i>et al.</i> , 2002
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2,5 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + 6\rho_1 - 7,5\rho_3 + 1}$	Huete <i>et al.</i> , 2002
Global Vegetation Moisture Index	$GVMI = \frac{(\rho_2 + 0,1) - (\rho_6 + 0,02)}{(\rho_2 + 0,1) + (\rho_6 + 0,02)}$	Ceccato <i>et al.</i> , 2002

Tabla 1. Índices espectrales para la estimación del estado de la vegetación a partir de MODIS

disminución importante del índice de vegetación. Al dividir el número de casillas con incendios entre el número de casillas total en cada intervalo obtenemos el porcentaje o la frecuencia de casillas con incendio para cada caso. Al representar gráficamente la probabilidad de incendio (frecuencia de casillas con incendio) frente a la variación sufrida por el índice se puede determinar si existe alguna relación entre estos dos parámetros.

Utilizamos el 50% de la serie temporal para obtener la relación y el otro 50% para validación. La selección de los dos grupos de datos se hace mediante una función aleatoria.

Definición de una escala de riesgo de incendio

En los sistemas operativos de predicción de riesgo de incendios trabajan con escalas graduadas en base a una clasificación previa, por lo tanto a partir de los resultados obtenidos definiremos unos niveles de riesgo en función de la variación de los índices. Una clasificación adecuada de niveles de riesgo es la que proponemos a continuación, basada en las escalas graduadas de los sistemas operativos de predicción de riesgo de incendio. Dicha clasificación se toma del trabajo de Sánchez *et al.* (2008) donde se obtuvo empíricamente de forma que la probabilidad de incendio en los distintos niveles no se solapara y que el porcentaje de casos en los tres niveles fuera significativo.

Riesgo alto: Δ índice $< -0,03$

Riesgo medio: $-0,03 < \Delta$ índice $< 0,03$

Riesgo bajo: Δ índice $> 0,03$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado el análisis para las regiones de Galicia y Asturias, se encuentra que existe una relación lineal entre la variación experimentada por tres de los índices utilizados y la frecuencia de los incendios, en concreto se observa una tendencia creciente de la frecuencia de incendios al disminuir el valor del índice de vegetación. Una disminución de los índices es un indicador de la salud de la planta, cuando la planta no dispone de agua o nutrientes suficientes se vuelve amarillenta y el índice de vegetación disminuye, es entonces cuando la vegetación es más vulnerable a los incendios. Los tres índices cuya variación presenta una relación lineal con la frecuencia de incendios son el EVI, el GEMI y el SAVI calculados a partir de las reflectividades del producto MOD09 y el EVI proporcionado directa-

mente por el producto MOD13. En el ajuste del resto de los índices no se aprecia ninguna relación con los incendios, por lo que nos centraremos en los tres índices para los que sí se aprecia una relación clara. De acuerdo con el trabajo de Maki *et al.* (2004) hemos comprobado que los índices relacionados con la humedad no presentan una relación clara con la probabilidad de incendio. Cabría pensar que el problema del ruido en la banda 5 podría estar relacionado con los malos resultados obtenidos al utilizar el NDWI, sin embargo no consideramos que sea así ya que se ha comprobado el proceso de rellenado aplicándolo a píxeles sin nubes y se obtiene que las diferencias entre el valor original del píxel y el valor asignado por el proceso de rellenado son inferiores a 0,1 en más del 90% de los casos, teniendo en cuenta que se trabaja con un valor promedio de una casilla con alrededor de 400 píxeles, no se considera un efecto importante. Además se ha visto que ninguno de los índices que incluyen bandas de absorción de agua son buenos indicadores del riesgo de incendio en Galicia. En cuanto a los índices de vegetación, en zonas como Galicia y Asturias donde predominan los bosques de árboles altos, podemos pensar que serán más importantes las perturbaciones atmosféricas que la contribución del suelo, de hecho hemos comprobado que los índices que mejor caracterizan el estado de la vegetación son el GEMI y el EVI. Según este razonamiento, cabría esperar que el VARI ofreciera resultados similares al GEMI y al EVI, sin embargo, este índice se definió en una zona de trigo, muy diferente a la vegetación de Galicia y Asturias, por lo tanto no es de extrañar que no caracterice bien el estado de la vegetación en nuestras zonas de estudio. Por otra parte hay que tener en cuenta que la metodología propuesta se basa en la variación que sufren los índices, mientras que en la bibliografía se suele utilizar el índice directamente, esto puede dar lugar a conclusiones diferentes. En la figura 2 representamos el porcentaje de casillas afectadas por incendio en función de la variación de cada índice en las regiones de Galicia y Asturias. La distribución de los puntos se ajusta bastante bien a una línea recta. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se obtienen coeficientes de regresión que varían entre 0,63 y 0,83 en Galicia y entre 0,62 y 0,72 en Asturias. En la tabla 2 se muestra un resumen de las variables del ajuste para estos índices, cabe destacar que tanto para Galicia como para Asturias el ajuste con mejor coeficiente de correlación se obtiene cuando se utiliza el EVI del producto MOD13.

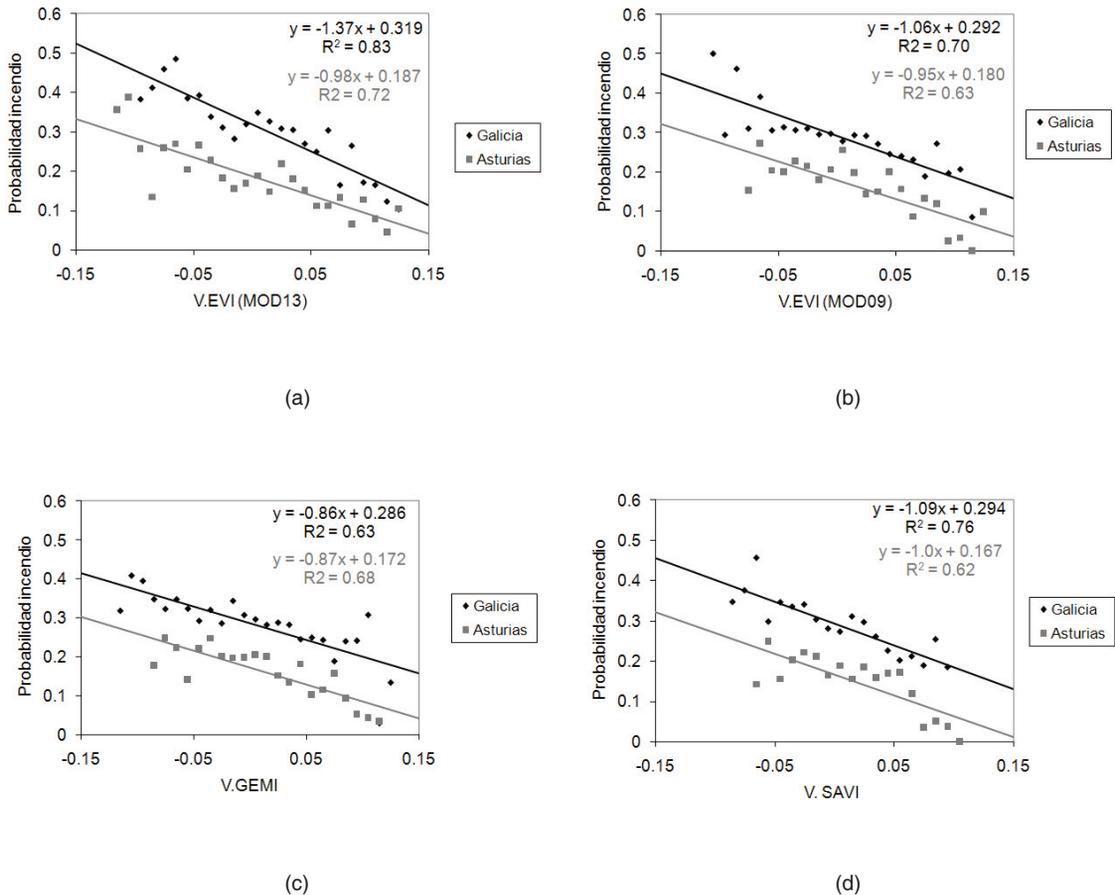


Figura 2. Ajuste lineal entre el porcentaje de casillas con incendio en Galicia y Asturias y la variación que sufre el índice en las dos semanas anteriores para el 50% de los datos y los índices: a)EVI (MOD13), b)EVI(MOD09), c)GEMI, d)SAVI

Región	Índice	a	b	r ²	σ	n
GALICIA	GEMI	-0,86±0,14	0,286±0,010	0,63	0,05	8,774
	EVI	-1,06±0,15	0,292±0,010	0,7	0,05	8,761
	SAVI	-1,09±0,15	0,294±0,008	0,76	0,04	8,645
	EVI (MOD13)	-1,37±0,13	0,319±0,009	0,83	0,04	7,527
ASTURIAS	GEMI	-0,87±0,14	0,172±0,008	0,68	0,04	3,442
	EVI	-0,95±0,17	0,180±0,011	0,63	0,05	3,450
	SAVI	-1,0±0,2	0,167±0,011	0,62	0,05	3,447
	EVI (MOD13)	-0,98±0,13	0,187±0,009	0,72	0,05	2,895

Tabla 2. Resultados de la regresión lineal entre el porcentaje de casillas con incendio y la variación del índice espectral (a: pendiente, b: ordenada en el origen, r²: coeficiente de regresión, σ: desviación estándar, n: número de sucesos considerados)

Para la validación se aplican las ecuaciones obtenidas para cada índice a las variaciones del mismo en los datos que se habían reservado para validar, y se compara el resultado obtenido con los datos de los incendios registrados durante esos años. En la tabla 3 se presentan los resultados de este ajuste, así como un análisis estadístico del mismo (Willmott, 1982). Al igual que se observaba en la tabla 2, los mejores coeficientes de correlación se obtienen cuando se utiliza el EVI proporcionado por el producto MOD13, además utilizando este índice se obtienen errores sistemáticos y relativos menores. En base a este análisis podemos concluir que el EVI

proporcionado por el producto MOD13 nos ofrece mejores resultados tanto en Galicia como en Asturias. Por tanto, utilizando este índice se puede estimar la probabilidad de que se produzca algún incendio en una casilla con un error en torno al 10% en Galicia e inferior al 20% en Asturias.

Al aplicar la clasificación de los niveles de riesgo se tiene que aproximadamente el 50% de las casillas están catalogadas con riesgo medio, en torno al 20% con riesgo alto y un 30% con riesgo bajo. Además se comprueba (figura 3 y tabla 4) que la mayor frecuencia de incendios se da en las casillas catalogadas con nivel alto mientras que en el nivel bajo se obtiene la menor probabilidad.

Región	Índice	A	b	R ²	Bias ¹	RMSE ²	RMSES ³	RMSEU ⁴	MAD ⁵	MADP ⁶
GALICIA	GEMI	0,75±0,1,3	0,08±0,04	0,59	0,011	0,04	0,02	0,04	0,03	11%
	EVI	0,80±0,16	0,05±0,05	0,56	-0,003	0,05	0,014	0,04	0,03	12%
	SAVI	0,69±0,16	0,10±0,04	0,52	0,01	0,05	0,03	0,04	0,03	13%
	EVI (MOD13)	1,02±0,10	-0,01±0,03	0,83	0,0002	0,04	0,004	0,04	0,03	11%
ASTURIAS	GEMI	0,5±0,3	0,08±0,04	0,19	-0,002	0,05	0,02	0,05	0,04	23%
	EVI	0,79±0,19	0,05±0,03	0,47	0,017	0,05	0,02	0,04	0,04	23%
	SAVI	0,57±0,15	0,06±0,03	0,48	-0,013	0,05	0,03	0,04	0,04	23%
	EVI (MOD13)	0,82±0,13	0,03±0,03	0,62	0,002	0,05	0,012	0,04	0,03	18%

¹ Sesgo: $Bias = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$

² Error cuadrático medio: $RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5}$

³ Error cuadrático medio sistemático: $RMSES = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i' - O_i)^2 \right]^{0,5}$

⁴ Error cuadrático medio no sistemático: $RMSEU = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - P_i')^2 \right]^{0,5}$

⁵ Diferencia absoluta media: $MAD = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$

⁶ Diferencia absoluta media en porcentaje: $MADP = 100MAD / < O_i >$

donde P_i y O_i son los valores estimados y observados, respectivamente, y $P_i' = aO_i + b$

Tabla 3. Análisis estadístico del ajuste entre los valores de porcentaje de casillas con incendio estimados y los datos reservados para validación para tres índices diferentes en Galicia y Asturias

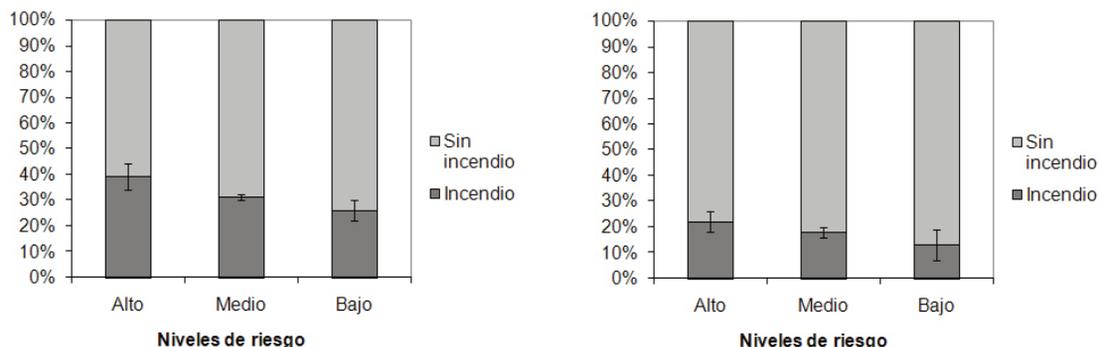


Figura 3. Probabilidad de incendio para cada nivel de riesgo utilizando el índice EVI proporcionado por el producto MOD13 para: a) Galicia; b) Asturias

	EVI (MOD13) Galicia	EVI (MOD13) Asturias
Alto	39±5	22±4
Medio	31,3±1.1	18±2
Bajo	26±4	13±6

Tabla 4. Probabilidad de incendio en cada nivel de riesgo

De acuerdo con esta clasificación se obtienen mapas cada 16 días con el nivel de riesgo de cada casilla. En la figura 4 presentamos un ejemplo de cada región. Se puede observar como la mayoría de incendios ocurren en casillas catalogadas con riesgo alto y medio, mientras que en las casillas de riesgo bajo hay muy pocos incendios.

CONCLUSIONES

En Galicia y Asturias se encuentran tres índices de vegetación cuya variación temporal se ajusta bien a la probabilidad de que se produzca incendio: el EVI, el GEMI y el SAVI. Se compararon ocho índices diferentes, sin embargo solo estos tres presentan una relación clara entre su variación y la frecuencia de incendios. A partir de la validación del modelo obtenido para cada uno de los índices encontramos que el EVI es el que mejores resultados proporciona con

errores relativos en torno al 10% en Galicia e inferiores al 20% en Asturias. A partir de estos índices definimos tres niveles de riesgo de incendio (bajo, medio, alto) que nos permitirán catalogar la mayor o menor probabilidad de que se produzcan incendios en cada una de las cuadrículas en las que se dividen las regiones de Galicia y Asturias para las gestiones de prevención y extinción de incendios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyectos CGL2007-64666/CLI, CGL2008-03668/CLI, y contrato Juan de la Cierva de J. M. Sánchez) y la Generalitat Valenciana (Proyecto PROMETEO/2009/086). También expresamos nuestro agradecimiento a J.M. Galve por la ayuda prestada.

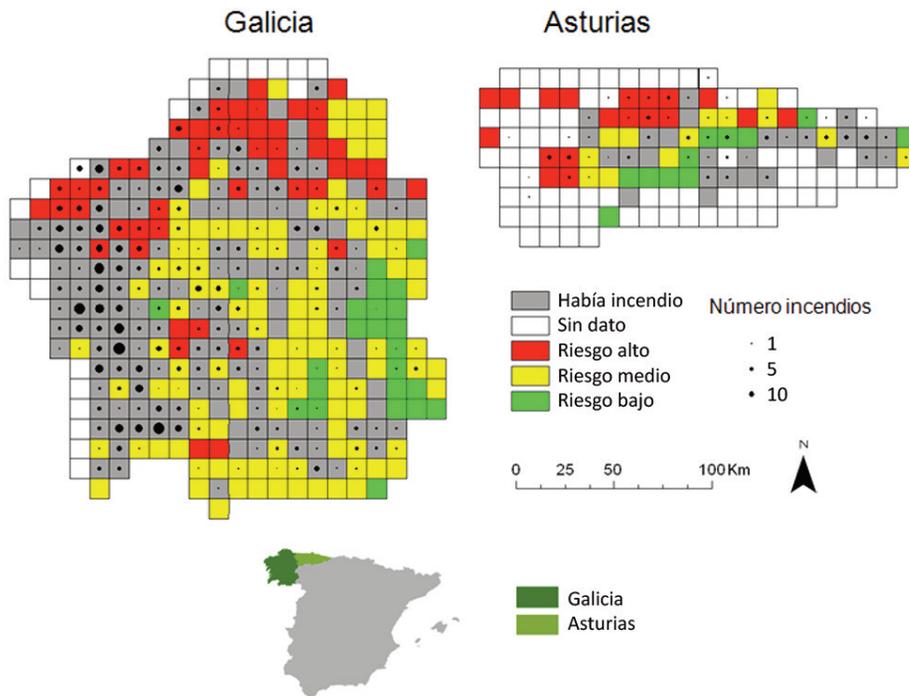


Figura 4. Mapas de riesgo de incendio previstos en Galicia (del 2 al 17 de febrero de 2006) y Asturias (del 7 al 22 de abril de 2001). Los incendios registrados durante esas fechas aparecen indicados con puntos negros, superpuestos en los mapas de riesgo, de tamaño variable en función del número de sucesos

REFERENCIAS

- AGUADO, I., CHUVIECO, E., BORÉN, R. & NIETO, H. 2007. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *International Journal of Wildland Fire*. 16: 390-397.
- ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., HERNÁNDEZ-PEREIRA, E., PAZ ANDRADE, I., JIMÉNEZ, E., LEGIDO, J.L. & CARBALLAS, T. 2003. An intelligent system for forest fire risk prediction and fire fighting management in Galicia. *Expert Systems with Applications*. 25: 545-554.
- CASTRO, F.X., TUDELA, A. & SEBASTIÀ, M.T. 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology*. 116: 49-59.
- CECCATO, P., GOBRON, N., FLASSE, S., PINTY, B. & TARANTOLA, S. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*. 82: 188-197.
- CHENG, Y., ZARCO-TEJADA, P.J., RIAÑO, D., RUEDA, C.A. & USTIN, S. L. 2006. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different Canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*. 105: 354-366.
- CHUVIECO, E., COCERO, D., RIAÑO, D., MARTÍN, P., MARTÍNEZ-VEGA, J., DE LA RIVA, J. & PÉREZ, F. 2004. Combining NDVI and surface temperatura for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*. 92: 322-331.
- DENNISON, P.E., ROBERTS, D.A., PETERSON, S.H., & RECHEL, J. 2005. Use of Normalized Difference Water Index for monitoring live fuel moisture. *International Journal of Remote Sensing*. 26: 1035-1042.
- GAO, B.C. 1996. NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58: 257-266.

- GITELSON, A. A., KAUFMAN, Y. J., STARK, R., & RUNDQUIST, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*. 80: 76-87.
- HUETE A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRÍGUEZ, E. P., GAO, X., & FERREIRA, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83: 195-213.
- HUNT, E.R., & ROCK, B.N. 1989. Detection of changes in leaf water-content using near-infrared and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 30: 43-54.
- LOZANO, F. J., SUÁREZ-SEOANE, S. & DE LUIS, E. 2007. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*. 107: 533-544.
- LOZANO, F.J., SUÁREZ-SEOANE, S., KELLY, M., LUIS, E. (2008). A multi-scale approach for modelling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 112, 708-719.
- MAKI, M., ISHIAHRA, M. & TAMURA, M. 2004. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 90: 441-450.
- MARTÍN, A., DÍAZ-RAVIÑA, M. & CARBALLAS, T., 2009. Evolution of composition and content of soil carbohydrates following forest wildfires. *Biology and fertility of soils*. 45, 5: 511-520.
- MASELLI, F., ROMANELLI, S., BOTTAI, L. & ZIZPOLI, G. 2003. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environment*. 86: 187-197.
- PALACIOS-ORUETA, A., CHUVIECO, E., PARRA, A. & CARMONA-MORENO, C., 2005. Biomasa burning emissions: a review of models using remote-sensing data. *Environmental monitoring and assessment*. 104: 189-209.
- PINTY, B. & VERSTRAETE, M. M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*. 101: 15-20.
- ROUSE, J. W., HASS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351*: 309-317.
- SÁNCHEZ, J. M., CASELLES, V., BISQUERT, M. M., PAZ ANDRADE, M. I. Y LEGIDO, J. L. 2008. Estimación del riesgo de incendio en Galicia a partir de imágenes EVI del Sensor Terra-MODIS. *Revista de Teledetección*. 30: 71-84.
- SEBASTIÁN-LÓPEZ, A., SAN-MIGUEL-AYANZ, J. & BURGAN, R. E., 2002. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. *International Journal of Remote Sensing*. 23: 2713-2719.
- SHNEIDER, P., ROBERTS, D. A. & KYRIAKIDIS, P. C. 2008. A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index. *Remote Sensing of Environment*. 113: 1151-1167.
- STOW, D., NIPHADKAR, M. & KAISER, J. 2005. MODIS-derived visible atmospherically resistant index for monitoring chaparral moisture content. *International Journal of Remote Sensing*. 26: 3867-3873.
- VERBESSELT, J., JÖNSSON, P., LHERMITTE, S., VAN AARDT, J. & COPPEN, P. 2006. Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 44: 1622-1632.
- WILLMOTT, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63: 1309-1313.
- YEBRA, M., CHUVIECO, E. & RIAÑO, D. 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148: 523-536.