

Aplicación Operativa de un Modelo Diario de Predicción de Ocurrencia de Incendios Forestales por Causas Humanas en Cataluña¹

Cristina Vega-García,² Christian Ortiz Ruiz,² Raquel Canet Castellà,³ Inés Sánchez Bosch,² Daniel Queralt Creus²

Resumen

En 2002 se completó un estudio orientado a definir y analizar espacial y temporalmente las condiciones meteorológicas, topográficas, sociodemográficas y de vegetación que pudieran estar relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales causados por personas en Cataluña, España, mediante su integración en un SIG.

Como resultado del análisis se desarrollaron varios modelos de predicción diaria de incendios causados por personas, con una fiabilidad suficiente para ser utilizados operativamente en la prevención y extinción de incendios. Todos predecían ocurrencias en modo binario (sí/no) en las cuadrículas de 10x10 km² que son habitualmente utilizadas por diversas administraciones españolas con competencias en la lucha contra incendios. El mejor modelo, un modelo de base estadística por regresión logística (logit), se evaluó durante el verano de 2003 de forma operativa, después de automatizar el proceso para generar un mapa de predicciones diarias antes de las 8.00 de la mañana.

Esta comunicación expone el proceso de modelización, la validación de los modelos y las ventajas e inconvenientes de su aplicación diaria a la predicción de incendios.

Introducción

El propósito de este estudio era definir y analizar espacial y temporalmente las condiciones meteorológicas, topográficas, sociodemográficas y de vegetación que pudieran estar relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales causados por personas en Cataluña, España, mediante su integración en un SIG.

Las variables de análisis generadas junto a los datos históricos de incendios servirían para la construcción y evaluación de un modelo diario de predicción de

¹ Una versión más corta de este trabajo se presentó en el segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: una visión global, 19–22 Abril, 2004, Córdoba, España.

² Dept. d'Enginyeria Agroforestal, ETS d'Enginyeria Agraria, Universitat de Lleida, Av. Alcalde Rovira Roure, 191 25198 Lleida, Spain email: cvega@eagrof.udl.es.

³ Secció d'Incendis Forestals. Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya. Ctra. de la Universitat Autònoma s/n, 08290 Cerdanyola del Vallès, Barcelona, Spain.

incendios causados por personas, que sería testado operativamente durante la campaña inmediatamente posterior. El sistema debería predecir número de incendios diarios en las cuadrículas de 10 km x10 km que son habitualmente utilizadas para la planificación de la prevención y extinción de incendios por diversas administraciones españolas como el Área de Defensa contra Incendios Forestales de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (DGCN), Ministerio de Medio Ambiente o la Secció d'Incendis Forestals de la Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil (DGESC) de la Generalitat de Catalunya.

Los objetivos que se plantearon para su implantación en fase de pruebas incluían evaluar la dificultad técnica de su puesta en funcionamiento, las fuentes de información necesarias, las necesidades de personal y su cualificación técnica y valorar su utilidad práctica en la labor diaria del cuerpo de bomberos de la Generalitat de Catalunya.

Métodos

El área de estudio quedó fijada en la superficie de la Comunidad de Catalunya que disponía de cartografía de modelos de combustible (según Vélez Muñoz, 2000) al inicio del proyecto, es decir, las provincias de Barcelona y Gerona, y parte de las provincias de Tarragona y Lérida (*fig. 1*).

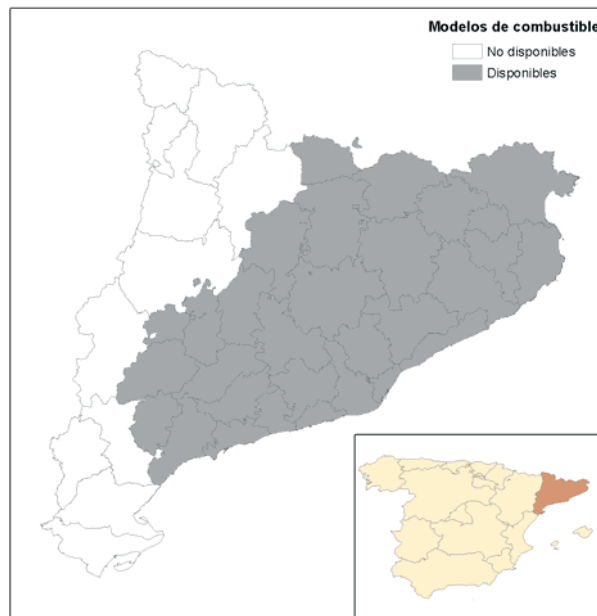


Figura 1—Comarcas catalanas con modelos de combustible disponibles para el proyecto.

Las capas disponibles en formato SIG para el análisis procedían del Instituto Cartográfico de Catalunya y del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat catalana, incluyendo redes viarias, ferrocarriles, líneas eléctricas, núcleos urbanos, urbanizaciones, espacios protegidos a escala 1:50.000, y un modelo digital del terreno con resolución de 45 m, todas digitalizadas en 1994. A partir de todas estas fuentes cartográficas se generaron capas nuevas de tipo ráster que se relacionaron con las celdas de predicción de 10 km x 10 km correspondientes (348). Las coberturas de

nueva creación generadas permitieron definir las variables geográficas del análisis, variables que se recogen en la *tabla 1*.

Tabla 1—*Variables geográficas de análisis.*

| Denominación | Descripción | Unidades |
|---|--|---|
| Elevación | Media de elevación de la cuadrícula a partir de MDT de 50 metros | Metros |
| Clase-O1,O2,O3,O4,O5 | Orientaciones presentes en la cuadrícula Llano Norte Este Sur Oeste | porcentaje de superficie ocupada por cada clase. En la fase de análisis se ha considerado la clase 1 (llano) como sur (clase 4) |
| Clase-P1,P2,P3,P4 | Superficie ocupada según las siguientes clases de pendientes 0pct-5pct 5pct-15pct 15pct-30pct >30pct | porcentaje de superficie ocupada por cada clase |
| Vias1 | Distancia media por cuadrícula a autopistas y carreteras nacionales | Metros |
| Vias2 | Distancia media por cuadrícula a carreteras asfaltadas (sin considerar autopistas y carreteras nacionales) | Metros |
| Vias3 | Distancia media por cuadrícula a carreteras no asfaltadas, considerando como tales las pistas y los caminos | Metros |
| Ferroc | Distancia media por cuadrícula a líneas férreas | Metros |
| Línelec | Distancia media por cuadrícula a líneas eléctricas | Metros |
| Urban | Distancia media por cuadrícula a urbanizaciones | Metros |
| Núcleos | Distancia media por cuadrícula a núcleos urbanos | Metros |
| P-PEIN | Superficie ocupada por área PEIN-protegida | porcentaje de superficie ocupada |
| Mod2,mod3,mod4,mod5,mod6,mod7,mod8,mod9,mod10 | Superficie ocupada por cada modelo de combustible | porcentaje de superficie ocupada por cada modelo |

Para la generación de variables meteorológicas diarias se utilizaron 84 estaciones automáticas de las gestionadas por el Servicio de Meteorología de Cataluña y la Red Agrometeorológica de Cataluña, en un periodo de 5 años, 1996-2000, no muy alejado de la fecha de digitalización de las coberturas ráster. Las variables diarias consideradas incluían parámetros meteorológicos habituales como humedad relativa, precipitación, temperatura, viento, pero también algunos índices de

peligro como la probabilidad de ignición de la DGCN⁴, el Fire Weather Index canadiense (Van Wagner 1987), el índice Keetch-Byram Drought Index (Keetch y Byram, 1988), o la intensidad de la radiación solar potencial de Volk (1997), en cada celda de 10 km x 10 km. El cálculo e interpolación espacial de todas estas variables sólo se realizó para los días de la campaña de verano de cada año en el periodo, la cual, en España, va del 15 de mayo al 15 de septiembre. Estas variables se presentan en la *tabla 2*.

Tabla 2—*Variables meteorológicas de análisis.*

| Denominación | Descripción | Unidades |
|--------------|--|--------------------------|
| Intensidad | Intensidad de la radiación solar potencial - Volk | mm |
| P24 | Precipitación en 24 h, diaria | Décimas de mm |
| Tmedia | Temperatura media diaria | Grados centígrados |
| HRmedia | Humedad relativa media diaria | Porcentaje, 0-100pct |
| VVmedia | Velocidad del viento media del día | m/s |
| DVmedia | Dirección media del viento | Grados |
| Tmax | Temperatura máxima diaria | Grados centígrados |
| HRmin | Humedad relativa mínima del día | Porcentaje, 0-100pct |
| VVmax | Velocidad máxima del viento diaria | m/s |
| MV | Magnitud del viento | m/s |
| DS | Desviación estándar del viento | Grados |
| RadG | Radiación solar efectiva en la estación | mj/m ² |
| FWI | Fire Weather Index | Escala abierta, 0 a +100 |
| KBDI | Keetch-Byram Drought Index | Escala 0-800 |
| HCFM | Humedad del Combustible Fino muerto, Probabilidad de Ignición de DGCN | Porcentaje, 0-100pct |

La base histórica de datos de incendios en 1996-2000 hubo de rasterizarse y relacionarse a la cuadrícula de 10 km x 10 km, que definía las unidades de predicción. De un total de 3.310 incendios disponibles con localizaciones y causas contrastadas, 1.600 fueron causados por personas en las campañas de verano de 1996-2000. Sin embargo, la eliminación de las observaciones incompletas después del cruce de todas las bases de datos, geográficas y meteorológicas, asociadas a las celdas de predicción, produjo una base de datos de análisis de 36.190 observaciones diarias en 348 cuadrículas durante el periodo de 5 años, con 43 campos (variables) asociados a cada observación, de las cuales 35.896 eran sin incendios, y sólo 294 observaciones habían sufrido ocurrencias.

El análisis del escaso número de ocurrencias en las celdas indicaba que no sería posible desarrollar modelos que predijeran número de ocurrencias en cada celda de predicción y día por falta de datos, como se pretendía inicialmente. Sólo había 10 casos de 2 incendios/día.cuadrícula y 2 casos de 4 incendios/día.cuadrícula en la base de 36.190 datos. Ello llevó a descartar incluso modelos estadísticos apropiados para sucesos raros como la distribución de Poisson e indujo a considerar modelos de respuesta binaria, como el modelo logit, ya utilizado con anterioridad en la predicción de incendios (Martell y otros 1987, Chou y otros 1993, Loftsgaarden y Andrews 1992, Vega-García y otros 1995). La evaluación de modelos logit para la

⁴ Según apuntes del Curso Básico de Defensa contra Incendios Forestales organizado por el Colegio de Ingenieros de Montes de España.

predicción de incendios (sí / no en una determinada celda y día) en nuestro ámbito mediterráneo era uno de los objetivos particulares del proyecto.

El desarrollo de modelos logit se realizó según las recomendaciones de Hosmer y Lemeshow (1989) y Cox y Snell (1989), después de generar una base de datos más reducida y compensada en cuanto a la variable dependiente mediante la extracción aleatoria de 294 observaciones sin incendios, que se unieron a las 294 con incendios, de modo similar al estudio de Vega-García y otros (1995). Una de las ventajas del modelo logit es que pueden equilibrarse las proporciones de la variable dependiente (incendio sí / no) en las observaciones utilizadas para construir modelos. Así se logran modelos que predicen con una misma eficacia ocurrencias y no ocurrencias, y que pueden aplicarse después a las condiciones reales (en que las no ocurrencias son mucho más frecuentes) mediante una simple transformación en el término independiente (Maddala 1988, Prentice 1986). Las 598 observaciones se mezclaron a su vez aleatoriamente y se separaron 117 (20 por ciento) para validar los modelos que se obtuvieran.

Distintos modelos de regresión logarítmica se calcularon con el programa SAS v8.2 (SAS Institute Inc. 1999) mediante procedimientos automáticos (stepwise, backward elimination, forward selection), pero también se evaluaron modelos ajustados a subconjuntos de variables no correlacionadas para evitar introducir problemas de multicolinealidad en los modelos. En estos análisis se puso especial interés en valorar la aportación de los diferentes índices de peligro a la predicción, como herramienta de comparación entre éstos. También se procuró encontrar modelos poco complejos tanto en número de variables como en facilidad de cálculo de las variables, es decir, modelos fáciles de instrumentar para su aplicación operativa.

La selección del mejor modelo no se hizo en base a un único criterio, sino que se analizaron todos los criterios posibles de bondad de ajuste, capacidad predictiva, coeficientes y residuales.

La validación del modelo seleccionado para la prueba en condiciones reales durante el verano de 2003 se realizó con los 117 datos no utilizados en la construcción del modelo, y segregados con anterioridad de la base de datos reducida, pero también se evaluó en condiciones reales de proporcionalidad, las correspondientes a la base completa de 36.190 datos.

Para la implantación operativa del modelo se automatizó su cálculo diario mediante AML, lenguaje de programación del programa ArcInfo (ESRI 2002), encargado de realizar las operaciones necesarias de interpolación y álgebra de mapas y producir un fichero JPG disponible en una Intranet antes de las 8 h de cada día durante el periodo del 1 de agosto al 15 de septiembre de 2003. Se solicitó la evaluación del mapa de probabilidad de ocurrencia diario por parte de personal cualificado, que debía emitir valoraciones subjetivas diariamente durante este periodo, mostrando acuerdo o no con las predicciones. Posteriormente se obtuvieron los datos estadísticos de incendios ocurridos durante el periodo y se comprobó estadísticamente la capacidad predictiva del modelo mediante una tabla de clasificación análoga a la utilizada para su validación.

Resultados

Los análisis estadísticos de las 43 variables mostraron, lógicamente, altas correlaciones entre los índices de peligro y sus variables de cálculo, pero también entre diversas variables geográficas.

Los valores medios y máximos de las variables meteorológicas estaban altamente correlacionados, como era de esperar (>85 por ciento). Humedad relativa y temperatura también aunque negativamente (alrededor del valor -60 por ciento). La variable RadG mostró correlación positiva con el índice HCFM (45 por ciento), la Intensidad (30 por ciento) y Tmax (35 por ciento), y negativa con P24 (-40 por ciento), HRmin (-44 por ciento) y HRmedia (-41 por ciento).

El índice FWI canadiense mostró escasa relación lineal con el resto de variables, positiva alrededor del 20 por ciento con HCFM, KBDI, Tmax, y negativa con HRmin también en torno al 20 por ciento. Hay que tener en cuenta que las exigencias de cálculo de esta variable sumadas a la escasa continuidad de los datos meteorológicos de estaciones automáticas produjeron numerosos ceros en la base de datos.

El índice KBDI presentaba correlaciones positivas con la Tmedia y Tmax (59 por ciento y 57 por ciento), negativas con HRmedia y HRmin (-30 por ciento y -29 por ciento). Las correlaciones con otros índices eran bajas, 20 y 23 por ciento respectivamente para FWI y HCFM. Estos datos eran coherentes con su formulación en origen como índice de peligro derivado del estado de la materia orgánica del suelo, no del combustible ligero muerto como el índice de la DGCN (HCFM). El KBDI se define como un número que representa el efecto neto de la evapotranspiración y precipitación en la producción de una deficiencia acumulada de humedad en la materia orgánica profunda y horizontes superiores de un suelo.

El índice de peligro de la DGCN, HCFM, mostró una elevada asociación negativa con HRmin (-91 por ciento) y HRmedia (-81 por ciento), y positiva con la temperatura (Tmax, 60 por ciento, Tmedia 37 por ciento), que parecen indicar la mejor, o más rápida, respuesta de este índice a las condiciones diarias más extremas, como corresponde a la respuesta del combustible ligero muerto. Al tener en cuenta el grado de exposición de los combustibles y cobertura nubosa, aparecen correlaciones positivas con la Intensidad de la radiación solar potencial (24 por ciento) y RadG (45 por ciento).

Respecto a las variables geográficas, las clases de pendiente mostraban claramente los efectos de la elevación, estando las clases menores negativamente correlacionadas con ésta (-46 por ciento), y las clases mayores positivamente (68 por ciento).

Urbanizaciones, líneas eléctricas, ferrocarriles y vías de comunicación, que suelen concentrarse en determinadas localizaciones del terreno como los fondos de valle, también mostraban correlaciones positivas entre sí. El porcentaje de área protegida en los espacios PEIN mostraba correlaciones positivas con la elevación (39 por ciento) y las altas pendientes (77 por ciento) y con la distancia a núcleos habitados (47 por ciento), como corresponde a la realidad en el territorio. En cuanto a modelos de combustible, las correlaciones sugerían una relativa independencia respecto al resto de variables y entre sí. Sólo son destacables las correlaciones entre el modelo 2 de pastos y la elevación (62 por ciento), altas pendientes (54 por ciento) y PEIN (35 por ciento), y las del modelo 8 de bosques con altas pendientes (58 por ciento), PEIN (56 por ciento) y elevación (56 por ciento). Ambos modelos están

correlacionados entre sí en un 53 por ciento. La mayoría de los modelos de combustibles presentan correlaciones ligeramente negativas con las bajas pendientes y ligeramente positivas con las altas, como corresponde al hecho de que la vegetación en el área de estudio ha sido relegada a las peores localizaciones por otros usos más productivos del territorio.

La construcción de modelos por procedimientos automáticos y manuales condujo a varios modelos con buena capacidad predictiva.

El mejor modelo logit seleccionado por procedimientos automáticos incluía las variables Elevación, porcentaje de superficie con Pendiente entre 0-5 por ciento, porcentaje de superficie con Orientación a Este, Intensidad de la Radiación, RadG, FWI y KBDI. Aunque el porcentaje global que predecía correctamente era del 74.7 por ciento, no se consideró un buen modelo por varias razones. El signo negativo de la variable FWI no se ajustaba a lo que sería de esperar de acuerdo a su sentido físico, puesto que su valor crece con el peligro de incendios. Además, las variables seleccionadas exigirían cálculos diarios relativamente complicados y continuidad en la serie meteorológica, que no podía garantizarse.

La construcción de modelos relacionados con los índices de peligro mostró una capacidad predictiva del Índice de Probabilidad de Ignición de la DGCN, HCFM, aparentemente superior a la del KBDI y FWI. Modelos dependientes exclusivamente de estos índices (más una constante) predecían correctamente un 61.1 por ciento de las observaciones para HCFM, 59.7 por ciento para KBDI y sólo 50.5 por ciento para FWI. La utilización del índice HCFM con Elevación permitía predecir correctamente un 67.7 por ciento de las observaciones. Añadir distancia a líneas eléctricas (línelec) y velocidad del viento (V_{media}) mejoraba el modelo hasta el 68.6 por ciento.

Los subconjuntos poco correlacionados seleccionados manualmente llevaron a la determinación de dos modelos interesantes. Un modelo únicamente compuesto por la T_{max} y elevación media de la cuadrícula era capaz de predecir correctamente un 70.5 por ciento de las observaciones. La inclusión de modelos de combustible de matorral (modelos 4, 5 y 6) elevaba este valor a 73 por ciento, aunque ello suponía introducir 3 variables de posible difícil actualización en un entorno operativo.

La consideración de los estadísticos (significativos), su robustez y escasez de datos de entrada y la previsible actualización de mapas forestales convertibles a combustibles llevó a considerar este último modelo como el mejor. Su formulación, estadísticos y tabla de clasificación presentan en la *tabla 3*. La comprobación con datos no utilizados en la construcción del modelo resultó en que también predecía correctamente un 73.5 por ciento de las observaciones de validación.

Tabla 3—Formulación y tabla de clasificación del mejor modelo de predicción de incendios por causas humanas.

$P(Y=1) = \text{Exp}(Z_i) / (1 + \text{Exp}(Z_i))$, donde
 $P(Y=1)$ es la probabilidad de ocurrencia de al menos un incendio en una celda y día
 $Z_i = 0,1294 * TMAX + 0,0577 * MOD4 + 0,0136 * MOD5 + 0,0162 * MOD6 - 0,0032 * ELEVINT - 2,9845$

| Association of Predicted Probabilities and Observed Responses | | | | | | | | | | Analysis of Maximum Likelihood Estimates | | | | | |
|---|-------|-----------|-------|-------------|---------|--------|--------|---------------|-------|--|-------|------------|------------|------------|------------|
| Percent Concordant | | 79.3 | | Somers' D | | 0.588 | | Standard Wald | | | | | | | |
| Percent Discordant | | 20.5 | | Gamma | | 0.589 | | Parameter | DF | Estimate | Error | Chi-Square | Pr > ChiSq | | |
| Percent Tied | | 0.2 | | Tau-a | | 0.294 | | | | | | | | | |
| Pairs | | 55448 | | c | | 0.794 | | | | | | | | | |
| Classification Table | | | | | | | | | | | | | | | |
| Correct | | Incorrect | | Percentages | | | | | | | | | | | |
| Prob | Non- | Non- | Event | | Sensi- | | Speci- | | False | | | | | | |
| Level | Event | Event | Event | Event | Correct | tivity | ficity | POS | NEG | Intercept | DF | Estimate | Error | Chi-Square | Pr > ChiSq |
| 0.450 | 192 | 143 | 96 | 40 | 71.1 | 82.8 | 59.8 | 33.3 | 21.9 | ELEVINT | 1 | -0.00320 | 0.000618 | 26.781 | <.0001 |
| 0.500 | 184 | 160 | 79 | 48 | 73.0 | 79.3 | 66.9 | 30.0 | 23.1 | TMAX | 1 | 0.1294 | 0.0255 | 25.721 | <.0001 |
| 0.550 | 164 | 175 | 64 | 68 | 72.0 | 70.7 | 73.2 | 28.1 | 28.0 | MOD4 | 1 | 0.0577 | 0.0151 | 14.638 | 0.0001 |
| | | | | | | | | | | MOD5 | 1 | 0.0136 | 0.0160 | 7.233 | 0.0395 |
| | | | | | | | | | | MOD6 | 1 | 0.0162 | 0.0129 | 15.837 | 0.0208 |

La aplicación de este modelo a datos de validación con proporciones reales de los años 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000, es decir a todos los datos disponibles, resultaron en una precisión global de 70.3 por ciento, 72.3 por ciento, 62.2 por ciento, 67.6 por ciento y 77.5 por ciento respectivamente, aunque la predicción de incendios fue correcta en esos años en un 80.8 por ciento, 81.0 por ciento, 72.3 por ciento, 83.3 por ciento y 33.3 por ciento de las observaciones. Hay que tener en cuenta que el año 2000 los datos eran muy escasos y fragmentarios como consecuencia de problemas en la red de estaciones automáticas, constanding sólo de 1.164 observaciones, de las que 3 eran incendios.

Una vez seleccionado este modelo, se ensayó su aplicación diaria en la DGESC de la Generalitat de Cataluña, en cuya sede se desarrollaron los programas necesarios para el cálculo automático diario de la cartografía de probabilidad de ocurrencia de incendios y su publicación en su intranet corporativa.

Técnicamente, y dado que el modelo elegido dependía de pocas variables, sólo era necesario utilizar los mapas digitales de: a) cuadrícula 10 km x 10 km, b) elevaciones y c) combustibles⁵, ya disponibles (fig. 2, fig. 3 y fig. 4). La principal dificultad procedía de la necesidad de obtener diariamente un mapa de temperaturas máximas (Tmax) previstas en el territorio para combinar con los anteriores mediante el modelo logit y generar un mapa de valores de probabilidad entre 0 y 1, traducible a una cartografía de zonas donde probablemente no haya incendio hoy (p<0.5), y zonas donde probablemente lo haya (p> 0.5). Evidentemente la fiabilidad de la predicción para el día siguiente siempre dependería de la precisión con que se pudiera predecir la variable Tmax.

⁵ Cabe destacar que en el momento de la redacción del presente documento (tres años después de la construcción del modelo) ya estaban disponibles los mapas de combustibles para toda Cataluña, como se refleja en la Fig. 4.

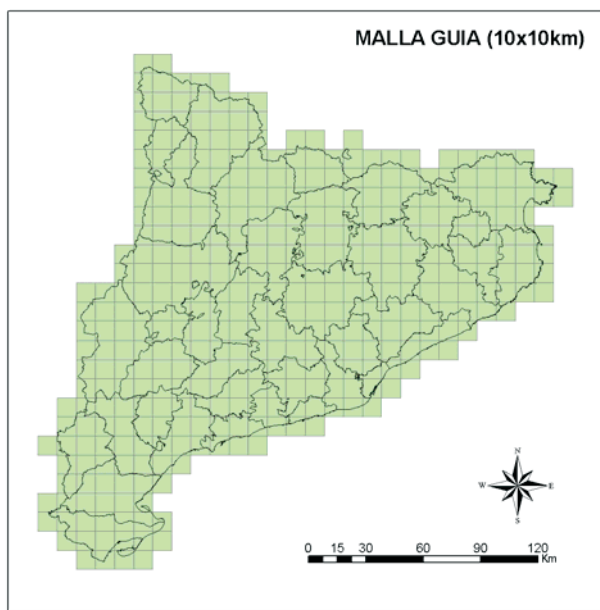


Figura 2—Malla regular de 10x10km usada de referencia para el cálculo de la probabilidad de ignición de incendios por causas humanas, con los límites de las comarcas catalanas.

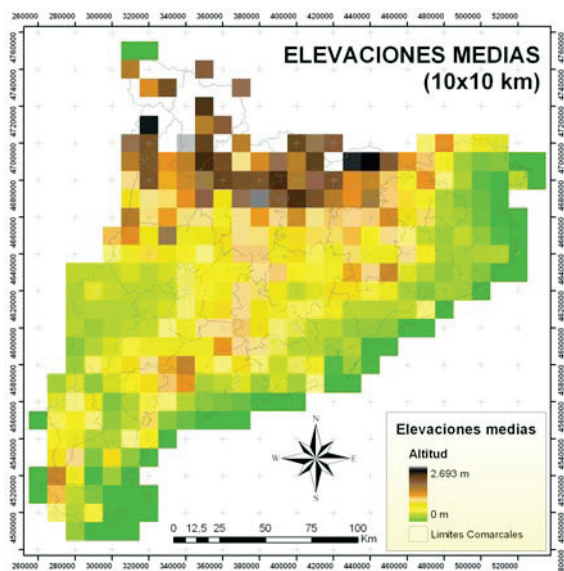


Figura 3—Mapa de elevaciones medias, en cada celda de la malla guía de 10x10 km, usado para el cálculo de la probabilidad de ignición.

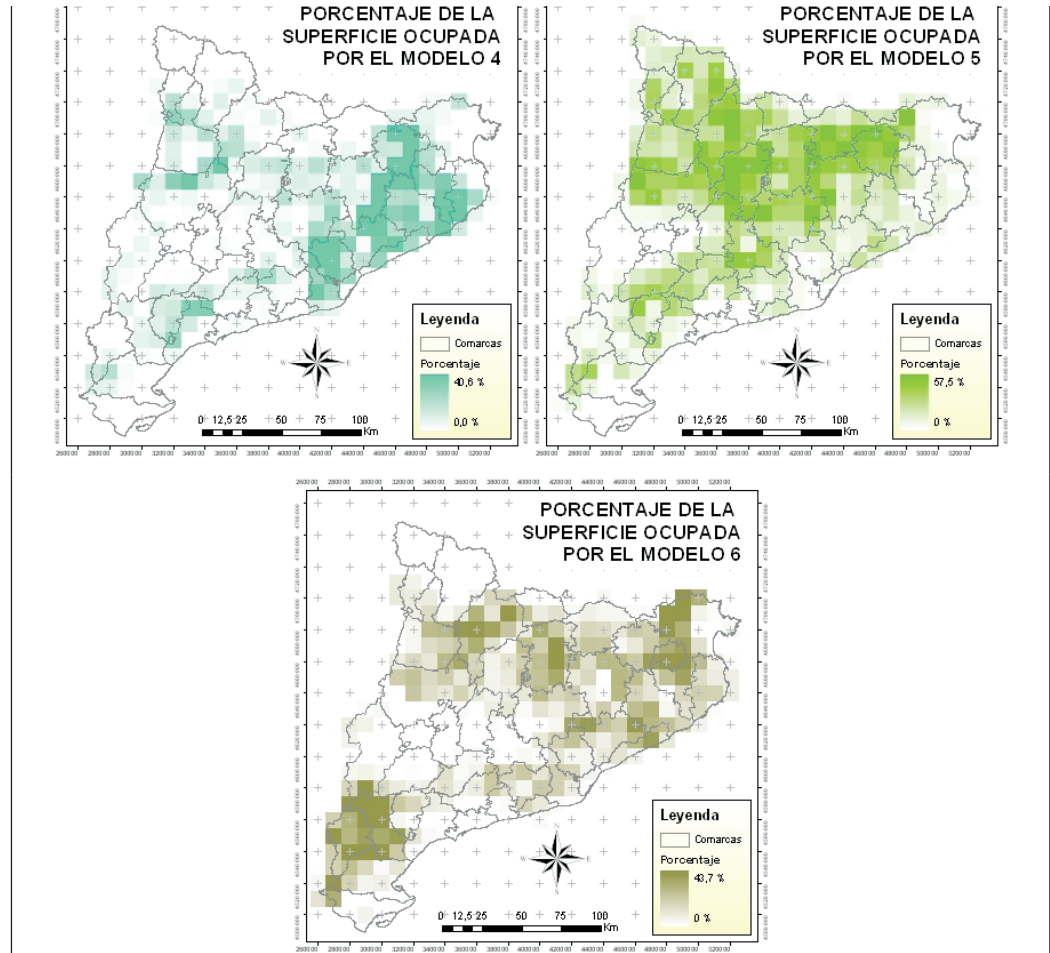


Figura 4—Mapas de porcentajes de superficie ocupada por los modelos de combustibles 4, 5 y 6 usados para el cálculo de la probabilidad de ignición.

Los datos de Tmax previstas se estimaron con el modelo MASS (*Mesoscale Atmospheric Simulation System*) calculado en la Universitat de Barcelona, y asumiendo como Tmax la temperatura prevista por este modelo para las 12h UTC. El resultado de dicho cálculo, una malla regular de puntos separados entre sí 15 km y con el correspondiente valor de Tmax prevista, se interpoló diariamente mediante el comando Spline del programa ArcInfo (ESRI 2002) para crear una superficie continua en el espacio de valores de temperaturas previstas (*fig. 5a* y *fig. 5b*).

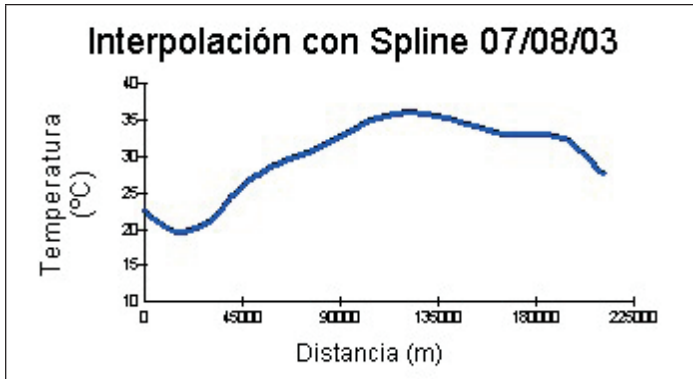


Figura 5a—Gráfica que representa la tendencia de la temperatura creada por el Spline según la línea observada en la *Fig. 5b*.

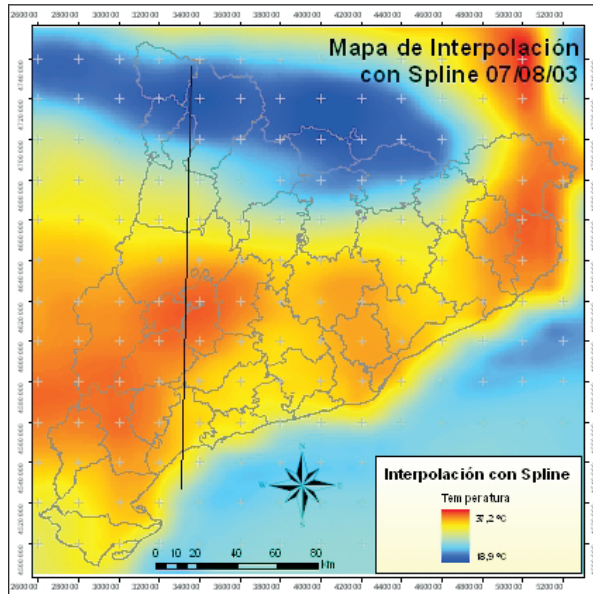


Figura 5b—Mapa resultante de aplicar la interpolación con Spline de ArcInfo (ESRI 2002).

El cálculo automático del mapa de probabilidad de ignición en ArcInfo (ESRI 2002) y su publicación en la intranet corporativa se resolvió en apenas unos días (*fig. 6*). Sin embargo, la colaboración solicitada para valorar si el modelo tenía utilidad práctica para el personal técnico implicado en la planificación de la extinción de incendios forestales sufrió un retraso considerable. El motivo principal de ese retraso fue la burocracia, ya que los tres técnicos evaluadores pertenecían a un departamento de la DGESC diferente al que automatizó el cálculo del modelo.

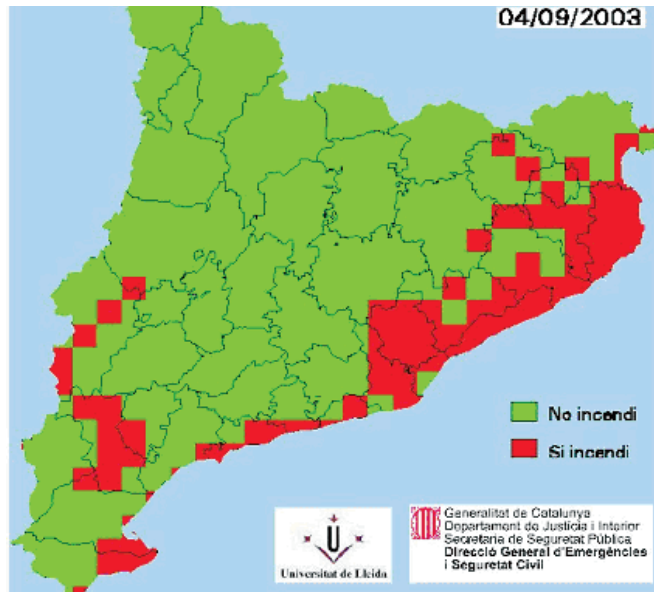


Figura 6—Ejemplo del mapa publicado diariamente en la Intranet de la DGESC para su consulta.

La valoración debía consistir en la consulta diaria, a primera hora de la mañana, del resultado ofrecido por el modelo y en su contraste con la percepción del riesgo para el día en cuestión que los técnicos evaluadores se habían formado “a priori” en base a su propia experiencia operativa. De los informes recibidos de los técnicos evaluadores se desprende que no se expuso con suficiente claridad el tipo de evaluación solicitada, ya que dichos técnicos coinciden en remarcar que sí parece existir una estrecha correlación entre la predicción del modelo y el número de salidas realizadas durante el mismo período de tiempo por el cuerpo de bomberos de la Generalitat de Catalunya a causa de incendios de vegetación. Pero, por el contrario, no hacen ninguna referencia a la correlación entre el modelo y sus propias expectativas personales en relación al riesgo de ignición.

La comprobación del comportamiento del modelo, tres años después del periodo de obtención de los datos para la construcción del modelo, arrojó los resultados de las *tablas 4 y 5*. Lo primero que cabe destacar es el hecho de que el número de igniciones totales sucedidas reflejados en ambas tablas no coincide (212 en la tabla para predicción de temperaturas contra 200 en la tabla de temperaturas máximas reales). Ello es debido a fallos en las estaciones meteorológicas que impidieron obtener los valores de T_{max} y, por lo tanto, de probabilidad de ignición para algunos de los incendios. El fichero de predicción de las temperaturas máximas, en cambio, se obtuvo con regularidad durante todo el período de prueba.

Por otro lado, y como era lógico esperar, la efectividad del modelo resultó mejor usando las temperaturas reales, con un 77,5 por ciento de aciertos sobre las igniciones sucedidas, que al usar la predicción de temperaturas, donde el porcentaje de aciertos, aunque mantuvo niveles muy aceptables, disminuyó hasta el 70,7 por ciento. Se prevé disminuir esta diferencia en la efectividad analizando fuentes alternativas para la predicción de temperaturas máximas y otros métodos de interpolación de las mismas.

Tabla 4—Comparación del número de igniciones predichas por el modelo, calculado con las predicciones de temperaturas máximas del modelo MASS, y las igniciones sucedidas realmente en el mismo intervalo de tiempo.

| Predicción \ Igniciones | Sí | No | Suma |
|-------------------------|-----|--------|--------|
| | Sí | 150 | 5.958 |
| No | 62 | 8.446 | 8.508 |
| Suma | 212 | 14.404 | 14.616 |

Tabla 5—Comparación del número de igniciones predichas por el modelo, calculado con las temperaturas reales, y las igniciones sucedidas realmente en el mismo intervalo de tiempo.

| Predicción \ Igniciones | Sí | No | Suma |
|-------------------------|-----|--------|--------|
| | Sí | 155 | 6.414 |
| No | 45 | 6.842 | 6.887 |
| Suma | 200 | 13.256 | 13.456 |

El dato más negativo resultó ser el elevado número de falsas alarmas que ofreció el modelo, es decir, las igniciones predichas que no llegaron a suceder en la realidad. En este caso el porcentaje fue prácticamente el mismo independientemente de los valores de temperatura usados. Se espera, no obstante, poder reducir significativamente este porcentaje con pequeños reajustes a realizar en sucesivas campañas forestales.

Discusión e implicaciones para la gestión

En este trabajo se han hecho evidentes los problemas relacionados con la falta de datos de origen, tanto geográficos como meteorológicos, mencionados en tantos trabajos de ocurrencia de incendios, ya que partiendo de 1.600 incendios se terminó con 294 observaciones utilizables para construir modelos de predicción. Esta falta de datos se hizo notar, no sólo al construir el modelo, sino también al evaluar su funcionamiento tras el verano del 2003, cuando la escasez de datos meteorológicos obligó a eliminar del análisis un 5,6 por ciento de las igniciones sucedidas.

Durante la construcción del modelo, variables relacionadas con la topografía, existencia de zonas protegidas, combustibles, líneas eléctricas, urbanizaciones, temperatura máxima diaria, radiación solar, e índices de peligro aparecieron asociadas en distinto grado a la ocurrencia de incendios en el área de estudio.

La aplicación de técnicas de regresión logarítmica a la predicción de incendios en las comarcas catalanas con mapas de modelos de combustibles permite predecir correctamente la ocurrencia de al menos un incendio en cuadrículas de 10 km x 10 km diariamente con probabilidades de, como mínimo, el 70 por ciento.

Los resultados sugieren también que las falsas alarmas pueden ser un problema en la utilización operativa de este modelo, si no se explica adecuadamente a los usuarios el modo correcto de interpretar las predicciones.

En relación a esta interpretación, la clasificación de la probabilidad en un mapa de sólo dos clases (sí incendio / no incendio) reduce la información disponible sobre el riesgo en el territorio, siendo aconsejable la publicación de un mapa con mayor número de clases de probabilidad, preferentemente diez.

Tras la implantación de este modelo estadístico en la DGESC durante el verano del 2003, se confirma su utilidad en entorno mediterráneo, aunque hay lugar para su mejora mediante el análisis de diferentes métodos de interpolación de las variables meteorológicas y de fuentes alternativas para la obtención de las mismas.

Bibliografía

- Chow, Y.H., R.A. Minnich y R.A. Chase. 1993. **Mapping Probability of Fire Occurrence in San Jacinto Mountains, California, USA**. Environmental Management 17(1): 129-140.
- Cox, D.R. y E.J. Snell. 1989. **Analysis of binary data**. Second edition. Chapman & Hall, New York, New York, USA.
- ESRI. **ArcInfo** [Programa informático]. 2002. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc. Disponible en: 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA.
- Hosmer, D.W.Jr. y S. Lemeshow. 1989. **Applied logistic regression**. John Wiley & Sons, New York, New York, USA.
- Keetch, J. J. y Byram, G. M. 1988. **A drought index for forest fire control**. Res. Paper SE-38. Asheville, North Carolina. Southeastern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 36 p.
- Loftsgaarden, D.O. y P.L. Andrews. 1992. **Constructing and testing logistic regression models for binary data: Applications to the National Fire Danger Rating System**. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-286. 36 p.
- Maddala, G.S. 1988. **Introduction to econometrics**. Macmillan Publishing Co., New York, USA.
- Martell, D. L., S. Otukol y B.J.Stocks. 1987. **A logistic model for predicting daily people-caused forest fire occurrence in Ontario**. Canadian Journal of Forest Research, 17: 394-401.
- Martell, D.L., E. Bevilacqua y B.J. Stocks. 1989. **Modeling seasonal variation in daily people-caused forest fire occurrence**. Canadian Journal of Forest Research 19: 1555-1563.
- Prentice, R.L. 1986. **A case-cohort design for epidemiologic cohort studies and disease prevention trials**. Biometrika 73: 1-11.
- SAS Institute Inc. 1999. **SAS Online Doc. Version Eight**. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Van Wagner, C.E. 1987. **Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System**. Government of Canada, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario, Canada. Forestry Technical Report n. 35.
- Vega-García, C., P.M. Woodard, S.J. Titus, W.L. Adamowicz y B.S. Lee. 1995. **A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires**. International Journal of Wildland Fire 5(2): 101-111.
- Vélez Muñoz, R. 2000. **El concepto de combustibilidad**. Pág. 7-1 a 7-16 en: Vélez Muñoz, R. (Coord.). 2000. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias. McGraw-Hill, Madrid.
- Volk, G. **RADIATION** [Programa informático]. 1997. Universitaet fuer Bodenkultur, Centre for Geo-Informatics, Daenenstrasse 6, A1190 Wien, AUSTRIA. Disponible en: <http://bzgsrserver.boku.ac.at/volk/>.