

Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG

Chuvienco, Emilio¹; Aguado, Inmaculada¹; Yebra, Marta¹; Nieto, Héctor¹, Martín, M. Pilar^{1,2}; Vilar, Lara²; Martínez, Javier²; Padrón, Diego¹; Martín, Susana³ y Salas, Javier¹

(1) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá

Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares

(2) Instituto de Economía y Geografía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Pinar, 21 – 28801 Madrid

(3) Departamento de Economía y Gestión Forestal, ETSI de Montes

Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid

RESUMEN

Se presentan en este trabajo las variables de entrada y el esquema de integración para estimar el peligro de ocurrencia de incendios forestales. El proyecto incluye información de diversas fuentes, que hacen referencia a variables socio-económicas, así como al estado de los combustibles y las características del territorio. Todas las variables se han cartografiado a una resolución espacial de un 1km² y se integran en un sistema de información geográfica, diseñado para este propósito. El índice se facilitará a los usuarios del proyecto en el verano de 2007, de cara a su ajuste y validación.

Palabras clave: Riesgo de incendio, Estado hídrico del combustible, MODIS, Riesgo humano, propagación del fuego,

ABSTRACT

This paper presents the input variables and the integration scheme developed within a national project to map wildland fire occurrence probability. This Project includes information from several sources accounting for socio-economic aspects, fuel moisture status and terrain conditions. All variables have been mapped at 1 sq km spatial resolution, and are organized into a dedicated geographic information system.

Keywords: Fire risk, Fuel Moisture Content, MODIS, Human fire risk, Fire propagation

Introducción

El fuego tiene un papel determinante en la dinámica de los ecosistemas terrestres, mostrándose como uno de los factores de control más determinante en la selección y adaptación de las especies. Desde épocas prehistóricas, se utiliza además como herramienta de gestión del territorio, principalmente para desbrozar en zonas de expansión agrícola y para ayudar a la nitrificación de suelos en vegetación de sabana. Tiene, finalmente, importantes implicaciones atmosféricas, ya que se considera que las quemaduras de biomasa suponen casi el 40% de las emisiones totales de CO₂, con un significativo aporte también de otros gases de efecto invernadero.

Además de este importante impacto global, los incendios tienen repercusiones regionales que pueden ser bastante negativas, sobre todo cuando los ciclos históricos de recurrencia se

modifican, ya por un cambio súbito en los patrones de ocupación del territorio (abandono de tierras en algunas zonas, colonización en otras), ya por los efectos indirectos del calentamiento global del planeta.

En este entorno, resulta cada vez más evidente la importancia de contar con mejores herramientas para el conocimiento y gestión de los incendios. El empleo de las tecnologías de la información geográfica proporciona nuevas posibilidades de obtener y gestionar información espacial, de cara a mejorar nuestra toma de decisiones sobre el territorio.

En este trabajo se presentan los resultados de uno de los componentes del proyecto Firemap, que pretende obtener índices integrados del riesgo de incendio para distintas regiones de España. El proyecto está organizado en cuatro módulos, que se orientan a cuatro grandes

factores de riesgo (fig. 1). Por un lado, el riesgo se considera un producto de dos factores, el peligro o probabilidad de que ocurra un incendio en un lugar y momento determinados, y la vulnerabilidad que hace referencia al daño potencial que el fuego supondría para ese lugar. A su vez, estos dos grandes elementos se dividen en otros dos factores cada uno, que son los que organizan el proyecto.



Fig. 1. Esquema de trabajo del proyecto Firemap

En la parte de vulnerabilidad, se consideran los factores socio-económicos por un lado, y ecológico-paisajísticos, por otro, mientras en lo que atañe a la probabilidad de ocurrencia se consideran factores humanos, por un lado, y factores físicos (vegetación, rayos, patrones de propagación), por otro. En este artículo solo comentaremos los factores relacionados con la probabilidad de ocurrencia, y dentro de ellos, con los aspectos que intentan determinar en qué momento es más probable que se inicie un fuego y como será su propagación de acuerdo a unos valores de referencia (fig. 2).

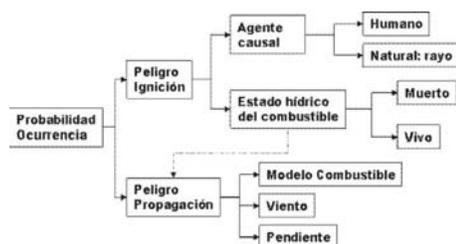


Fig. 2. Componentes de la Probabilidad de ocurrencia en el proyecto Firemap

Métodos

Como antes indicamos, el proyecto se ha organizado en cuatro subproyectos, y aquí comentaremos únicamente dos de ellos, centrados en la obtención de la probabilidad de inicio o pro-

pagación del fuego, considerando tanto los factores físicos como humanos. Describiremos brevemente las áreas de estudio, las variables que se han generado, los métodos de integración y las estrategias de validación previstas, ya que el proyecto está aún en desarrollo.

La mayor parte de las variables que se han desarrollado para el proyecto son estáticas, es decir se generan una sola vez para la longitud del periodo de incendios, ya que el sistema se orienta a la planificación estratégica. Algunas, sin embargo, requieren una actualización mayor, diaria para el caso de la humedad de los combustibles muertos, y semanal para los vivos.

Áreas de estudio

El proyecto Firemap ha tenido desde su origen una orientación regional, si bien las herramientas que se están desarrollando permitirían abordar análisis más amplios (a escalas más pequeñas), o incluso más detallados (escalas más grandes), ya que pensamos que son relativamente independientes del nivel de detalle. Para el proyecto se definieron cuatro regiones piloto: Aragón, Madrid, Comunidad de Valencia y provincia de Huelva. La unidad mínima de información es la cuadrícula UTM de 1 km².

Probabilidad de ignición asociada a factores humanos

Los factores vinculados a la actividad humana tienen especial relevancia en la cuantificación del riesgo de incendio forestal. Según las estadísticas oficiales el 96,1 % de los incendios que ocurren en España obedecen a causas humanas (DGCN y Ambiente, 2006). No obstante, existe una evidente dificultad en valorar y espacializar estos factores de cara a obtener modelos predictivos de la ocurrencia del fuego. A pesar de estas dificultades creemos que la identificación de los distintos tipos de factores de riesgo vinculados a la actividad humana representadas mediante variables relacionadas, por ejemplo, con los usos del territorio (vías de comunicación, vertederos, espacios naturales protegidos, etc.), y aspectos socioeconómicos (población ocupada en la agricultura, nivel de renta, tasa de paro, entre otros), permiten obtener modelos predictivos suficientemente fiables. Estos modelos pueden aportar información de gran interés para la planificación y establecimiento de estrategias de prevención y gestión de los espacios forestales.

Para la modelización de la ocurrencia de incendios debida a causa humana se ha utilizado en

este proyecto la regresión logística, técnica que permite describir las relaciones entre una variable dependiente dicotómica y un conjunto de variables independientes continuas o categóricas.

El primer paso consistió en la identificación de factores de riesgo asociados a la actividad humana y las variables que podían permitir su cuantificación y cartografía. En general, se intentó considerar preferentemente aquellas variables de carácter estructural, relacionadas con elementos permanentes del territorio. Así, por ejemplo en el grupo de variables representativas de incendios causados por accidentes y negligencias se incluyeron variables relacionadas con la accesibilidad (cercanía a carreteras o líneas de ferrocarril), así como las relacionadas con líneas eléctricas y presencia de campos de tiro y canteras. Por otro lado, las áreas recreativas, los contactos entre usos (interfaz urbano-forestal), potencial demográfico, cambio en la superficie forestal, localización de vertederos, variación de la población, porcentaje de jefes de explotaciones y plazas hoteleras, se incluyeron para representar los factores relacionados con incendios producidos por cambios socioeconómicos en el territorio. Las variables de interfase cultivo-forestal y pasto-forestal, carga ganadera y maquinaria agrícola representan los factores de ignición vinculados a las actividades rurales tradicionales. Finalmente, el factor de incendios producidos por la generación de conflictos, agrupa las variables relacionadas con titularidad de los montes, espacios naturales protegidos, tasa de paro y nivel de renta. Estas variables han sido generadas a partir de fuentes cartográficas y estadísticas espacializándose a resolución de 1 km², mediante herramientas SIG.

Como variable independiente se utilizó la ocurrencia de incendios de causa humana en el período 1990-2004 obtenida a partir de los partes oficiales de Incendio, donde la localización espacial de los incendios se recoge a nivel de cuadrícula de 10*10 Km. Para asociar esta información al nivel de detalle espacial requerido en el proyecto se aplicaron diversos procesos de espacialización orientados a reducir, en lo posible, la incertidumbre en la localización de los incendios (Vilar, 2006). Además, ya que el modelo de regresión logística requiere una variable dependiente dicotómica, fue necesario discretizar la variable dependiente (número de incendios de causa humana). Esto se hizo dividiendo la variable ordenada en 3 grupos con el mismo número de casos (grupo 1, baja incidencia, 3 alta incidencia y grupo 2 de incidencia

intermedia). A los casos incluidos en el primer grupo se les da valor 0 y a los del grupo 3 valor 1. Se eliminan del análisis los valores intermedios que quedarían en el grupo 2.

Antes de construir el modelo es conveniente eliminar variables innecesarias o redundantes (multicolinealidad). Para estudiar la incidencia de este fenómeno en los datos se aplicaron diversos diagnósticos de colinealidad así como otros dirigidos a analizar la significación de las variables independientes que nos ayudaron a decidir sobre el interés o no de incluirlas en el modelo.

Con las variables seleccionadas tras los mencionados análisis previos se elaboró el modelo de regresión logística. Se utilizó la opción por pasos hacia delante de Wald, con el valor 0,5 como punto de corte para la clasificación. El modelo se obtuvo empleando una muestra aleatoria del 60% de los casos, utilizando el 40% restante para validar la calidad de las estimaciones.

Los porcentajes de acierto en la clasificación obtenidos para las distintas zonas de estudio varían entre un 68,4 % (C. Valenciana) y un 84 % (Huelva). En general, la baja incidencia de incendio aparece mejor clasificada en los distintos modelos obtenidos llegando a un porcentaje de acierto del 92 % en el caso de Huelva. La alta incidencia alcanza porcentajes de acierto que oscilan entre el 57 y el 76 %.

Las variables incluidas en los modelos para las distintas zonas de estudio responden bastante bien a lo señalado por los gestores de incendios de las respectivas Comunidades Autónomas. En Madrid, por ejemplo, la variable con más peso en el modelo es la interfaz urbano-forestal que se relaciona con el riesgo real asociado al uso residencial y recreativo en zonas forestales.

Probabilidad de ignición asociada a la ocurrencia de rayos

Aunque la ocurrencia de incendios forestales causados por rayo es pequeña (cerca del 4% en nuestro país), la superficie quemada afectada por los mismos tiende a ser mayor que en el resto, debido a que habitualmente se producen en zonas forestales más inaccesibles, donde la detección y el ataque el fuego lleva más tiempo (Wotton y Martell, 2005). Además, las condiciones meteorológicas que nos encontramos durante las tormentas, con una mayor actividad al atardecer y con fuertes vientos hace más difícil el uso de medios aéreos para el ataque. Varios estudios sobre la ocurrencia de este tipo de in-

incendios han utilizado variables relacionadas con la orografía (Díaz-Avalos et al., 2001; Podur, 2003), así como la polaridad de los rayos (Latham y Williams, 2001; Wotton y Martell, 2005) y el estado hídrico de los combustibles (Díaz-Avalos et al., 2001; Rorig y Ferguson, 2002). También el tipo de vegetación juega un papel doble en la ocurrencia de incendios causados por rayo: 1) hay cubiertas vegetales con una mayor densidad de descargas (Dissing y Verbyla, 2003); y 2) diferencias en el tipo lecho forestal resultan en diferencias en la capacidad calorífica del material y por lo tanto en diferencias en la inflamabilidad (Latham y Williams, 2001).

Con el fin llevar a cabo este estudio se ha analizado la ocurrencia de incendios causados por rayo desde un punto de vista espacio-temporal para dos de las zonas de estudio del proyecto, analizando las siguientes variables:

- Localización de las descargas de rayo. Información proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología y la empresa Meteorológica S.A.
- Modelo Digital del Terreno, resolución de 250m. Proveniente de la Base Cartográfica Numérica. De este MDT se han derivado la pendiente, exposición y curvatura del terreno
- Mapa Forestal Nacional escala 1:50000. Proporcionado por la Dirección General de la Biodiversidad, a partir del MFE50 se ha recodificado la cartografía en grandes formaciones vegetales (coníferas, frondosas, bosque mixto, pastizales, matorrales y otras superficies forestales).
- Información diaria meteorológica. Proporcionado por la empresa Meteorológica S.A. con una resolución de 3x3 km². Se cuenta con datos diarios de temperaturas, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y precipitación. A partir de esta información se han calculado los modelos de humedad del combustible muerto derivados del *National Fire Danger Rating System* estadounidense (Bradshaw et al., 1983), y del *Canadian Forest Fire Weather Index* de Canadá (Van Wagner, 1987).
- Partes de Incendio Forestal, proporcionado por la Dirección General de la Biodiversidad.

Se ha desarrollado un modelo de probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal causado por rayo durante el periodo 2002-2004 para cada una de las cuatro zonas de estudio. Para ello se ha utilizado el método de regresión logística, tomando como variable dependiente la ocurrencia (o no) de al menos un incendio causado por rayo durante esos tres años dentro de cada una de las celdas de 3x3 km².

causado por rayo durante esos tres años dentro de cada una de las celdas de 3x3 km².

Los análisis realizados han señalado una relación significativa entre la ocurrencia de incendios forestales causados por rayo y la altitud, la pendiente, la presencia de arbolado, la cantidad de precipitación de la tormenta y el estado hídrico del combustible muerto; confirmándose los resultados obtenidos por estudios realizados por otros autores (Díaz-Avalos et al., 2001; Rorig y Ferguson, 2002). En los modelos logísticos desarrollados se ha obtenido una precisión en la clasificación de las celdas con incendio en torno al 70% para cada una de las regiones. Para Aragón, Madrid y Valencia la variable que mejor explica la ocurrencia es el número de tormentas secas, sin embargo en Huelva sólo el porcentaje de superficie orientada al Sur resulta significativa. En este caso, debido a la diferente resolución espacial de la variable relacionada con la localización de las descargas de rayo incluida en la calibración del modelo.

Probabilidad de ignición asociada al estado hídrico de la vegetación

El contenido de humedad del combustible (FMC) es una de las variables más críticas para estimar la probabilidad de ignición o propagación del fuego, ya que la cantidad de agua en las plantas está inversamente relacionada con su potencial de combustión (Nelson, 2001). Siguiendo una práctica frecuente en la literatura de riesgo de incendios, para este proyecto hemos dividido la estimación del FMC en dos tipos, según se tratara de combustibles vivos o muertos.

El FMC de los combustibles muertos resulta algo más sencillo de estimar ya que están directamente asociados a las variaciones de las condiciones atmosféricas, principalmente temperatura, lluvia, viento y humedad relativa. Para este proyecto hemos aplicado un modelo empírico, basado en ajustes de regresión sobre medidas tomadas en el Parque Nacional de Cabañeros entre 1998 y 2003 sobre hojarasca y pasto senescente. Estas medidas de humedad tomadas en campo se correlacionaron con dos índices meteorológicos muy utilizados en la gestión de incendios forestales (FFMC y 10h) con el fin de verificar su aplicabilidad en un entorno mediterráneo. Ambos códigos de humedad ofrecieron resultados muy similares, siendo seleccionado para la estimación de la humedad del combustible muerto, el código 10h por su menor complejidad de cálculo. Teniendo en cuenta las dificultades para obtener observaciones

meteorológicas puntuales que sirvan de entrada en el cálculo del índice empírico, se optó por la utilización de predicciones meteorológicas procedentes del *European Center for Medium Range Weather Forecasting* (0,5° x 0,5°). Las variables meteorológicas que requiere la estimación del índice empírico (temperatura y humedad relativa) fueron facilitadas por la empresa Meteorológica S.A. que efectúa a partir de estas predicciones una interpolación espacial. Asimismo, el proceso de interpolación incluye como variable auxiliar la altitud. La salida del modelo de interpolación ofrece predicciones en una malla de 500 x 500 m. Finalmente, los valores de FMC en el combustible muerto fueron remuestreados a una resolución de 1000 m para poder ser integrado con el FMC del combustible vivo.

En cuanto a la estimación del FMC de los combustibles vivos, la experiencia existente en la literatura especializada es menor. Algunos trabajos sugieren emplear también variables meteorológicas, sin embargo existen factores como la capacidad de retención de humedad en el suelo y, sobre todo, la fisiología de la planta, que hacen que las mismas condiciones atmosféricas pueden suponer valores de FMC muy variados para distintas especies, por lo que conviene tenerlos en cuenta. Un problema añadido es el error que se genera al interpolar las variables meteorológicas en territorios que pueden ser relativamente distintos del punto donde se realizó la medida.

La alternativa tradicional a las estimaciones meteorológicas es la medida directa en campo, que resulta costosa y de difícil representatividad espacial.

De esta manera, se planteó en el proyecto el recurso a la teledetección espacial, como fuente de información idónea para esta aplicación al facilitar la resolución temporal y espacial necesaria para los requerimientos del sistema. Sobre nuestra experiencia previa con imágenes NOAA-AVHRR en anteriores proyectos (Chuviaco et al., 2004b), se planteó utilizar imágenes del sensor MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua, desde 1999 y 2001, respectivamente.

La variable objetivo es el FMC, medido como proporción de agua frente al peso seco de la muestra. Esta variable objetivo se ha muestreado en el Parque Nacional de Cabañeros, desde 1996 a la actualidad, si bien para este trabajo hemos utilizado la serie 2001 a 2005, pues es la que coincide con las imágenes MODIS. La información de campo se ha recolectado cada 16 u 8 días, sobre parcelas de pastizal y matorral, suficientemente homogéneas para poder relacionarse con los datos de la imagen.

Como variables de estimación se han empleado las siete primeras bandas de reflectividad del producto MOD09 (compuesto de 8 días a 500 m de resolución espacial derivado del sensor Terra-MODIS) (Vermeulen y Vermeulen, 1999), así como índices de vegetación derivados del mismo y el producto de área foliar MOD15, (compuesto de 8 días a 1 km. de resolución: Knyazikhin et al., 1999).

Se exploraron y compararon diferentes enfoques que emplean imágenes de satélite para calibrar dos modelos de estimación del FMC, (uno para pastizales y otro para matorrales), uno empírico y otro basado en modelos de transferencia radiativa. Se realizaron análisis de regresión lineal múltiple (RLM) entre los datos de FMC medidos en campo y la información derivada del sensor para cada parcela y fecha para el rango de valores encontradas en el Parque Nacional de Cabañeros.

La comparación de las estimaciones realizadas con los cuatro modelos calibrados con los dos enfoques mostró que, para pastizales, ambos realizan estimaciones bastante precisas, si bien el modelo basado en los datos simulados es menos operativo debido a que precisa como variables de estimación dos productos diferentes del sensor MODIS por fecha (MOD09 y MOD15). Para matorrales, el modelo derivado de los datos simulados estima FMC con menores residuales en los años secos (más críticos en lo que al riesgo de incendio se refiere). Sin embargo, en los años normales produce alta infra-estimación. Este modelo puede ser mejorado mediante la simulación de la reflectividad para un rango de valores más amplio (no restringido a Cabañeros) y otras técnicas de inversión basadas en minimizar la distancia entre espectros simulados y observados. Mientras se mejoran dichos modelos, las ecuaciones derivadas de los datos empíricos (1) y (2) serán puestas en marcha en esta campaña de incendios:

$$FMC_p = -129.12 + 503.51 \times NDVI + 52.55 \times FD_p \quad (1)$$

$$FMC_m = 10438 + 42757 \times VARI - 16367 \times GVMI + 8844 \times FD_m \quad (2)$$

donde NDVI, VARI, y GVMI son el índice de vegetación normalizado (Rouse et al., 1974), ajustado atmosféricamente (Gitelson et al., 2002) y global de contenido de humedad de la vegetación (Ceccato et al., 2002) respectivamente y FD es una función del día juliano para pastizal (p) y matorral (m) según si el año es seco o húmedo (García, 2007)

Probabilidad de propagación

La mayor parte de los modelos de propagación del fuego están diseñados para simular condiciones locales, no regionales. En nuestro caso, se pretendía estimar de alguna forma la variación espacial, en nuestras regiones de estudio, de la capacidad de propagar el fuego. Esto suponía considerar unas condiciones determinadas de viento, factor muy variable y difícil de modelar espacialmente, que sirvieran para modelar en el conjunto del paisaje el potencial de cada unidad de observación (celda de 1 km²) para desarrollar el fuego, asumiendo que pudiera iniciarse en cualquier celda vecina.

La modelización se hizo considerando la peor situación para la propagación del fuego, es decir que el fuego se propagara en la dirección de máxima pendiente y la velocidad del viento fuese la media de las máximas para los meses de verano. A parte de estas dos variables, los factores que más influyen en la propagación son el tipo de combustible y la humedad relativa del combustible vivo y muerto.

Las variables de interés que se modelaron fueron la longitud de llama y la velocidad de propagación. Para poder relacionarlas con las variables del medio, se generó una muestra con el programa Behave (Andrews y Chase, 1990 para los 13 tipos de combustible disponibles en este programa, pendientes entre el 0% y el 90 %, velocidades del viento a ras del suelo entre los 4 km/h y los 20 km/h, y las siguientes humedades relativas del combustible (Vélez, 2000, Martín Fernández et al., 2002).

El tamaño final de la muestra fue de 5600 datos. Con la muestra generada se obtuvieron los modelos de regresión múltiple de la velocidad de propagación en función de la pendiente y de la velocidad de viento para cada tipo de combustible. Los valores del coeficiente de regresión múltiple, R², variaron entre el 93% y 97.8%. La longitud de llama se modeló también en función de la velocidad de propagación, para cada tipo de combustible. Se seleccionó el modelo linealizable que mejor se ajustaba a las variables. En este caso el coeficiente de determinación ajustado varió entre el 92% para el tipo de combustible 8 y mayor del 99% para el resto de combustibles.

Para generar los mapas raster de velocidad de propagación y de longitud de llama, se desarrolló una macro en ArcGIS que aplicaba los modelos de regresión a los mapas de pendientes, de tipos de combustibles y de velocidad del viento en cada zona de estudio.

Integración del modelo

Conversión de las variables a una escala común de riesgo

El primer paso en la integración del modelo de probabilidad de ocurrencia fue encontrar una escala de riesgo común a las distintas variables que habíamos generado. Para evitar posible subjetividades en ese proceso de conversión, procuramos que todas ellas estuvieran medidas en una escala probabilística, haciendo su comparación más asequible.

En lo que se refiere al peligro de ignición tanto de ámbito humano como de rayos, la probabilidad se obtuvo de la regresión logística aplicada a la ocurrencia histórica del fuego. Para la conversión del FMC a probabilidad de ignición, empleamos el concepto de humedad de extinción (valor límite de humedad a partir del cual un combustible no arde) tanto del combustible vivo como muerto. Ese valor teóricamente debería suponer una probabilidad de ignición de 0, pero adoptando un criterio conservador, le asignamos un valor de 0.2. Desde ese valor al valor mínimo de FMC medido en campo para los 10 años de muestreo, se aplicó una función lineal negativa (a mayor humedad, menor probabilidad de ignición), entre los valores de 0,2 y 1. Finalmente, desde el valor de humedad de extinción hasta el máximo medido de FMC se aplicó un proceso similar, con márgenes entre 0,2 y 0 (Chuvienco et al., 2004a). Uno de los problemas en la integración de estos dos valores de humedad es la falta de datos para el FMC de los combustibles bajo arbolado, ya que las especies arbóreas no se consideraron en el modelo de estimación, en esta fase.

Finalmente, para convertir las variables calculadas en el peligro de propagación (velocidad de propagación y longitud de llama), se consideró la frecuencia de los valores de la velocidad de propagación y de la longitud de llama en Aragón, Valencia y Madrid. Ya que el riesgo cambia si el número de píxeles con longitudes de llama o velocidades altas es elevado o por el contrario sólo se produce en un número pequeño. Se ajustaron las curvas de frecuencia acumulada de los valores de velocidad de propagación y de longitud de llama. Por tanto el índice de riesgo varía entre 0 y 1. El valor asignado a cada punto del territorio es el valor máximo entre el valor del indicador de riesgo debido a la velocidad de propagación y el debido a la longitud de llama. Este indicador se probó en Huelva donde los resultados fueron satisfactorios.

Integración entre los índices de peligro

Para generar índices que integraran las distintas nociones del peligro de incendio que estamos considerando en este proyecto, se plantearon varias alternativas (Chuvieco et al., 2003): tabulación cruzada, ponderación jerárquica, evaluación multicriterio, índices cuantitativos, y técnicas de regresión.

En esta fase del proyecto, hemos optado por realizar una integración sucesiva, aplicando distintos criterios a cada par de variables, dependiendo de su significado temático y de la frecuencia de actualización de las variables de entrada. La integración entre el peligro causal asociado a rayos y a actividad humana se ha realizado a partir de un criterio probabilístico basado en los axiomas de Kolmogorov, según el cual la probabilidad de que ocurra un evento u otro (incendio de causa humana o de rayos) se define como:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B)$$

donde $P(A \cup B)$ es el índice integrado (probabilidad de ocurrencia debido al agente causal), $P(A)$ es la probabilidad de ocurrencia de incendios de causa humana, $P(B)$ es la probabilidad de ocurrencia de incendios por rayo, y el producto de las dos probabilidades indica la intersección entre ellas, asumiendo que se trata de dos es la probabilidad de que ocurran ambos eventos independientes.

Para la integración entre agente causal y estado hídrico del combustible, así como entre ignición y propagación, hemos seguido una filosofía extraída de las técnicas multicriterio, asumiendo que los valores más altos de probabilidad serían aquellos más separados de las condiciones idóneas (distancia al punto anti-ideal), definidas como aquellas con mayor humedad, mas baja causalidad y menor propagación. Cada factor se ha pesado de modo distinto según la frecuencia de actualización con 4 veces mas peso para el factor dinámico que el estático.

Desarrollo de un servidor cartográfico de riesgo de incendios

Desde el inicio del proyecto Firemap se consideró trascendental contar con el apoyo de los usuarios finales del índice de riesgo, tanto para el diseño y calibración del mismo, como para su validación. De cara a facilitar la comunicación con los usuarios, a veces distantes geográficamente de los lugares de desarrollo, generamos una herramienta en internet para el acceso a la información del proyecto, con una sección específica para gestionar información cartográfica (<http://www.geogra.uah.es:8080/cartofire/>

[index.php](#)). También se ha procurado estandarizar la documentación de las variables de entrada, de cara a que los datos generados pudieran integrarse fácilmente en bases de datos descentralizadas.

Discusión de resultados

En el presente trabajo se introducen las variables empleadas para generar un índice sintético del peligro de incendios. Sin entrar en detalles sobre los problemas de cada variable, nos parece de interés recalcar aquí el reto que supone obtener un índice integrado, ya que las opciones para combinar la información de partida son múltiples: falta de datos de partida (algunas variables no estaban disponibles ni siquiera a escalas medias), diferentes escalas de medida (cartográficas y temáticas), diferentes prioridades en el uso que puede hacerse de ese índice (planificación estratégica, frente a tareas de extinción, por ejemplo), presencia de índices estáticos y dinámicos, de variables físicas y humanas, por citar solo algunos aspectos problemáticos.

En cuanto a la búsqueda de una escala común de riesgo, el primer paso de la integración, nos parece que la solución adoptada (probabilidades) es bastante coherente. En cuanto al segundo aspecto, la ponderación de las distintas variables, se parte de una propuesta preliminar, que será mejorada a la vista de las sugerencias de los usuarios del proyecto. Por ejemplo, es importante que el índice no se sature al inicio de la campaña, lo que eliminaría su enfoque para la gestión de las alertas y la planificación de los medios de defensa, al ofrecer un valor constante a lo largo de la temporada.

En cualquier caso, también se plantea que los propios usuarios puedan incorporar su propia ponderación, en función de sus necesidades últimas, desarrollándose una interfase informática para esta tarea.

Agradecimientos

El proyecto Firemap se ha financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (CGL2004-060490C04-01/CLI) a través del programa nacional de medioambiente y clima. También agradecemos las sugerencias realizadas por los usuarios del proyecto: Protección Civil y DGMN de la Comunidad de Madrid, Servicio Forestal de Aragón, Valencia.

Referencias

Andrews, P. L. y C. H. Chase. 1990. The BEHAVE Fire Behavior Prediction System. The Compiler, Vol. 8:4-9.

- Bradshaw, L., J. Deeming, R. E. Burgan y J. Cohen. 1983. The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation. p. 44. USDA, Forest Service, Ogden, Utah.
- Ceccato, P., N. Gobron, S. Flasse, B. Pinty y S. Tarantola. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 82:188–197.
- Chuvieco, E., I. Aguado y A. Dimitrakopoulos. 2004a. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere*, Vol. 34 (11):2284-2293.
- Chuvieco, E., B. Allgöwer y F. J. Salas. 2003. Integration of physical and human factors in fire danger assessment. pp. 197-218 en E. Chuvieco, editor. *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Chuvieco, E., D. Cocero, D. Riaño, M. P. Martín, J. Martínez-Vega, J. de la Riva y F. Pérez. 2004b. Combining NDVI and Surface Temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 92:322–331.
- DGCN y M. d. M. Ambiente. 2006. Los incendios forestales en España. Publicación anual. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- Díaz-Avalos, C., D. L. Peterson, E. Alvarado, S. A. Ferguson y J. E. Besag. 2001. Space-time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 31:1579-1593.
- Dissing, D. y D. L. Verbyla. 2003. Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 33:770-782.
- García, M. 2007. Estimación y cartografía del contenido de humedad del combustible vivo a partir de imágenes NOAA/AVHRR. Departamento de Geografía, Alcalá de Henares.
- Gitelson, A., J. Y. Kaufman, R. Stark y D. Rundquist. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80:76-87.
- Tian, A. Lotsch, Y. Zhang, Y. Wang, J. T. Morisette, P. Votava, R. B. Myneni, R. R. Nemani y S. W. Running. 1999. MODIS Leaf Area Index (LAI) And Fraction Of Photosynthetically Active Radiation Absorbed By Vegetation (FPAR) Product (MOD15). Algorithm Theoretical Basis Document. <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>, Vol.
- Latham, D. y E. Williams. 2001. Lightning and forest fires. pp. 375-418 en E. A. Johnson, and K. Miyanishi, editores. *Forest fires. Behavior and ecological aspects*. Academic Press, San Diego, California.
- Martín Fernández, S., E. Martínez Falero y J. M. Pérez. 2002. Optimization of resources management of in wildfire combat. *Environmental Management*, Vol. 30:352-336.
- Nelson, R. M. 2001. Water Relations of Forest Fuels. pp. 79-149 en E. A. Johnson, and K. Miyanishi, editores. *Forest fires : behavior and ecological effects*. Academic Press, San Diego, Calif.
- Podur. 2003. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976–1998. *Ecological Modelling*, Vol. 164:1-20.
- Rorig, M. L. y S. A. Ferguson. 2002. The 2000 Fire Season: Lightning-Caused Fires. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 41:786-791.
- Rouse, J. W., R. W. Haas, J. A. Schell, D. H. Deering y J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Greenbelt, MD. USA.
- Van Wagner, C. E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. p. 48. Canadian Forest Service, Ottawa.
- Vélez, R. 2000. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw-Hill. Interamericana de España S.A.U., Madrid.
- Vermote, E. F. y A. Vermeulen. 1999. Atmospheric correction algorithm: Spectral Reflectances (MOD09). p. 109 pp. NASA.
- Vílar, L. 2006. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. . p. CdRom XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Granada.
- Wotton, B. M. y D. L. Martell. 2005. A lightning fire occurrence model for Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 35:1389-1401.