

CALIBRATION OF THE FIRE POTENTIAL INDEX IN DIFFERENT SEASONS AND BIOCLIMATIC REGIONS OF SOUTHERN EUROPE

Sebastián-López, A.¹; Burgan, R.E.²; Calle, A.³; Palacios-Orueta, A.⁴

Abstract

In the Mediterranean Europe there is a special need for international strategies on fire prevention which are based, to a great extent, on fire risk assessment. Basing on homogenous and harmonised information on the level of fire risk, it is possible to tailor the funding measures according to each region's needs. The overall objective of this analysis is to determine the efficiency of a pan-european fire risk index, the so called European FPI, when assessing fire potential in different bioclimatic regions of Southern Europe. This index is an adaptation of the one developed by Burgan (Burgan et al. 1998) for the Mediterranean Region of the United States. The European FPI represented one of the first experiences of assessing fire risk at the large scale in Europe that was followed by a validation process. After the first encouraging results (Sebastián-López et al. 2000, 2002a, 2002b), a more exhaustive validation and calibration process was carried out. Specific objectives were to 1) verify whether the index provides higher values in the areas affected by fires than in those not affected; 2) identify the index threshold value that, in different seasonal and bioclimatic contexts, indicate "high risk", and 3) study whether increments in the index value correspond to increments in the average size of fires. The analysis made it possible to assess the index sensibility to different levels of risk and proved that results, as expected, depended on the bioclimatic region and on the season. Results, FPI shows high sensitivity to fire risk during the spring season, although this capacity is uneven during summer, when best results are attained in the mildest regions (Temperate and Supra-Mediterranean Europe). Results also showed that the risk index (ranging 0-100) points to "high fire risk" starting on values around 40, and evidenced a high correlation between the index value and the fire size according to which, the European FPI could be a good indicator of large fires. It can be concluded that the European FPI has proven to be useful because it reacts adequately to increments in the risk level when this is represented on the ground by the number and the size of fires.

Keywords: Fire risk, bioclimatic regions, validation, calibration

1 Área de Defensa contra Incendios Forestales, D. Gral. Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente

2 Intermountain Fire Sciences Laboratory, U.S. Forest Service, retired

3 Laboratorio de Teledetección. Universidad de Valladolid (LATUV)

4 Escuela Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid

1 Introducción

La validación un índice de riesgo de incendio forestal es una tarea compleja, pues sólo puede realizarse a través de la comparación de sus valores con las cifras de incendios de un territorio, única verdad-terreno disponible. Esta comparación es delicada ya que, como es sabido, los incendios son en un gran porcentaje provocados o debidos a negligencias, de modo que – por diversos motivos ajenos al riesgo – los incendios no ocurren siempre allí donde éste es más alto, y viceversa: valores altos de un índice de riesgo no implican necesariamente la ocurrencia de incendios y sí, en todo caso, un aumento de vigilancia y de las medidas de prevención y disuasión, que teóricamente contribuyen a reducir el riesgo. Por todo ello, al estudiar el funcionamiento de cualquier índice no hay más remedio que asumir, hasta cierto punto, la mediación de factores ajenos a la metodología que no pueden ser considerados por razones obvias. Sin embargo, aún asumiendo la existencia de estos factores, para que el índice pruebe su utilidad, la relación entre sus valores y los incendios debe existir en mayor o menor grado. Así, un índice será tanto más útil cuanto mejor refleje la pauta de los incendios en un territorio, y en particular, cuantos menos errores de omisión cometa.

En este artículo se presenta parte del trabajo de validación de un índice de riesgo de incendio paneuropeo. En concreto, se trata de una adaptación del *Fire Potential Index* (FPI) desarrollado por Burgan et al. (1998). La idoneidad del modelo que lo sustenta, el hecho de que hubiera sido testado previamente con buenos resultados, la existencia de suficiente documentación para su cálculo y su aptitud para evaluar el riesgo a gran escala, hicieron que consideráramos que el FPI ofrecía un método apto para el cálculo del riesgo de incendio en Europa. Esto motivó su elección y el consiguiente trabajo de adaptación del índice a las circunstancias europeas (Sebastián et al. 2002). Conscientes de la problemática anteriormente expuesta, parecía que para el caso de un índice de riesgo diseñado para funcionar a gran escala como el que se nos ocupa, lo más razonable era exigirle que fuera capaz de detectar aquellas situaciones de más alto riesgo, las cuales normalmente conducen a incendios particularmente grandes, o bien, a una frecuencia particularmente alta de incendios. Es importante dejar claro que en ningún caso se pretendió comprobar si el índice era capaz de predecir el número de incendios.

El modelo de riesgo

El modelo de riesgo calculado se basa en el *Fire Potential Index* (FPI) creado por Burgan et al. (1998). Este modelo evalúa el riesgo de incendio mediante la combinación de diversos tipos de variables estáticas y dinámicas obtenidas de diversas fuentes como estaciones meteorológicas, imágenes de satélite, bases de datos de usos del suelo y una clasificación de vegetación; proporcionando con ello una visión global del fenómeno que se pretende modelizar. El interés de este trabajo se debe tanto a su ámbito de aplicación, como a la completitud del modelo a la hora de evaluar el riesgo de incendio forestal sobre el territorio. En efecto, no es común la construcción y validación índices de riesgo a escala pan-Europea, y además, pocos modelos integran, como ocurre en el FPI, fuentes de datos – meteorológicos y de satélite – para contemplar ambos tipos de combustible: el vivo y el muerto); de modo que un aspecto interesante del modelo reside en que proporciona una perspectiva muy completa del riesgo en lo que a la contribución del factor vegetación se refiere.

Brevemente, en el FPI hay dos aspectos clave a determinar: i) la humedad del combustible fino muerto, y ii) la cantidad de carga viva de combustible presente en el territorio. Precisamente otro aspecto interesante del FPI es que, a diferencia de lo que ocurre en muchos otros modelos de riesgo, no considera la carga de combustible constante en el tiempo, sino que la hace variar en función del verdor de la vegetación, cuyo seguimiento se realiza mediante teledetección. En concreto, el modelo recurre al *Relative Greenness* (Burgan y Hartford 1993) para ajustar las cargas de combustible disminuyendo el porcentaje de carga viva (e incrementando el de carga muerta) en una proporción que depende de la vegetación agostada ese verano. Para ello, el FPI supone probado que los índices de vegetación construidos en el espectro Visible e IR cercano (como el NDVI) son estimadores adecuados de la cantidad de biomasa verde.

La traslación a Europa del modelo creado por Burgan requirió adecuar varios aspectos relativos a las variables de entrada y al modelo en si. En ocasiones las modificaciones respondieron al intento de mejorar el modelo original, pero en otros casos se debieron a las limitaciones impuestas por la disponibilidad y características de los datos a escala Europea. Por ejemplo, cabe señalar, que en el FPI Europeo mejoró la interpolación de los datos meteorológicos del modelo original (empleados para el cálculo de la humedad del combustible fino muerto) al incluir en ella variables fisiográficas como la altitud, la distancia a la costa y la existencia de barreras climáticas (orográficas). Por otro lado, como ejemplo de las limitaciones encontradas, se puede mencionar el caso de la cartografía de combustibles, que constituye la componente estática o estructural del índice. En efecto, debido a la dificultad de encontrar una cartografía de modelos de combustibles homogénea y coherente para todo el ámbito de estudio, y a la imposibilidad de plantear una campaña de campo, se optó por recurrir a cruzar unidades de vegetación ya cartografiadas y a asignar al resultado un tipo de combustible determinado procedente de la clasificación estándar del NFDRS americano (Deeming & Brown 1975). La metodología empleada aquí presenta similitudes con algunas experiencias de cartografía de vegetación/ cobertura del suelo realizadas a partir de teledetección y sin datos de campo (Shasby y Burgan 1981, Loveland et al. 1991), o bien con las primeras fases de otras experiencias en las que la verdad-terreno se utilizó al final del proceso de etiquetado de las clases, como por ejemplo el mapa de combustible del NFDR (Burgan et al. 1998). Por otro lado, la imposibilidad de validar en campo el mapa de tipos de combustible creado para Europa en gabinete, motivó la búsqueda de un método alternativo al original para la estimación de la máxima proporción de combustible vivo de una forma objetiva. Este método se basó en una normalización del NDVI (Sebastián López et al. 2002).

De acuerdo con la fórmula proporcionada por Burgan et al. (1998) para el *Fire Potential Index*, el riesgo de incendio es inversamente proporcional a la Humedad del combustible fino muerto y al Máximo porcentaje de Carga Viva:

$$FPI = 100 * (1 - Hcm10hr_{Frac}) \times (1 - Cv_{cor})$$

Donde $Hcm10hr_{Frac}$ es la humedad del combustible fino muerto normalizada con respecto a la humedad de extinción, Cv_{cor} es la proporción de Combustible vivo.. Todos estos factores varían diariamente, excepto en el caso de Cv_{cor} , que se actualiza cada diez días. En resumen y de forma simplificada, el FPI tiende a 0 cuando el porcentaje de humedad del combustible fino muerto y/o la carga del combustible vivo tiende a 1; de modo que su valor oscila entre 0 y 100. No obstante, es importante señalar que su cálculo puede dar lugar a otros valores no válidos por quedar fuera de este rango. Por ejemplo, la no

existencia de combustibles forestales, la ausencia de valor de NDVI, e incluso un dato inconsistente de alguna de las variables meteorológicas, hacen que en algún punto del proceso del cálculo del índice, una celda tome valor "sin-datos" y sea excluida del análisis. La Figura 1 muestra ejemplos de FPI para un día de marzo y otro de agosto.

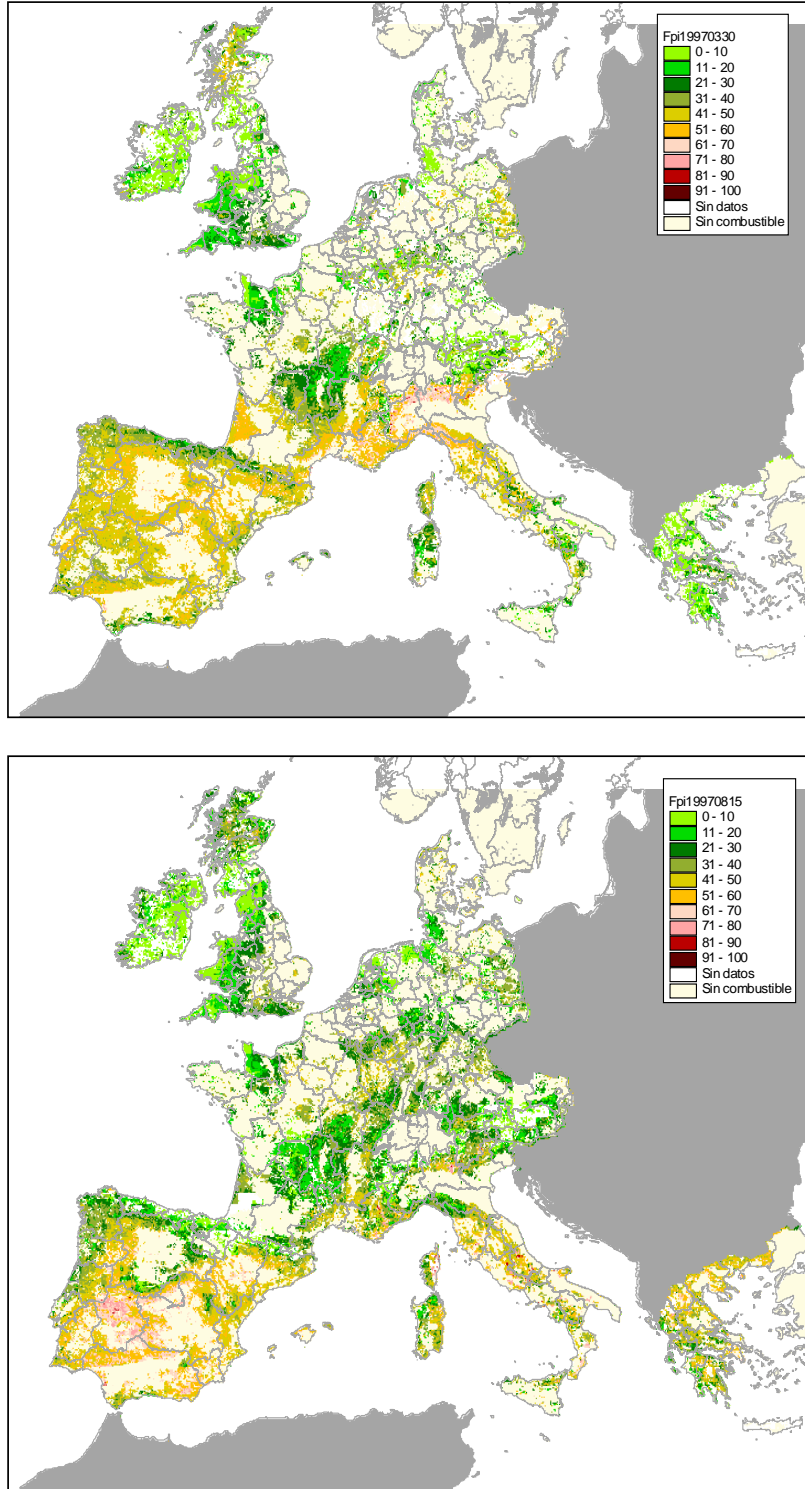


Figura 1. Ejemplos del FPI europeo para un día de marzo (arriba) y otro de agosto (abajo)

Objetivos

Una vez que se obtuvo una versión satisfactoria de índice, los siguientes pasos se encaminaron a analizar el acuerdo entre los valores del índice de riesgo y la ocurrencia de incendios en las zonas empleadas para la validación. El objetivo era evaluar la validez del FPI europeo como indicador del riesgo de incendio en distintos contextos bioclimáticos y estacionales del sur de Europa. Más específicamente, el propósito del trabajo era medir la capacidad del FPI para separar los escenarios de riesgo de los que no lo son, así como para establecer niveles de riesgo en función del grado en que cada escenario favorece la ocurrencia de incendios, y en especial, la de grandes incendios. Igualmente interesante se consideró la localización del valor del FPI que marca el inicio de la zona crítica de riesgo.

2 Material

La extensión de territorio sobre la que se ha testado el FPI se circunscribe a tres países de la Europa mediterránea: España, Francia e Italia. La unidad de observación espacial mínima adoptada para el estudio es el municipio, unidad administrativa menor a la que se referencian los datos de incendios disponibles. Esta resolución, claramente insuficiente para una aproximación local-provincial, es apta para un enfoque a escala paneuropeo. Los datos de incendios, procedentes de la base de datos propiedad de la Comisión Europea (EC, *DG. Joint Research Centre*), fueron procesados e integrados en una base de datos espacial relacional. Los análisis se realizaron sobre los municipios afectados por el fuego durante el periodo de estudio. Esta restricción, que deja fuera a los municipios que no presentan incendios en el periodo de estudio, está encaminada a reducir, en lo posible, el ruido en el análisis. Por diversos motivos técnicos y otros ligados a la disponibilidad de datos, el estudio del comportamiento del FPI se llevó a cabo con tres años de datos diarios del índice - desde 1995 a 1997- repartidos en dos estaciones: primavera y verano (mes de septiembre incluido). El funcionamiento del índice se evaluó en cuatro zonas bioclimáticamente diferentes: por un lado en la región Eurosiberiana, y por otro, en los pisos mediterráneos no correspondientes a zonas de montaña, es decir, en los pisos Supra-, Meso- y Termomediterráneo (Figura 2). Asimismo se entendió que la división en función del termoclima era suficiente para estudiar el riesgo a la escala y resolución empleadas en este trabajo, por lo que no se utilizaron las subunidades bioclimáticas derivadas de considerar el ombroclima. La Figura 3 muestra la evolución estacional de los valores de FPI en las cuatro zonas bioclimáticas consideradas representando la evolución del FPI máximo diario absoluto. Hay que señalar que estos gráficos, además de confirmar la conjetura de que el FPI se comporta de forma diferente en las distintas regiones y pisos bioclimáticos, denotan que el comportamiento del FPI mantiene una apreciable similitud con el patrón de ocurrencia de incendios de cada región.

3 Métodos

La metodología empleada consta de varios análisis en los que el riesgo de incendio medido por el FPI se contrasta con una magnitud cuantificable sobre el terreno y derivada de los datos históricos de incendios. Variando esta magnitud se pretendió conocer la relación entre el FPI y diferentes aspectos del riesgo. La finalidad era, por una parte, evaluar el comportamiento del FPI (validación) y por otra, estudiar la sensibilidad del índice e identificar en diferentes zonas bioclimáticas los valores umbrales del índice que indican un evidente aumento del riesgo (calibración).

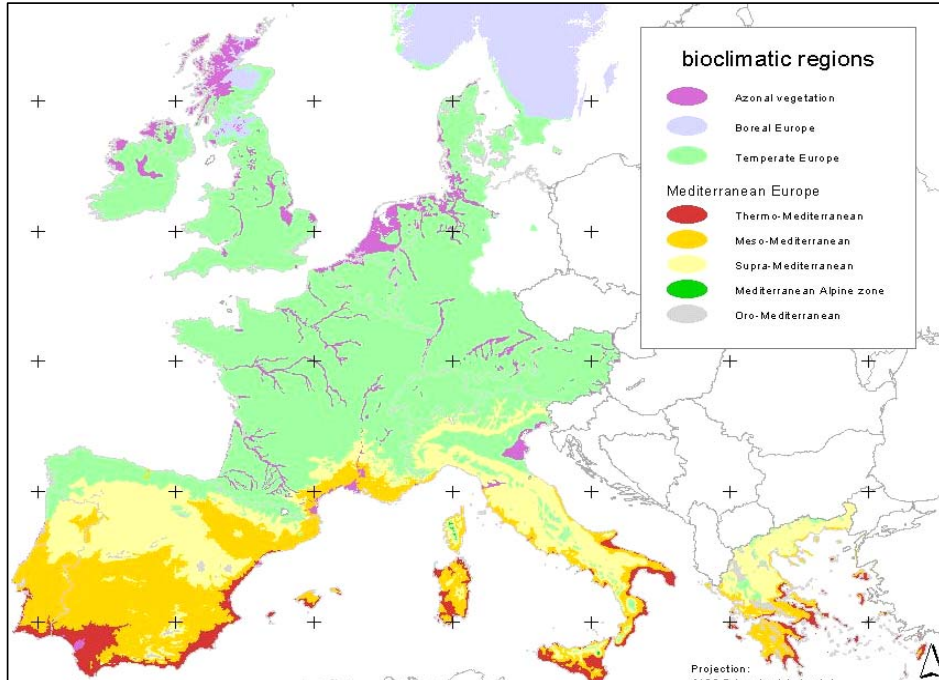


Figura 2. Regiones bioclimáticas de la zona de estudio. Map of Natural Vegetation of Europe (Eurostat 1999)

La diferente naturaleza de los datos –datos de FPI en formato GRID (matrices de celdas homogéneas) y estadísticas de incendios en tablas - exigió un procesado previo de los mismos de cara a posibilitar su comparación. Un condicionante importante de los análisis que se pretendían abordar era el hecho de que los datos de incendios se hallaban referenciados a escala municipal y no por celdas, como el FPI. Para subsanar esta limitación se decidió comparar los datos de incendios con un valor de FPI que actuara como representante de las condiciones de riesgo en cada municipio. La solución escogida consistió en calcular, para cada municipio y día del periodo considerado, un estadístico resumen del FPI, concretamente, el máximo valor de FPI alcanzado. Es importante decir que este dato se calculó, para cada municipio, todos los días del periodo de estudio, hubiera habido o no incendio/s en él. Por limitaciones de espacio no se muestran todos los análisis realizados, escogiéndose para su publicación en este medio uno de los más interesantes, ya que el resto o son menos relevantes o han sido publicados con anterioridad (Sebastián-López et al. 2000, 2002a, 2002b). Esta parte del trabajo consistió en estudiar la relación entre los valores del FPI y la ocurrencia de incendios en relación a una época y entorno geográfico determinados. Concretamente, puesto que un valor determinado de FPI puede indicar riesgo de incendio extremo alto o bajo, dependiendo de la región y de la estación del año, se analizó la relación con los incendios, no de los valores absolutos del FPI, sino de unos valores referidos a un entorno espacio-temporal particular. Este análisis pretendía la consecución de los siguientes objetivos parciales:

- a. **Medición de la eficiencia del FPI normalizado** en la identificación escenarios de riesgo alto en las distintas regiones bioclimáticas. Este estudio consistió en cuantificar en cada región y estación del año hasta qué punto los incendios de coinciden con niveles de riesgo alejados (y por encima) de las condiciones medias de riesgo del día en que se producen.
- b. **Estudio de la posible relación entre los valores altos del FPI y los incendios de un determinado tamaño.** Se pretendía estudiar si un aumento

del valor de FPI se corresponde con un aumento en el tamaño medio de los incendios.

- c. **Identificación del umbral de sensibilidad del FPI.** Fase que consistió en identificar aquel valor umbral de FPI que en cada región marca el inicio del riesgo de incendio alto y extremo.

La metodología empleada usó como valor tipificado o normalizado del índice la distancia entre el valor del FPI en un *municipio-día con incendio/s* y la media que el índice alcanza ese mismo día en la región, utilizada aquí como representante de las condiciones medias de riesgo del día. El cálculo de esta distancia en todos los *municipios-día con incendios* de la muestra permite cuantificar hasta qué punto el FPI toma valores más altos en los municipios afectados que en los no afectados, y determinar así la sensibilidad del índice para distinguir los escenarios de riesgo de los que no lo son. Para facilitar la interpretación de esta Distancia (D) se expresó en términos de la desviación típica (s) de la distribución que sirve para su cálculo. De este modo, el valor del FPI en un *municipio-día con incendio/s* está separado de la media de valores de FPI de la región una distancia igual a la media de la distribución de valores de FPI (μ) más/menos k veces la desviación típica de dicha distribución:

$$D_i = \mu \pm k \cdot s$$

Donde k es un número real perteneciente a mas/menos infinito, al que se llamó **factor de alejamiento**. Este factor de alejamiento k , que no es otra cosa que un valor de FPI normalizado, sirvió para evaluar la sensibilidad del FPI a las situaciones de riesgo. La base de este análisis consistió en suponer que los valores de k positivos indican riesgo de incendio *alto*, y a partir de ahí estudiar qué porcentaje de los incendios de la muestra efectivamente ocurren bajo condiciones de alto riesgo, y en cuánto se diferencia el FPI en ellos del FPI medio de la región (μ) el día del incendio.

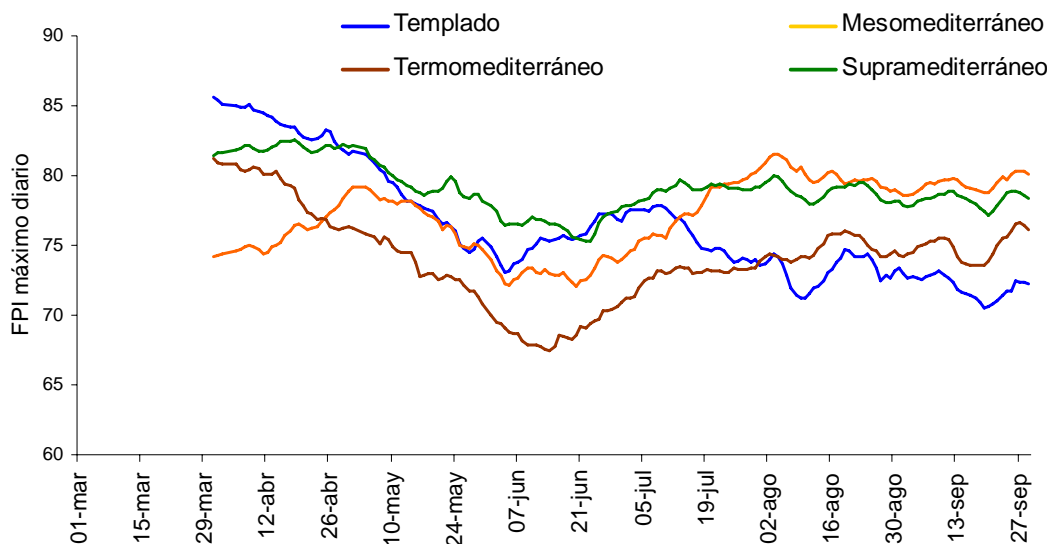


Figura 3. Evolución temporal de los valores del FPI-Europeo en la zona de estudio durante 1997

4 Resultados

A continuación se presentan los resultados siguiendo el orden expuesto en los objetivos arriba descritos:

a) *Medición de la eficiencia del FPI normalizado en la identificación escenarios de riesgo alto en las distintas regiones bioclimáticas:*

El cálculo del factor k para cada uno de los incendios de la muestra permitió conocer el porcentaje de incendios que coincidieron con valores de FPI por encima del FPI medio de la región. Los siguientes resultados indican que el número de observaciones de la muestra en las que el factor k resulta positivo es en general alto, si bien depende de la región, país, estación del año y tamaño del incendio. En particular, las cifras de la Tabla 1 sugieren un comportamiento muy satisfactorio del FPI en la región Templada y en el piso Supramediterráneo, donde el alto porcentaje de observaciones con valor de k positivo demuestra que el FPI en estas zonas no presenta dificultades para identificar las situaciones de riesgo. Efectivamente, para incendios de al menos 100 ha, la Tabla 1 muestra que en la región **Templada** el factor de alejamiento k es positivo, como media, en un 84 por ciento de los incendios, y en el piso **Supramediterráneo**, en un 78 por ciento. Para el caso de incendios de al menos 500 ha, la media de estos porcentajes aumenta de modo que en la región **Templada** alcanza el 94 por ciento, y en el **Supramediterráneo** en un 83 por ciento. Ante estos buenos resultados, se procedió a calcular el factor k considerando todos los incendios iguales o mayores de 10 ha, lo que arrojó unos porcentajes de observaciones con k positivos igualmente altos. Concretamente, considerando todos los incendios de al menos 10 ha de la región **Templada** el factor de alejamiento es positivo, como media, en un 78 por ciento de las observaciones, y en la **Supramediterránea** en un 73 por ciento. En el caso de los pisos mediterráneos más cálidos - **Meso- y Termomediterráneo** – la Tabla 1 indica que el porcentaje de observaciones con k positivo es visiblemente menor, excepto quizás en 1995, año en que el porcentaje de valores de k positivos supera el 53 por ciento.

Tabla 1: *Porcentaje de incendios en los que la distancia k es positiva*

	Porcentaje observaciones con incendio/s en los que $k > 0$			
	Fuegos ≥ 10 ha	Fuegos ≥ 100 ha	Fuegos ≥ 500 ha	Fuegos ≥ 1000 ha
1995				
Templado	80	83	89	95
Supramediterráneo	78	88	90	87
Mesomediterráneo	65	68	67	65
Termomediterráneo	63	58	54	53
1996				
Templado	82	84	100	-
Supramediterráneo	72	79	88	88
Mesomediterráneo	47	50	51	62
Termomediterráneo	43	38	35	56
1997				
Templado	72	84	94	95
Supramediterráneo	68	67	71	68
Mesomediterráneo	48	48	49	50
Termomediterráneo	44	43	41	44

Los resultados muestran (Tabla 1) que el porcentaje de observaciones con k positivo tiende a ser tanto más alto cuanto mayores son los incendios, de donde se deriva que los grandes incendios tienden a producirse en circunstancias más alejadas de las condiciones de riesgo medias que los incendios pequeños. Esto es un resultado relevante que apunta a una relación entre el FPI y el tamaño de los fuegos y sugiere la utilidad del índice como indicador de riesgo de grandes incendios. La Tabla 2 muestra la proporción de incendios de primavera y verano registrados en cada región y el porcentaje de ellos en los que el valor de k que resultó positivo en cada caso. Como se puede apreciar, la media estacional de observaciones en las que k es positivo resulta muy satisfactoria, siendo de un 77 por ciento en **primavera**, y de un 82 por ciento en **verano**. En particular, se observa que un alto porcentaje de las observaciones de primavera presenta valor k positivo, incluso en los

pisos más cálidos - Meso- y Termomediterráneo; hecho que pone de manifiesto que el bajo porcentaje de observaciones con k positivo obtenido en los pisos Meso- y Termomediterráneo (Tabla 1) se debe fundamentalmente a los incendios de verano, y más concretamente, a los incendios de verano en Italia. La Tabla 2 indica que los resultados de **primavera** en las regiones frescas (Templado y Supramediterráneo) son particularmente buenos en los tres países, debido no sólo a que en estas regiones, no sólo el porcentaje de observaciones con k positivo es de por sí alto, sino además, a que son regiones que presentan un elevado número de incendios. Según esta Tabla, los resultados de **primavera** en el Meso- y Termomediterráneo también resultan satisfactorios, si bien en este último piso los incendios de primavera son bastantes menos en número, llegando a ser incluso insuficientes para extraer conclusión alguna (caso del Termomediterráneo italiano). En cuanto al **periodo estival**, la Tabla 2 muestra resultados muy favorables en las regiones más frescas, pues el valor de k es positivo en al menos el 91% de las observaciones de España, en al menos el 71% de las observaciones en Francia, y el 69% de las observaciones en Italia. Por otro lado esta Tabla indica que en los pisos más cálidos - el **Meso- y Termomediterráneo** - el porcentaje de observaciones con k positivo en verano sigue siendo muy satisfactorio en España y Francia (por encima del 85 y 63%, respectivamente), pero no en Italia, donde no rebasa el 50%. Resalta particularmente la diferencia entre los muy buenos resultados obtenidos en el Termomediterráneo en España (85%), y los deficientes resultados obtenidos en verano en la correspondiente región Italiana (36%).

Tabla 2: Número de incendios ≥ 100 ha en los que el factor k es positivo

PRIMAVERA:	Templado			Supramed.			Mesomed.			Termomed.		
	ES	FR	IT	ES	FR	IT	ES	FR	IT	E	FR	IT
Nº incendios primavera en los que $k > 0$	685	102	156	208	32	225	27	8	46	25		2
% Inc. primavera / $k > 0$	80	69	86	93	69	77	81	75	59	80		100
VERANO:	Templado			Supramed.			Mesomed.			Termomed.		
	ES	FR	IT	ES	FR	IT	ES	FR	IT	ES	FR	IT
Nº incendios verano en los que $k > 0$	358	28	73	227	14	536	120	27	625	39		226
% Inc. verano / $k > 0$	93	86	88	91	71	69	89	63	46	85		36

A la vista de los resultados, se puede afirmar el FPI presenta una muy alta sensibilidad al riesgo de incendio durante la primavera, y una sensibilidad variable en verano, razón por la que, en adelante, los análisis se centraron en esta estación.

c) Estudio de la posible relación existente entre los valores altos del FPI y los incendios de un determinado tamaño.

El objetivo de esta fase era comprobar si, como se esperaba y sugerían los resultados anteriores, las observaciones con valores de k negativos correspondían efectivamente a los incendios de menor tamaño. Los resultados permitieron concluir que en los pisos Mediterráneos de España y Francia no existe un número significativo de incendios mayores de 500 ha con k negativo. La excepción a este comportamiento volvió a ser el Termomediterráneo Italiano, donde los incendios con k negativo podían asociarse a cualquier tamaño de incendio. La Figura 4 resume estos resultados representando el valor medio de k correspondiente a las observaciones previamente clasificadas en cuatro grupos (por tamaño medio de incendios). Hay que aclarar que, por tratarse de medias, en esta Figura todos los valores de k son positivos. La Figura revela que tanto los valores de k , como la pendiente de la línea imaginaria que los une, son significativamente mayores en las dos regiones más frescas que en las cálidas. Entendiendo que el aumento del riesgo se

traduce sobre el terreno en incendios más grandes. Este resultado implica, no sólo que el FPI es más sensible en el Templado y Supramediterráneo que en las regiones cálidas, sino que además, en las regiones frescas el FPI es más capaz de distinguir entre los niveles de riesgo que conducen a incendios de menor o mayor tamaño. En cualquier caso la Figura 4 ofrece buenos resultados en las cuatro regiones y consolida deducciones anteriores que sugerían que los valores menores k están asociados a los incendios más pequeños de la muestra.

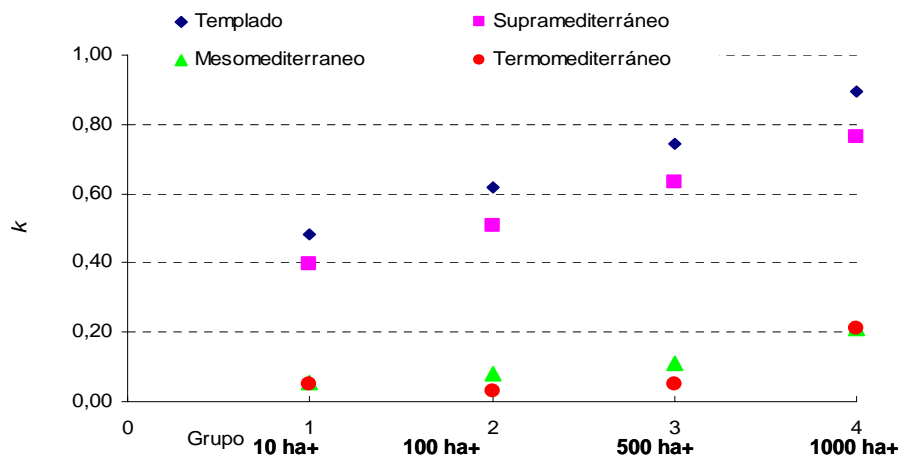


Figura 4. Relación entre el valor medio de k (FPI normalizado) y el tamaño de los incendios

c) Determinación del umbral de sensibilidad del FPI

Esta última fase pretende calibrar el índice mediante la identificación del valor umbral por encima del cual la mayoría de los incendios ocurren bajo condiciones de riesgo superiores a la media de riesgo en la región (esto es, coinciden con un valor de k positivo). Esta tarea se llevó a cabo mediante el examen del signo de los valores de k correspondientes a cada una de las categorías de FPI. En particular, por entender que es un percentil significativo se tomó la decisión de situar el umbral de sensibilidad del FPI en aquel valor del índice a partir del cual al menos el 75 % de las observaciones (municipio-día con incendio/s) presentan valor de k positivo. Las Tablas 3 y 4 muestran, para cada una de las zonas bioclimáticas del estudio, los umbrales de sensibilidad del FPI durante la estación de verano. En ella se indica el valor del índice a partir del cual al menos el 75% de las observaciones tienen valor de k positivo ($U_{75\%}$), y el valor a partir del cual el 100% de los incendios tienen valor de k positivo ($U_{100\%}$). Por ejemplo, en España en el **Templado** un 75 por ciento de los incendios de verano coincidentes con un FPI igual a 34 o superior alcanzaron un valor de k positivo, lo que asegura que para cualquier valor de FPI igual o superior a 34 existe al menos un mínimo de un 75 por ciento de observaciones que ocurrieron bajo condiciones de riesgo superiores a la media del día y por tanto que, a partir de ese valor, el índice es lo suficientemente sensible para identificar las situaciones de riesgo. Análogamente, el 100% de los incendios de verano en este país coincidentes con valores de FPI iguales o superiores a 43 ocurrieron en condiciones de riesgo por encima de las condiciones medias del día en la región, lo que indica que en ese valor (43), el nivel de riesgo alcanzado es extremo.

Un hecho que se deduce de los resultados es que los valores críticos $U_{75\%}$ y $U_{100\%}$ de FPI son tanto más altos cuanto más cálida es la región. La lógica de esto reside en que cuanto mayor es la temperatura, mayor es el valor medio del riesgo en un territorio y por tanto, mayor habrá de ser el valor de FPI umbral que indique una situación de riesgo excepcional. En cualquier caso, asumiendo que por debajo de estos umbrales el FPI no

responde al riesgo por no ser lo suficientemente sensible, la identificación de los mismos ofrece la oportunidad de calibrar el índice en cada región bioclimática situando el nivel crítico del riesgo *alto* en el valor correspondiente a $U_{75\%}$, y el nivel crítico del riesgo *extremo* en el FPI correspondiente $U_{100\%}$. Los resultados obtenidos confirman que en las regiones mediterráneas la mayoría de los incendios de verano con k negativo pertenecen al **Termomediterráneo italiano**, lo que confirma que en este contexto territorial y climático, el FPI no es lo suficientemente sensible como para señalar con un valor significativamente diferente los escenarios de riesgo.

Tabla 3: Valores medios por región de los umbrales de sensibilidad del FPI-Máx.

	Umbral de Riesgo alto	Umbral de Riesgo extremo
Templado	FPI = 33	FPI = 41
Supramediterráneo	FPI = 40	FPI = 46
Mesomediterráneo	FPI = 50	FPI = 57
Termomediterráneo	FPI = 47	FPI = 49

Tabla 4: umbrales de sensibilidad del FPI-Máx. en verano

		$U_{75\%}$	$U_{100\%}$
ES	Templado	34	43
	Supra-	44	52
	Meso-	51	52
	Termo-	49	50
FR	Templado	33	38
	Supra-	35	36
	Meso-	51	54
	Termo-	-	-
IT	Templado	33	43
	Supra-	41	49
	Meso-	48	64
	Termo-	45	47

5 Discusión

Distintos análisis previos (no mostrados) habían permitieron comprobar hechos que confirmaban la validez del FPI Europeo. Por ejemplo, se pudo observar como el valor del FPI tiende, en general, a aumentar en los días previos a un incendio (Sebastián et al 2002a), la existencia de una relación positiva entre el número total de incendios y las condiciones medias del FPI en cada región, pudiéndose apreciar que el *Número de incendios (normalizado)* crece - concretamente de forma exponencial (o potencial) - con el valor del índice. En un análisis posterior, realizado a escala municipal se pudo comprobar también que, como se esperaba, la *Probabilidad de incendio* asociada a cada categoría de FPI los valores de esta variable aumentan a medida que lo hace el valor del índice (Sebastián et al 2002b). Puesto que no se trataba de establecer una relación causa-efecto entre las dos variables –valores de FPI y frecuencia de incendios – sino de estudiar si su evolución presenta tendencias similares, los resultados se consideraron muy satisfactorios. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, se planteaba la duda de si en una situación de riesgo el FPI sería capaz de proporcionar un valor, que independientemente de que fuera alto o bajo en términos absolutos, resultara superior a la media del FPI registrada ese día en la región. Por este motivo, se procedió a estudiar la capacidad del índice para señalar los escenarios de riesgo en un contexto bioclimático y

estacional determinado. La metodología empleada tipifica o normaliza los valores de FPI refiriéndolos a su entorno lo cual, frente a la alternativa de testar el comportamiento del FPI usando valores absolutos, presenta la ventaja de eliminar la influencia de la estación y de la región bioclimática. Los resultados de este análisis permiten deducir que, en general, el FPI es lo suficientemente sensible como para señalar los escenarios de riesgo de incendio dentro de las zonas bioclimáticas estudiadas. Esta sensibilidad se manifiesta, en particular, a partir de un determinado valor umbral que ha sido identificado en el análisis, resultando ser diferente en cada contexto bioclimático. En función de este nivel umbral se ha determinado el valor crítico de FPI que indica riesgo *alto* y riesgo *extremo* en las diferentes regiones, observando que estos valores críticos del índice son tanto más altos cuanto más cálida es la región. Se ha verificado que el grado en el que el FPI permite la identificación de los escenarios de riesgo depende de la región, país y estación del año. En cualquiera de las regiones y países estudiados el FPI presenta una muy alta sensibilidad en **primavera** y en particular en primavera en la región Templada; lo cual es un resultado muy interesante, dado el gran número de incendios de primavera en esta región. Por el contrario, los resultados obtenidos con los incendios de **verano** son dispares, siendo muy satisfactorios en las regiones Templada y Supramediterránea, y variables en los pisos Meso- y Termomediterráneo. En el Termomediterráneo el FPI demuestra ser sensible al riesgo de incendio en España y Francia, pero no en Italia.

Sabiendo que negligencias y otros factores no contemplados por el FPI motivan la mayoría de los incendios, con estos análisis no se busca establecer una correlación perfecta entre el FPI y la frecuencia de fuegos; sin embargo, parece lógico afirmar que la relación entre el FPI y el riesgo de incendio queda reforzada si se logra comprobar que aquellos fuegos ocurridos en condiciones de riesgo inferiores a la media, son también los de menor tamaño. Este trabajo ha permitido observar la existencia de una clara relación entre el FPI y el tamaño de los incendios, la cual se manifiesta básicamente en que los incendios más grandes ocurren bajo condiciones de riesgo más alejadas de las condiciones medias del día en la región que los incendios pequeños.

Para terminar quedar decir que se ha constatado la existencia de un efecto de saturación del índice que influye particularmente sobre los resultados de las regiones más cálidas. Se da la circunstancia de que este problema no impide al FPI funcionar correctamente en los pisos Meso- y Termomediterráneo de España, y por ello extraña el mal comportamiento del FPI en las mismas regiones de Italia, y en particular en la Termomediterránea. Por ello, es necesario aclarar que esta región, por varios aspectos, puede ser considerada un caso particular. En primer lugar, en verano, el Termomediterráneo italiano presenta, al igual que el Termomediterráneo español, una situación generalizada de alto riesgo (altas temperaturas y estrés hídrico) que hace complicada la validación del índice mediante la ocurrencia de incendios. Sin embargo, a diferencia del Termomediterráneo español, el italiano se sitúa a lo largo de una franja muy estrecha de costa (Figura 1). Este hecho por un lado entraña la existencia de cierta distorsión en el cálculo de los valores de NDVI y por otro lado, implica que este piso se vea más afectado por la baja resolución de las variables climáticas que si se tratara de una superficie de mayor extensión.

6 Conclusiones

Todo el trabajo de validación realizado con el FPI-Europeo, una parte del cual se ha expuesto aquí, ha permitido comprobar que:

- 1- El FPI es capaz de identificar y separar estadísticamente, de forma satisfactoria, los escenarios de riesgo (uno o más fuegos por municipio y día) de los que no lo son por no presentar ningún incendio.
- 2- El FPI no es capaz de diferenciar de forma precisa entre escenarios de riesgo de mayor o menor severidad en función del número de incendios que en ellos se producen (1,2 3, 4 fuegos o más, por municipio y día).
- 3- El FPI sí es capaz de diferenciar entre escenarios de riesgo de mayor o menor severidad en función del tamaño de los incendios que en ellos se producen.
- 4- A escala municipal la relación entre la Probabilidad de incendio y los valores de FPI se ajusta satisfactoriamente a una curva exponencial, alcanzándose en todos los casos estudiados correlaciones medias superiores al 70%.
- 5- A escala municipal el FPI muestra una relación satisfactoria con la Densidad (espacial) de incendios.

De los puntos 4 y 5 se desprende que los valores de FPI presentan una adecuada correspondencia con la distribución espacio-temporal de los incendios en la zona de estudio.

- 6- La forma en que los valores de FPI evolucionan a lo largo de un ciclo fenológico varía con la región bioclimática estudiada. La relación entre dichos valores y la ocurrencia y tamaño de los incendios, presenta también diferencias en función del contexto bioclimático y estacional que se analice.
- 7- Así, en cualquiera de las regiones estudiadas el FPI muestra una alta sensibilidad en primavera, estación en la que el índice no presenta ninguna dificultad para identificar los escenarios de riesgo. Por el contrario, el comportamiento del FPI en verano muestra importantes variaciones, siendo siempre satisfactorio en la región Templada y en el piso Supramediterráneo (regiones más frescas), y variable en los pisos Meso- y Termomediterráneo (los más cálidos).
- 8- Mientras que en los pisos Meso- y Termomediterráneo de España, el FPI muestra un comportamiento satisfactorio, se ha constatado que durante el verano (no hay datos para afirmar nada sobre la primavera) el FPI en el Meso- y Termomediterráneo italiano no es capaz de identificar adecuadamente los escenarios de riesgo. Es muy probable que la escasa resolución espacial de algunas de las variables que participan en el cálculo del índice impida que éste sea capaz de captar la variabilidad existente en la estrecha franja de terreno costero que estos pisos bioclimáticos representan.
- 9- La sensibilidad del FPI se manifiesta a partir de un valor umbral que corresponde a valores cercanos a 40 (depende de la región). Este valor puede considerarse como el umbral de una situación de riesgo *alto*.
- 10- El FPI presenta signos de saturación en las condiciones más extremas de riesgo (altas temperaturas). Esto explica porqué el índice responde mejor en primavera que en verano, y en las regiones frescas que en las cálidas. Este hecho afecta también al valor umbral de sensibilidad del índice que se localiza tanto más alto cuanto más cálida es la región.
- 11- Se ha constatado que existe una clara relación entre el FPI y el tamaño de los incendios, según la cual, cuanto mayor es un fuego, más alejado (y por encima) se encuentra el FPI correspondiente de las condiciones medias de riesgo del día en la región (FPI medio de ese día en la región).
- 12- Basándose en esta relación entre el FPI y el tamaño de los incendios, se ha propuesto una metodología que permite clasificar el riesgo de un territorio en niveles, en función del tamaño de incendio esperado. Esta metodología se basa en modelizar el tamaño de los incendios utilizando la función de Weibull

biparamétrica. Los resultados obtenidos dependen de la región (mejores en las más frescas) si bien, también parecen depender del número de datos.

- 13- El análisis de los valores que el FPI alcanza en los 10 días previos a cada incendio ha permitido comprobar que el índice presenta una tendencia general a aumentar de valor a medida que se acerca la fecha del fuego. Este aumento es especialmente notable a partir del cuarto día antes del incendio.

Por último, es conveniente insistir en que el FPI es ajeno a las situaciones de conflictividad social y a muchas de las particularidades de la relación que cada sociedad mantiene con el fuego. Por ello, como ocurre con cualquier otra herramienta de prevención, su uso no se concibe sino es considerando que la información que proporciona es complementaria a la de otras fuentes.

Por último, queda señalar que dados los resultados obtenidos, se considera muy interesante probar el índice a un a escala mayor que permita mejorar algunos aspectos, por ejemplo, la resolución espacial de los datos, el número de estaciones meteorológicas disponibles. Este trabajo ya se ha sido y ha proporcionado los primeros resultados (Huesca et al 2007) que demuestran que es posible obtener una versión mejorada del FPI que funcione satisfactoriamente a escala regional.

AGRADECIMIENTOS

El cálculo del FPI europeo se realizó en el *Joint Research Centre* de la Comisión Europea, durante el disfrute de una beca Marie Curie otorgada a Ana Sebastián. Esta autora agradece tanto a dicha institución los medios facilitados para realizar el trabajo.

REFERENCIAS

- Burgan, R. E. and R. A. Hartford (1993). Monitoring vegetation greenness with satellite data, USDA Forest Service.
- Burgan, R. E., R. W. Klaver and J. M. Klaver (1998). "Fuel models and fire potential from satellite and surface observations." *International Journal Of Wildland Fire* 8(3): 159-170.
- Deeming, J. E. and J. K. Brown (1975). "Fuel models in the national fire danger rating system." *Journal of Forestry* 73(6): 347-350.
- Huesca-Martínez, M., Palacios-Orueta, A., Montes, F., Sebastián-López, A., Escribano, p. (2007). Forest Fire Potential Index for Navarra Autonomic Community (Spain). In proceeding of the 4th International Conference of Wildland Fire, Seville (Spain), May 13-17.
- Loveland, T. R., J. W. Merchant, D. O. Ohlen and J. F. Brown (1991). "Development of a land-cover characteristics database for the conterminous U.S." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(11): 1453-1463.
- Sebastián-López, A., R. E. Burgan, J. T. San Miguel-Ayaz (2002). Assessment of Fire Potential in Southern Europe. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Rotterdam, Millpress.
- Sebastián-López, A., J. San-Miguel-Ayaz and R. E. Burgan (2002). "Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observation for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale." *International Journal of Remote Sensing* 23(13): 2713-2719.
- Sebastián-López, A., J. San-Miguel-Ayaz and G. Libertà (2000). An integrated forest fire risk index for Europe. *Remote Sensing in the 21st Century: A decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation*, Dresden, Germany, EARSeL.
- Shasby, M. B., R. R. Burgan and G. R. Johnson (1981). Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data. *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, West Lafayette, Purdue University.