

---

## FUNDAMENTOS Y UTILIZACIÓN DE ÍNDICES METEOROLÓGICOS DE PELIGRO DE INCENDIO

Inmaculada Aguado<sup>1</sup> y Andrea Camia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá  
Colegios, 2-28801. Alcalá de Henares (Madrid)

<sup>2</sup>Dipartimento Agroselviter. Università di Torino  
Via Leonardo da Vinci, 44. Grugliasco (Torino)

**Resumen:** Presentamos en este trabajo una serie de reflexiones acerca de la importancia de los índices meteorológicos de peligro de incendio en la prevención de incendios forestales. Se presentan los principales sistemas de peligro utilizados actualmente, tanto en Norteamérica como en Europa. Asimismo, se plantean las fases que se deben considerar en el momento de utilizar un índice de peligro y los problemas derivados de la espacialización de dichos índices. Frente a los métodos más tradicionales en la prevención de incendios forestales se apunta la posibilidad de utilizar las imágenes de satélite para estimar el peligro de incendio.

**Palabras clave:** Índices de peligro de incendio, espacialización, imágenes de satélite.

**Abstract:** *The importance of meteorological fire danger rating indices in fire prevention and presuppression is underlined. Fire danger rating systems currently used in North America and Europe are briefly illustrated. In addition, the main steps and issues to be addressed when operationally setting up a fire danger rating system are commented, with special stress on spot data spatialisation problems. As an alternative to the traditional methods of assessing fire danger level, the possible use of satellite images is also discussed.*

**Key words:** *Fire danger rating indices, spatialisation, satellite images.*

---

## INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de incendios en la cuenca mediterránea está estrechamente ligada a la actividad humana, pues la mayor parte de los incendios son intencionados o debidos a negligencias. No obstante, es indudable el interés de estudiar diversos factores físicos que intervienen en el fenómeno fuego, ya sea el estado hídrico de los combustibles o las condiciones que imponen distintos factores meteorológicos, debido a que estos incendios tienen una incidencia y severidad mayor cuando esas variables naturales son críticas.

Entre los diferentes agentes físicos que intervienen en un incendio forestal el clima ejerce un factor de control predominante en la frecuencia y ocurrencia de incendios, porque determina la sucesión de períodos secos y húmedos y, en consecuencia, la acumulación de biomasa, la carga de combustible y su estado hídrico. No obstante, a pesar del importante papel del clima, los parámetros meteorológicos, considerados de manera individual, presentan generalmente un grado de correlación débil con la ocurrencia de incendios. Por el contrario, cuando estos parámetros se consideran de forma conjunta los resultados son más satisfactorios. La elaboración de índices meteorológicos que combinan las diferentes variables meteorológicas resulta, por lo

tanto, fundamental en las tareas de predicción y prevención de incendios (Carrega, 1990).

Un índice de peligro es un instrumento de predicción que cuantifica el riesgo de incendio a partir de una serie de factores (permanentes y variables), que condicionan el inicio y propagación del fuego. Las condiciones climatológicas generales figuran entre los factores permanentes que permiten una caracterización general del área, si bien no influyen de forma decisiva en la variación diaria del índice. Son los factores variables los que, medidos o estimados periódicamente, proporcionan la oscilación del índice a corto plazo (Vélez, 1985).

En las primeras investigaciones de carácter preventivo se observó que el comportamiento del fuego estaba influido por los fuertes cambios, que a lo largo del día experimentaba el contenido de humedad de los combustibles muertos existentes sobre el suelo (Chandler et al., 1983). Enseguida se planteó el análisis de las relaciones entre el contenido de humedad del combustible y los elementos meteorológicos.

Las variaciones en el contenido de humedad del combustible, y por consiguiente su inflamabilidad, provienen fundamentalmente de una compleja interrelación entre las diferentes variables meteorológicas y los distintos tipos de combustibles. La radiación solar, precipitación, temperatura del aire y humedad atmosférica afectan principalmente al contenido de humedad del combustible y, por tanto, tienen un papel protagonista en el inicio de un incendio. Por otro lado, una vez iniciado el incendio, otras variables como la velocidad y dirección del viento o la estabilidad atmosférica ofrecen una notable influencia en la propagación del fuego.

Es preciso aclarar algunos términos y expresiones, respecto al concepto de peligro de incendio, que varían en significado según la bibliografía consultada. En Europa no existe una terminología uniforme sobre esta materia, se utilizan expresiones como: *risque*, *hazard*, *danger*, y *risk*, para referirse a índices que cuantifican el peligro diario de incendios forestales en función de factores meteorológicos (Carrega, 1990; Gonçalves y Lourenço, 1990; Sol 1993). La bibliografía española, al igual que la europea, no diferencia entre los términos **riesgo** y **peligro**.

Por el contrario, la bibliografía anglosajona sí distingue entre ambos conceptos: el riesgo (*risk*), queda definido por la probabilidad de que se produzca un incendio en un lugar, considerando la naturaleza e incidencia de los agentes causantes; en él juegan un papel importante las variables rela-

cionadas con la incidencia histórica del fuego: causas y recurrencia de los incendios. El peligro de incendio (*danger*) es el resultado de la acción de factores constantes (*long term*) y variables (*short term*) que afectan al inicio, desarrollo y dificultad de control de los incendios así como al daño que ocasionan (USDA, 1975). Este término considera, por tanto, los factores físicos que intervienen en el incendio (combustibles, topografía y meteorología) y hace referencia a un concepto de peligro que varía continuamente.

---

## ÍNDICES METEOROLÓGICOS DE PELIGRO DE INCENDIO

Los índices disponibles en la actualidad varían mucho en función de las variables que consideran, los más sencillos utilizan diferentes variables meteorológicas para estimar la posibilidad de iniciarse un incendio, mientras en los más complejos se combinan un gran número de factores a partir de modelos teóricos y/o empíricos para conseguir índices de ignición y propagación. Aunque todos estos sistemas varían en complejidad, el nexo común a todos ellos es el objetivo de conseguir mediciones simples y comparables de la inflamabilidad del combustible forestal diariamente (Chandler et al., 1983).

En ocasiones, el diseño de los índices meteorológicos de peligro está basado en los fundamentos físicos que rigen la difusión de la humedad en los combustibles. Estos índices se desarrollan a partir de experimentos en el laboratorio donde se puede ejercer un control mayor sobre las variables que intervienen en el proceso. Por el contrario, en otros índices se otorga más peso a los experimentos realizados en el campo, ya que reproducen e integran de forma más adecuada los efectos de numerosas variables difíciles de medir en el laboratorio.

Debido a las limitaciones de los modelos totalmente empíricos, que perderían gran parte de su fiabilidad si se aplicasen en condiciones diferentes a las experimentales, la tendencia es incorporar a esta fase experimental una fundamentación teórica, que derive en la obtención de leyes de comportamiento del fuego de aplicación más general.

El sistema de peligro estadounidense es representativo de los índices más teóricos, ya que tiene una fuerte fundamentación matemática y física en el análisis de la humedad del combustible. A partir de experimentos realizados en el la-

boratorio se pretende medir la influencia de determinados tipos de combustible y factores meteorológicos sobre el comportamiento del fuego (Deeming et al., 1977).

Por el contrario, sistemas como el canadiense o el australiano, aunque basados también en fundamentos físicos, se desarrollaron a partir del análisis de numerosos datos de campo. Los índices canadienses se construyeron empíricamente, relacionando de forma conjunta la meteorología, la humedad del combustible y el comportamiento del fuego con datos registrados durante diferentes estaciones de incendios, en una serie de puntos determinados (Van Wagner, 1974; McArthur, 1973).

Otros índices de peligro como el utilizado en Francia o Italia basan su cálculo en la estimación del estado del balance hídrico que afecta al combustible. Estos índices evalúan la reserva de agua del suelo, contabilizando las pérdidas debidas a la evapotranspiración de las plantas y los aportes recibidos por las precipitaciones. Esta reserva nos indicaría de forma más o menos precisa el estrés hídrico de la vegetación.

La mayoría de los índices meteorológicos de peligro poseen un factor acumulativo que considera a partir de las condiciones meteorológicas pasadas las condiciones presentes.

El efecto de la meteorología a largo plazo se estima de forma mucho más refinada en los denominados Índices de sequía (*drought indices*). En estos índices generalmente intervienen elementos como la capacidad de la reserva de agua del suelo, modelos de evapotranspiración, precipitación y tipo de combustibles. Un elemento esencial en estos índices es el denominado período de desfase (Van Wagner, 1985). Si en un índice este tiempo de desfase es amplio, los cambios a corto plazo estarán suavizados. Factores como la

temperatura máxima diaria o la longitud del día afectarán a los valores diarios del índice.

Como resumen, podemos apuntar que entre los índices de peligro operativos en los distintos países se observa una gran variedad respecto a las variables meteorológicas que utilizan, el tipo de combustible para el que se estima la humedad, así como los objetivos que persiguen. En unos casos se considera sólo la fase de ignición, mientras que en otros se intenta estimar también la propagación (Tabla 1).

En los más avanzados, sistemas canadiense (FWI, *Fire Weather Index*) y estadounidense (NFDRS, *National Fire Danger Rating System*), sus índices finales integran tanto la ignición como la propagación, si bien difieren en los tipos de combustible sobre los que están basados sus cálculos. El índice estadounidense diferencia entre 22 tipos de combustibles forestales, mientras que el canadiense realiza sus estimaciones a partir de un combustible estándar (poblaciones adultas de pinos). Por otra parte, en ambos casos se intenta evaluar el estado hídrico en combustibles de distinto grosor, y en el índice estadounidense se incluye, además, el contenido de humedad de la vegetación viva. También estos dos sistemas, ofrecen una estimación de los efectos de la sequía en los combustibles.

Respecto a la propagación, el índice canadiense hace sus previsiones teniendo en cuenta el viento y la humedad del combustible fino muerto, mientras que el índice estadounidense considera, además, la humedad en otros tipos de combustible de mayor grosor e incluye la pendiente como factor de propagación.

El índice utilizado en el sureste francés (*Risque Numerique Meteorologique*) es también un índice mixto (ignición / propagación). Al igual que en los

Tabla 1: Características generales de diferentes Índices Meteorológicos de Peligro.

	OBJETIVOS		DATOS NECESARIOS PARA SU CÁLCULO											TIPO DE COMBUSTIBLE		EFECT. DE LA SEQUÍA
			TEMPERATURA			PRECIPITACION		HUM. RELAT.	VELOC. VIENTO	NUBOSIDAD	Nº HORAS LUZ	LATT.	RADIACION	VIVO	MUERTO	
	Propag.	Ignic.	MAX.	MIN.	DIARIA	CANTIDAD	DURAC.									
NFDRS Sistema Estadounidense	+	+	+	+	No	+	+	+	+	+	+	No	No	+	+	+
CFFWI Sistema Canadiense	+	+	No	No	+	+	No	+	+	No	No	No	No	No	+	+
ICONA Probabilidad de Ignición		+	No	No	+	No	No	+	No	No	No	No	No	No	+	No
Riesgo Numérico Francia	+	+	+	+	+	+	No	+	+	+	No	+	No	+	+	No
IREPI Italia	No	+	No	No	+	+	No	+	+	No	No	No	+	+	No	No

casos anteriores se estima el contenido de humedad en dos tipos de combustible: la vegetación viva a partir de la reserva de agua del suelo y la vegetación muerta en función de distintas variables meteorológicas (Sol, 1990).

En el índice italiano IREPI (*Indice di Riduzione Evapotraspirazionale del Pericolo di Incendio*) se utiliza la reserva de agua del suelo como estimador del comportamiento diario de la vegetación viva, pero en este caso el índice final sólo ofrece información sobre la ignición; las características de propagación del fuego se obtienen a posteriori considerando el factor viento (Bovio et al., 1984).

En España antes de disponer de un sistema de peligro propio se experimentó con diferentes métodos utilizados en distintos países. Desde 1987 se encuentra en vigor un Índice de peligro diseñado por el ICONA (Probabilidad de Ignición), que se inspira en el método desarrollado por el laboratorio del fuego de Missoula, Montana (ICONA, 1990). Se trata de un índice de ignición, en el cual no se tiene en cuenta el estado de la vegetación viva. El índice estima el contenido de humedad de los combustibles ligeros y muertos, situados sobre la superficie del bosque a partir de la temperatura del aire, humedad relativa, exposición, topografía y mes y hora en que se realizan las mediciones. Este índice no considera el efecto de las condiciones meteorológicas pasadas.

---

## UTILIZACIÓN DE UN MÉTODO DE PREVISIÓN DEL PELIGRO DE INCENDIO

Desde el punto de vista de la prevención de incendios forestales, la utilidad de predecir la variación del peligro en un período determinado, reside fundamentalmente en la posibilidad de organizar el servicio de prevención y vigilancia, así como optimizar la localización y preparación de los medios necesarios para la extinción. Se trata naturalmente de una actividad que reviste diverso interés en función de la escala territorial en la cual estamos trabajando. La utilización de un sistema de predicción del peligro de incendio presupone la resolución de algunos temas:

- Definición de un índice adaptado a la estimación del peligro de incendio en ese territorio.
- Determinación de clases de peligro.

- Resolución temporal de la adquisición y de la estimación del grado de peligro.
- Diseño de la red de estaciones meteorológicas.

A continuación detallaremos cada uno de estos aspectos.

### Definición de un índice adaptado a la estimación del peligro de incendio en un territorio

Los incendios forestales dependen de múltiples factores, entre ellos la diversidad del medio natural determina una gran variedad de interacciones y configuraciones posibles. Esto implica que en función de las condiciones espaciales (vegetación, suelo, orografía, etc.) y el período del año considerado, las variables meteorológicas se relacionan de modo diferente con el grado de peligro de incendio. En determinadas zonas el viento puede tener un papel predominante, mientras que en otras el balance hídrico del suelo o el contenido de humedad del combustible pueden ser los factores más relevantes. El índice elegido debe considerar estos aspectos y ser sensible a las condiciones particulares del área de trabajo adaptándose además a la variabilidad regional de los factores meteorológicos. Por tanto, es aconsejable realizar una estratificación previa según criterios climáticos y ambientales. Sirva de ejemplo el sistema usado en EE.UU. que varía la previsión según la tipología del combustible presente.

En la elección de un índice de peligro se recomienda un análisis preliminar del fenómeno fuego (estacionalidad, distribución, características), así como de la variabilidad ambiental que debe incluirse en el modelo. Este estudio previo nos permitirá elegir entre los diversos índices existentes o bien desarrollar y formular un índice teóricamente idóneo para la zona. Factores secundarios a considerar, en la idoneidad de un índice, son la complejidad de su cálculo (si bien esto es, actualmente, menos relevante gracias a la utilización del ordenador) o la necesidad de utilizar variables meteorológicas no siempre disponibles (por ejemplo, la radiación solar).

Debido a que, desde un punto de vista práctico el índice debe correlacionarse con variables de interés como el número de incendios o la superficie quemada (Wagner, 1974) es necesario cuantificar esta relación y finalmente elegir el índice más adecuado.

La obtención de un índice adaptado a la estimación del peligro de incendio en la cuenca mediterránea europea era uno de los objetivos de los proyectos, recientemente concluidos, MINERVE I y II, que estuvieron financiados por la DG XII *Environment and Climate Programme*. En estos proyectos se contrastaron diferentes índices meteorológicos, tratando de relacionar el valor de cada índice con series históricas de incendios (Viegas et al., 1994). En este estudio se comprobó que no era posible obtener un índice que por sí mismo permitiera obtener una estimación del peligro para toda el área mediterránea. Entre los diferentes índices utilizados el índice canadiense FWI ofreció los mejores resultados.

## **Determinación de clases de peligro**

El resultado de un algoritmo para calcular un índice meteorológico es una variable numérica continua o discreta. Este dato numérico se expresa normalmente en términos cualitativos que indican el grado de peligro de incendio. Las clases así identificadas revisten un significado más fácilmente interpretable y de mayor utilidad para los servicios encargados de la extinción de incendios. La definición del grado de peligro se puede afrontar de diferentes formas.

En algunos índices se establecen estas clases a priori según lo indicado por los autores del índice. Esto es particularmente válido para los índices realizados exclusivamente según un modelo físico, por ejemplo el índice utilizado en Portugal, una versión modificada del índice de Nesterov (INMG, 1988); también sucede así en el índice español.

En otros casos, como por ejemplo el índice FWI canadiense, de naturaleza física pero calibrado empíricamente, los autores definen cómo usar estos umbrales de peligro, específicamente para el territorio concreto donde se va a aplicar (Van Wagner, 1987). En este caso, la definición de clases considera el rango de variación de la variable meteorológica, que haya sido verificado en el área. En otros índices no se definen las clases de forma explícita.

En general, es importante definir clases de peligro que tengan un significado operativo y siempre es posible proceder de forma empírica. Se trata de definir escenarios de interés, que ofrezcan un valor operativo para el servicio forestal e intentar relacionar tales escenarios con un determinado rango de valores del índice. La correlación se comprueba a partir del análisis de la serie histórica de incendios y la serie meteorológica aplicando dife-

rentes técnicas (Andrews y Bradshaw, 1997; Bovio y Camia, 1998).

Cuando el territorio a analizar es extenso y/o la heterogeneidad es muy amplia, es difícil definir umbrales válidos para toda el área. Los escenarios dependen en parte de los objetivos (exigencia de los servicios forestales, información al público, etc.) y de la problemática de cada área.

Para definir estos escenarios se puede hacer referencia a la frecuencia, comportamiento de los incendios o a ambos. En el primer caso, el escenario se configura como probabilidad de verificarse un cierto número de incendios en un área determinada y en un cierto intervalo de tiempo; en el segundo se puede hacer referencia sólo a la probabilidad de que un incendio tenga un comportamiento determinado, expresado como superficie que alcanzará potencialmente el incendio. Combinando ambos, los escenarios pueden estar definidos en función de la probabilidad de que se produzca un cierto número de incendios de determinada extensión.

En el entorno europeo se consideran eventos críticos los incendios mayores de 500 Ha, a partir de este tamaño, estos sucesos se denominan grandes incendios. Uno de los objetivos del proyecto MEGAFIRES financiado por la DG XII *Environment and Climate Programme* era definir para la cuenca mediterránea la correlación entre índices meteorológicos y el escenario de ocurrencia de grandes incendios con relación tanto a la probabilidad de ocurrencia como al comportamiento una vez iniciado el fuego (Bovio y Camia, 1997).

## **Resolución temporal de la adquisición y de la estimación del grado de peligro**

Debido a la estacionalidad de los incendios forestales el cálculo de índices meteorológicos tiene interés en el período de máxima frecuencia de éstos, que se corresponde en el área mediterránea con el verano.

Durante la estación de incendios, la resolución temporal del cálculo del índice de peligro es normalmente diaria, pero el aumento en el número de estaciones meteorológicas automáticas y la utilización de técnicas como la teledetección están destinadas a variar esta resolución en un futuro próximo (Carlson et al., 1996).

En muchos casos la resolución diaria es suficiente para responder a las exigencias de los ser-

vicios de defensa que cotidianamente deben disponer los recursos de extinción e intensificar las labores de vigilancia donde sea necesario. Una mayor frecuencia en el cálculo del índice implica una dificultad operativa en la distribución de la información.

Ahora bien, el dinamismo del fenómeno a predecir supera la resolución temporal con la que hoy se calculan los índices. El nivel de peligro varía a lo largo del día y generalmente, alcanza valores máximos en las primeras horas de la tarde. Por su parte, los servicios forestales, para organizar los medios adecuadamente, requieren esta información sobre el grado de peligro al principio del día. Como compromiso entre ambas exigencias se prefiere calcular y difundir el índice al servicio forestal en torno a las 12,00 horas, anticipándose de este modo al momento de máxima peligrosidad.

Algunos índices de peligro, como el canadiense FWI, están calibrados para responder a las condiciones meteorológicas del mediodía. Se puede refinar la estimación del peligro, utilizando para el cálculo del índice los datos meteorológicos previstos para otros momentos del día.

### **Definición de la red de estaciones meteorológicas**

El cálculo del índice de peligro de incendio se efectúa a partir de las mediciones puntuales realizadas en estaciones meteorológicas distribuidas por el territorio. Este hecho requiere definir la localización y densidad de estas estaciones y el tipo de sensores meteorológicos requeridos para calcular los índices.

La localización y densidad de las estaciones debe ser consecuente con un proceso de optimización de la estimación. La densidad mínima depende de la variabilidad ambiental del territorio, por tanto, no es posible dar una indicación general sobre este aspecto. Los criterios para optimizar la distribución de estaciones meteorológicas son discutidos en Fujioka (1986) y Fujioka (1987).

Por otro lado, las estaciones meteorológicas deben estar dotadas de los sensores necesarios para el cálculo del índice seleccionado. La mayor parte de los índices requieren medidas sobre precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los índices que consideran la inestabilidad atmosférica necesitan medidas sobre temperatura y humedad relativa en diferentes capas atmosféricas; otros índices requieren información sobre la radiación solar.

Una mayor resolución temporal en la estimación del peligro requiere una eficiente y continua capacidad para transmitir la información a una unidad central donde se almacenan los datos y se calcula el índice para diferentes puntos de la red.

---

## **ESPACIALIZACIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGRO DE INCENDIO**

Para estimar el peligro de incendio en el territorio los datos obtenidos puntualmente en las estaciones meteorológicas deben ser espacializados. Disponemos de tres alternativas para obtener la distribución espacial del peligro de incendio en el territorio:

- Extrapolar los datos meteorológicos medidos de forma puntual.
- Extrapolar los índices meteorológicos estimados puntualmente.
- Utilizar métodos no puntuales para medir las variables.

Existen muchos métodos de diferente complejidad para extrapolar los datos meteorológicos obtenidos puntualmente. Estos métodos tienen en general una base física e intentan modelizar la variación espacial de diversos parámetros meteorológicos. Cada uno de los parámetros meteorológicos necesita un modelo específico y el éxito de la extrapolación varía según de que variable se trate.

Con la extrapolación se obtiene una superficie continua, que puede ser representada a partir de un modelo raster, en el cual es posible calcular el índice de peligro en cada celda, utilizando los datos meteorológicos estimados. La precisión del valor del índice y por tanto, la bondad de la previsión depende, obviamente, de la exactitud obtenida en el proceso de extrapolación.

Normalmente, para efectuar la extrapolación con suficientes garantías es necesario disponer de datos auxiliares, como puede ser un modelo digital del terreno. Un modelo simple, aplicado frecuentemente, extrapola la temperatura del aire y la humedad relativa utilizando un gradiente altitudinal para estos dos parámetros. La precipitación es más difícil de extrapolar y particularmente las precipitaciones asociadas a tormentas estivales; por consiguiente, la estimación de la distribución espacial de este parámetro presentará errores más elevados. La velocidad del viento puede extrapolarse,

con suficiente precisión para este tipo de cálculos, a partir de modelos que necesitan mediciones sobre el perfil del viento y un modelo digital del terreno (Ross et al., 1988).

Existe otra dificultad en la espacialización de los datos meteorológicos y es el volumen de datos a procesar, pues el índice meteorológico debe ser calculado en cada una de las celdas definidas previamente y en el caso de los índices acumulativos se debe disponer, además, de la información meteorológica del día anterior.

Otra posibilidad de espacializar el peligro de incendio parte de la extrapolación del índice meteorológico de peligro. Debido a que el índice es normalmente, una combinación compleja de diferentes variables meteorológicas, resulta difícil aplicar algún modelo de tipo físico que permita estimar de forma continua la distribución del índice. Es preferible definir previamente un área de influencia para cada estación meteorológica y asignar a cada polígono, así delimitado, el valor del índice de peligro calculado en la estación base.

El punto crítico en este caso es delimitar el área de influencia en función de diferentes criterios. Entre los criterios que permiten garantizar la homogeneidad interna del área de influencia están: las regiones climáticas, la orografía y la distancia a la estación meteorológica. Sin embargo, con objeto de unir áreas homogéneas desde el punto de vista de la gestión de incendios, es aconsejable considerar criterios relativos a la distribución del peligro de incendio a largo plazo, así como las medidas preventivas definidas por los servicios de defensa.

La información sobre el peligro de incendio que se puede derivar de esta aproximación tiene una resolución espacial limitada a la dimensión del área de influencia, que en definitiva depende de la densidad de las estaciones meteorológicas. Por otro lado, la atribución de un valor, medido puntualmente, al resto del territorio implica una generalización que se aleja de la estimación real de la distribución espacial de la variable. Tal generalización puede ser corregida a través de un procedimiento empírico, que correlacione los valores del índice con los incendios registrados a lo largo de un período histórico.

El volumen de cálculo en este método es mucho más sencillo, una vez que se ha asignado cada zona a su área de influencia correspondiente, es suficiente calcular el índice en cada estación meteorológica y después asignarlo al resto del área.

Frente a estos métodos de extrapolación, se abre una nueva perspectiva en la prevención de

incendios forestales con la incorporación de técnicas como la teledetección espacial, debido a que las imágenes espaciales facilitan un muestreo espacial bastante detallado (frente a la densidad media de estaciones meteorológicas) y recogen información clave sobre el estado de la vegetación viva. En esta línea, el sensor NOAA-AVHRR ha demostrado su capacidad para evaluar en periodos cortos de tiempo las condiciones hídricas del combustible y señalar situaciones críticas de cara al inicio del fuego (Burgan, 1996; Desbois y Vidal, 1996).

Lógicamente es necesario establecer la relación entre la señal que recibe el sensor y el estado hídrico del combustible. El problema más importante es aislar el componente hídrico en la reflectividad global de la planta; los intentos a partir de los índices de vegetación han mostrado buenos resultados, especialmente en zonas de pradera (Paltridge y Barber, 1988; Chladil y Nunez, 1995). En ecosistemas como el mediterráneo se ha encontrado una estrecha relación entre el contenido en humedad de diferentes especies de matorral y el índice de vegetación NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) (Alonso et al., 1996). En cualquier caso, se han detectado mejores resultados para una variedad del índice de vegetación, que tenga en cuenta el infrarrojo medio en lugar del rojo (este es el denominado *Moisture Stress Index*, MSI: Rock et al., 1986) ya que esa región del espectro es más sensible al contenido de humedad de la planta.

Otro enfoque, parte de estimar las condiciones de la humedad de la vegetación, a partir de la evapotranspiración de la planta, relacionando su medida actual con la potencial. Los modelos planteados para determinar condiciones de riesgo de incendio se basan principalmente en las diferencias observadas entre la temperatura del suelo (obtenida a partir de imágenes NOAA-AVHRR) y la del aire (procedente de observatorios meteorológicos). Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será también la evapotranspiración, asumiendo una cobertura vegetal constante (Vidal y Devaux-Ros, 1995; Desbois y Vidal, 1996).

Con objeto de estudiar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones de peligro a partir de imágenes espaciales, en el marco del proyecto europeo MINERVE II se desarrolló una metodología que nos permitiera utilizar la información procedente de la imagen de satélite para extrapolar espacialmente los índices meteorológicos de peligro de incendio. La relación entre los índices meteorológicos de peligro y la información captada por el satélite NOAA se ha medido cuantitativamente, a partir de la correlación entre ambas variables. La

Comunidad Autónoma de Andalucía ha sido el área piloto seleccionada para estos ensayos, debido a su variedad geográfica y a la notable incidencia de los incendios en esta región.

Desde un punto de vista temporal, en los años analizados (1995-1996), se ha comprobado la correlación existente entre los índices meteorológicos de peligro y la información que facilita la imagen de satélite, especialmente en el caso de los índices meteorológicos que consideran tendencias a largo plazo (*Drought Code* y *Keetch Byram Drought Index*). Estos índices parecen estar bien adaptados para seguir la variación estacional de la vegetación mediterránea, caracterizada por su déficit hídrico estival.

La correlación espacial de índices meteorológicos e imágenes de satélite, aunque con menor fuerza, confirma el análisis de las tendencias temporales, por consiguiente, se confirma la validez de la información captada por los satélites para predecir los índices meteorológicos en una región caracterizada por su alta variabilidad climática (Aguado et al., 1998).

Estos resultados nos permitieron realizar un primer ensayo de interpolación de índices meteorológicos de peligro a partir de imágenes de satélite, basándonos en los buenos ajustes encontrados entre estas variables, especialmente el índice canadiense *Drought Code* y el índice de vegetación

NDVI. La interpolación espacial se llevó a cabo utilizando los coeficientes de regresión, de esta forma es posible disponer de mapas que nos informan de la distribución espacial del peligro de incendio en áreas donde los datos meteorológicos no están disponibles (Figura 1). Este mapa representa únicamente, los valores estimados del índice canadiense *Drought Code* en áreas de cubierta forestal herbácea. El resto de las cubiertas forestales fueron excluidas del análisis debido a que presentaban una mayor variabilidad espacial fruto de las diferentes características climáticas y fenológicas.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta diferentes aspectos a considerar en la elección de un sistema de predicción del peligro de incendio. Así mismo, se plantea el problema de la espacialización de los índices meteorológicos de peligro y se presenta un proyecto que pretende resolver dichos problemas utilizando técnicas como la teledetección. Aunque el proyecto que desarrollamos se encuentra actualmente en fase de estudio podemos extraer algunas conclusiones preliminares.

Por un lado, los resultados obtenidos hasta el momento nos permiten afirmar que los índices meteorológicos y las imágenes espaciales tienen un

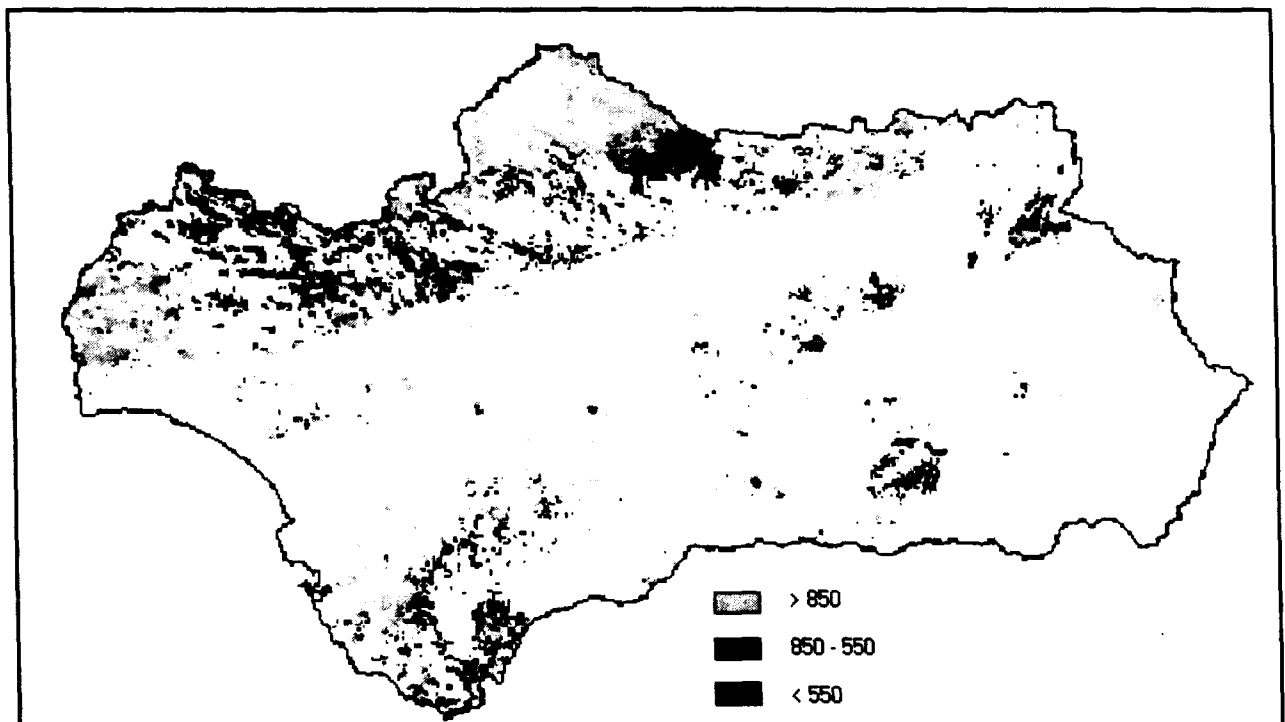


Figura 1. Estimación del índice DC a partir de NDVI (11-20 Julio, 1995)



nexo común relacionado de forma indirecta con el contenido de humedad de la vegetación.

Por otra parte, dada la variabilidad espacial existente en Andalucía, parece aconsejable en el futuro realizar previamente, una delimitación de áreas homogéneas con objeto de representar de forma más fiable la alta variabilidad local de esta región.

También parece oportuno incluir en el análisis nuevos índices meteorológicos de peligro que contemplen tanto la fase de ignición como las características de la propagación. Respecto a los índices derivados de las imágenes de satélite es conveniente ampliar los métodos de estimación del estado hídrico del combustible con la utilización de índices adaptados al bosque mediterráneo.

---

## REFERENCIAS

- Aguado, I., Chuvieco, E., Camarasa, A., Martín, M.P y Camia, A. (1998). Estimation of Meteorological Fire Danger Indices from Multitemporal Series of NOAA-AVHRR data. *III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Coimbra, ADAI: 1131-1147.
- Alonso, M., Camarasa, A., Chuvieco, E., Cocero, D., Kyun, I., Martín, M. P. y Salas, F J. (1996). Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. *EARSeL Journal Advances in Remote Sensing* 4: 9-24.
- Andrews, P. L. y Bradshaw. L. S. (1997). *FIRES: Fire Information Retrieval and Evaluation System- A Program for Fire Danger Rating Analysis*. Ogden, USDA Forest Service. Intermountain Research Station.
- Bovio, G., Quaglino, A. y Nosenzo, A. (1984). Individuazione di un indice di previsione per il pericolo di incendi boschivi. *Monti e Boschi* 35: 39-44.
- Burgan, R.E. (1996): Use of remotely sensed data for fire danger estimation. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 4: 1-8.
- Bovio, G. y Camia, A (1997). Meteorological indices for larges fires danger rating. *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. (E. Chuvieco, ed.). Alcalá de Henares. Departamento de Geografía: 73-90.
- Bovio, G. y Camia, A. (1998). Previsione del pericolo di incendio boschivo in Sardegna. *L'Italia Forestale e Montana* 52: 405-428.
- Carlson, J. D., Burgan, R. E. y Engle, D. M. (1996). Using the Oklahoma Mesonet in developing a near-real time next generation fire danger rating system. *22<sup>nd</sup> Agricultural and Forest Meteorology*: 249-252.
- Carrega, P. (1990). Climatology and index of forest fire hazard in mediterranean France. *I International Conference on Forest Fire Research*. Coimbra: B.05-1 -B.05-11.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. y Williams, D. (1983). *Fire in Forestry*. Volumen 1. *Forest Fire behavior and effects*. Nueva York, John Wiley and Sons.
- Chladil, M. A. y Nunez, M. (1995). 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.
- Deeming, J. E., Burgan, R. E. y Cohen, J. D. (1977). *The National Fire-Danger Rating System - 1978*. Ogden, UT, USDA Forest Service.
- Desbois, N. y Vidal, A. (1996). Real time monitoring of vegetation flammability using NOAA-AVHRR thermal infrared data. *EARSeL Journal Advances in Remote Sensing* 4: 25-32.
- Fujioka, F. M. (1986). A method for designing fire weather network. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 3: 564-570.
- Fujioka, F. M. (1987). Fire weather network design: an update. *9th Conference on fire and forest meteorology*. San Diego, California, American Meteorological Society: 165-169.
- Gonçalves, M. Z. y Lourenço, L. (1990). Meteorological Index of Forest Fires risk in the portuguese mainland territory. *I International Conference on Forest Fire Research*. Coimbra: B.07-1 - B.07-14.
- ICONA (1990). *V Curso Superior sobre defensa contra incendios forestales*. Madrid.
- INMG (1988). *Nota explicativa sobre o Índice De Risco Meteorológico de Incêndios Rurais*- Lisboa, Divisao de Meteorologia Agricola, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.
- McArthur A. G. (1973). *Forest Fire Danger meter, Mark 5*. Camberra, ACT. Australia. Forest Research Institute, Forest and Timber Bureau.
- Paltridge, G. W. y Barber, J. (1988). Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* 25: 381-394.

Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F. y Hoshizaki, T. (1986). Remote detection of forest damage. *Bioscience* 36: 439-445.

Ross D.G., Smith I.N., Mnins P.C., Fox D.G. (1988). Diagnostic wind field modeling for complex terrain: Model development and testing. *Journal of Applied Meteorology* 27: 785-796.

Sol, B. (1990). Estimation du risque météorologique d'incendies de forêts dans le Sud-Est de la France. *Revue Forestière Française* 17: 263-271.

Sol, B. (1993). *Project MINERVE etat d'avancement au 01/01/93*, Météofrance. Service Meteorologique interregional Sud-Est.

USDA (1975). *Wildfire Prevention Analysis: problems and programs*. Washington, D.C., USDA, Forest Service: 28.

Van Wagner, C. E. (1974). *Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index*. Ottawa, Canadian Department of Environment. Canadian Forestry Service.

Van Wagner, C. E. (1985). Drought, Timelag and Fire Danger Rating. *8th National Conference on Fire and Forest Meteorology*. Detroit; Michigan, Society of Amercian Foresters: 178-185.

Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa, Canadian Forestry Service.

Vélez, R. (1985). Aplicación de la predicción del peligro para la prevención de los incendios forestales. *Estudios sobre prevención y efectos ecológicos de los incendios forestales*. Madrid, ICONA: 15-19.

Vidal, A. y Devaux-Ros, C. (1995). Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index. *Agricultural and Forest Meteorology* 77: 207-224.