

Estimación de Factores de Riesgo Humano de Ignición en España Mediante Regresión Logística¹

Jesús Martínez,² Emilio Chuvieco,³ Pilar Martín⁴

Resumen

La actividad humana es el factor principal de ignición de incendios forestales en España, al igual que en el resto de los países del Sur de Europa. Dado que la mayor parte de los incendios son el resultado de la actividad y el comportamiento humanos, su análisis debe basarse en los signos dejados en el territorio por aquellos que podemos considerar responsables. Sin embargo, como resulta normalmente difícil de conseguir directamente, una buena solución podría ser deducir los orígenes humanos de la ignición a partir de indicadores indirectos de su número, actividad y distribución.

El primer objetivo de este trabajo era identificar las variables significativas que pueden utilizarse para predecir el riesgo de ignición por causas humanas en España. El segundo es proponer un modelo de predicción de ocurrencia de incendios por causas humanas, con un horizonte a largo plazo. El modelo se ha construido utilizando la regresión logística mediante el análisis de las relaciones entre la densidad de incendios causados por el ser humano en el área forestal municipal durante un periodo de 13 años (variable dependiente) y 26 variables geográficas, socioeconómicas y medioambientales (variables independientes) para 7704 municipios del territorio peninsular español y las islas Baleares. El modelo predice adecuadamente la probabilidad de que cada unidad espacial tenga una incidencia alta o baja de incendios producidos por causas humanas y proporciona una idea de la importancia relativa de cada factor humano para explicar la ignición.

Introducción

Según revelan datos de la Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGCN) para el periodo 1988-99, el 96 por ciento de los incendios en España se debió directa o indirectamente a la acción del hombre, lo que pone de manifiesto la estrecha relación existente entre incendios y actividades humanas. A la vista de estos datos, es evidente el interés de considerar el factor humano en los planes de prevención. Sin embargo, esta evidencia contrasta con la escasa importancia concedida a los factores humanos frente a los físicos (topografía, combustibles y meteorología) en los análisis cuantitativos del riesgo de incendio.

¹Una versión abreviada de esta ponencia 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.

²Becario de investigación en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá. C/ Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares. España. jesus.mar@uah.es.

³Catedrático de Análisis Geográfico Regional del Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.

⁴Científica Titular del Instituto de Economía y Geografía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/ Pinar 25, 28006 Madrid. España.

El riesgo humano de ignición puede definirse como la probabilidad de que ocurra un incendio como consecuencia de la presencia y actividad, ya sea directa o indirecta, del hombre. En este sentido, evaluar la acción humana como agente de ignición resulta una tarea compleja, entre otras razones por la dificultad para obtener datos sobre la cantidad de personas presentes en una zona forestal, las actividades que realizan y cómo utilizan el fuego (Vega García y otros 1993). De hecho, los datos temporales y diarios necesarios para evaluar el factor humano del riesgo de incendio no están generalmente disponibles (Martell y otros 1987) tal y como lo pueden estar variables como la temperatura o la humedad relativa. Además, el hombre, es uno de los elementos más dinámicos del espacio y su actividad o actitudes, en ciertas ocasiones, no tiende a seguir patrones espaciales determinados, o al menos, resulta más difícil determinarlos, como es el caso de la piromanía o ciertas motivaciones intencionadas. Sin embargo, para otro tipo de causas, como las relacionadas con las actividades recreativas o con las quemadas agrícolas y ganaderas, sí que parece más sencillo obtener variables espaciales. Todas estas dificultades han llevado frecuentemente a los investigadores y a los organismos responsables de la lucha contra incendios a adoptar dos tipos de soluciones al respecto; por una parte a dejar el componente de riesgo humano fuera de sus modelos de predicción o, al menos, a tratarlo de manera muy marginal, y, por otra, a obtener algunos estimadores indirectos de las actividades humanas de riesgo, es decir, indicadores de actividades que sean causa habitual de incendio, y que principalmente son de carácter estructural, es decir, hacen referencia a los rasgos más permanentes del territorio y la población.

En este trabajo se parte de la hipótesis de que los incendios producidos por el hombre de forma reiterada en un determinado ámbito geográfico, no pueden explicarse sólo por las condiciones físicas o naturales del medio. Por otro lado, tampoco se pueden reducir a factores de comportamiento humano individual, sujetos únicamente a las reglas del puro azar. Pensamos, más bien, que este tipo de incendios, suelen ser resultado de una pauta social cuyo origen hay que buscar en las condiciones forestales, ambientales y socioeconómicas de cada zona.

En lo que se refiere al riesgo humano de ignición, ya desde los años sesenta aparecen algunos estudios en los que se intenta considerar el factor humano para explicar o predecir la ocurrencia de incendios a partir de variables, más o menos indirectas, sobre el número, distribución y actividades de los seres humanos sobre el territorio, obtenidas fundamentalmente de fuentes censales y encuestas (Altobellis 1983, Bertrand y Baird 1975, Christiansen y Folkman 1971, Cole y Kaufman 1963, Doolittle 1972, Hasbrough 1961, Johnson 1968, Jones y otros 1965). En general, en estos estudios se concluye que más importantes que quienes son los incendiarios parecen ser las actividades que desarrollaban

En década de los 80 comienzan a aparecer los primeros estudios de riesgo de incendio con un enfoque claramente más “espacial” o “cartográfico”, en los que se consideran, junto a variables físicas, este tipo de factores o variables humanas (Aerial Information Systems Inc. 1981, Bradshaw y otros 1987, Chuvieco y Congalton 1989, Donoghue y Main, 1985, Phillips y Nickey 1978). A partir de los años 90 su número se ha incrementado gracias a la mayor disponibilidad de datos digitales cartográficos y estadísticos que se integran en Sistemas de Información Geográfica (entre otros: Abhineet y otros 1996, Benvenuti y otros 2002, Chou 1990 y 1992; Chuvieco y otros 1999, Kalabokidis y otros 2002, Salas y Chuvieco 1994, Vega-García y otros 1993 y 1995, Vasconcelos y otros 2001, Vliegheer 1992). En todos ellos se utilizan fundamentalmente variables relacionadas con las actividades recreativas en el monte,

las vías de comunicación (proximidad a carreteras y sendas, etc), o con la presión y presencia antrópica (densidad de población, asentamientos humanos). Este tipo de variables son las que, desde el principio, más se han utilizado en casi todas las investigaciones, ya que son las más fácilmente espacializables, aunque, dependiendo de las zonas, no siempre son las más importantes. A veces, se introducen ciertas modificaciones, o se proponen diferentes modos para estimar un determinado factor (por ejemplo, utilizando la distancia a las zonas más habitadas en vez de a las carreteras, o se emplea la accesibilidad a ciertos elementos recreativos en vez de las zonas de acampada) o bien se introducen otros nuevos, no considerados anteriormente, como el valor comercial del bosque o el tipo de propiedad.

A pesar de la existencia de estos trabajos empíricos, existe aún un largo camino por recorrer en la predicción y modelización del riesgo de incendios de origen humano. Para ello, un primer paso consiste en identificar y establecer la importancia relativa de todos los factores de riesgo vinculados a la actividad humana en cada zona de estudio. Este esfuerzo previo, se hecha en falta en algunas de las investigaciones revisadas, que incluso pueden parecer algo reduccionistas, ya que consideran solo una pequeña parte del conjunto de factores humanos que estarían realmente vinculados a la ocurrencia. Sin embargo, resulta positivo observar como hay un progresivo interés en la utilización de este tipo de variables.

Objetivos

El objetivo de esta comunicación es presentar la metodología y los resultados provisionales obtenidos para modelar el riesgo humano a escala nacional en España. Se pretende obtener un índice mediante regresión logística para predecir la probabilidad de que una unidad espacial tenga una alta o baja ocurrencia de incendios de origen humano. A su vez, se pretendía que el modelo proporcionara una idea de la importancia relativa de cada factor humano en la ocurrencia de incendios. Los resultados se representan en forma de mapas de riesgo.

Área de estudio y unidad de análisis

Puesto que el objetivo es obtener un visión global de los factores humanos de ignición en España, el área de estudio abarca todo el territorio peninsular español y el archipiélago de Baleares. No se ha podido incluir las Comunidades de Navarra y Canarias debido a la falta de datos para algunas variables de importancia. En futuros trabajos se tendrá en cuenta la diversidad de situaciones de causalidad y riesgo existentes a lo largo del país, comparando diferentes modelos para varias regiones.

La unidad espacial de análisis se ha escogido en función de la variable dependiente, es decir teniendo en cuenta la disponibilidad de datos sobre incendios. En España, por ejemplo, no se pueden considerar los puntos de ignición, ya que son muy escasos los partes de incendios en los que se recogen las coordenadas x e y. Por ello, se han utilizado los municipios (7004 para la zona de estudio) como base tanto para localizar geográficamente los incendios, a partir de la base de datos de los partes suministrada por la DGCN, como para generar las variables independientes.

Metodología

El primer paso de nuestro trabajo consistió en identificar, a partir de revisiones bibliográficas y consultas a expertos, los factores antrópicos relacionados con la ocurrencia de incendios forestales en España (Martínez y otros 2004). Esto nos permitió elaborar una lista de factores de riesgo en la que se propone una o varias variables para medirlos cuantitativamente. Dependiendo de la fuente de adquisición de los datos, estas variables pueden ser estadísticas y/o cartográficas.

Generación de variables de riesgo y análisis espacial

La “geo-base de datos” creada para los 7004 municipios del área de estudio está compuesta por 23 variables de ocurrencia y causalidad histórica de incendios forestales y por 108 variables independientes referidas a características sociodemográficas y territoriales. Las variables estadísticas⁵ fueron recopiladas de fuentes censales y las variables espaciales⁶, tales como la red de carreteras, los espacios naturales protegidos, usos del suelo, etc., se obtuvieron de mapas digitales de organismos nacionales. Para obtener superficies municipales y otro tipo de variables derivadas, fue necesario realizar variadas operaciones y análisis espaciales con herramientas incorporadas en los Sistemas de Información Geográfica. Se utilizaron los programas ArcInfo 7.2, ArcGis-ArcInfo 8, ArcView 3.2. e Idrisi 3.2.

Variable dependiente

Una de las cuestiones más relevantes fue escoger la variable dependiente, aquella que se pretendía explicar y predecir, que finalmente se definió como el número de incendios de origen humano ocurridos en el período 1988-2000. La elección del período temporal responde a dos razones: la disponibilidad de datos y la mayor homogeneidad de los mismos tanto en lo que se refiere a la recogida de la información como a las características de causalidad de los incendios ocurridos en este período. Debido a que la unidad espacial de referencia elegida para el análisis, el municipio, presenta tamaños muy diversos, fue necesario relativizar la variable dividiendo el número de incendios ocurrido en cada municipio por la superficie forestal municipal, según lo que la DGCN considera como índice de ignición.

Variables independientes

Una de las principales dificultades de este trabajo fue encontrar datos en formato digital accesibles, actualizados y homogéneos para todas los municipios del país. Con

⁵ **Fuentes estadísticas:** (1) Censo de Población y Viviendas de 1991, INE. (2) Padrón Municipal de 1996. Cifras oficiales de Población, INE. (3) Cifras oficiales de población y padrón Municipal de 2001, INE. (4) Nomenclátor de 2001 y Relación de unidades poblacionales, INE. (5) Series históricas de población de hecho desde 1900 hasta 1991, INE. (6) Atlas de la Población Española: Análisis de Base Municipal (CD-ROM). (7) Censo Agrario de 1989, INE (8) Censo Agrario de 1999, INE (9) Encuestas de la U.E de ganado por tipo de animales, 1999. (10) Base de datos de los partes de incendio.

⁶ **Fuentes cartográficas:** (1) Mapa de Usos Forestales del 2º Inventario Forestal Nacional 1:50.000, 1986-96, DGCN. (2) Mapa de Propiedades del 2º Inventario Forestal Nacional 1:50.000, 1986-1996, DGCN. (3) Mapa de Espacios Naturales Protegidos 1:50.000, DGCN. (4) Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 1:50.000, Ministerio de Agricultura, 1974-1980. (5) Mapa de Productividad Potencial Forestal 1:200.000, Ministerio de Medio Ambiente (6) Corine Land Cover de España (raster 100x100 m), European Topic Center on Land Cover (ECT/LC), European Environment Agency. (7) Mapa de potenciales de población de España (Univ. de Zaragoza) resolución de 25 km². (8) Mapa de carreteras 1:1.000.000 adaptado por ESRI España. (9) Mapa de ferrocarriles 1:1.000.000, Instituto Geográfico Nacional. (10) Límites municipales 1996 1:200.000, Instituto Nacional de Estadística (INE).

frecuencia los datos necesarios para medir un determinado factor no existen para todas o algunas de unidades de estudio. En otras ocasiones el esfuerzo económico o de recopilación era muy elevado. Por ello, no fue posible conseguir el conjunto “ideal” de variables, teniendo que descartar algunas variables, teóricamente muy relacionadas con los incendios (por ejemplo las áreas recreativas, la caza, recursos de extinción y vigilancia, permisos de quemas agrícolas y ganaderas, líneas eléctricas, vertederos, sendas forestales, etc). En total se generaron 108 variables independientes, agrupadas según el tipo de factor de riesgo humano al que contribuyen. Aunque muchas de ellas en realidad representan conceptos similares, se procuró que cada variable recogiese alguna característica específica que la diferenciase del resto. Sin embargo, siempre que se trabaja con un conjunto tan grande de variables, el grado de multicolinealidad es inevitablemente muy elevado. A pesar de ello, lo que se pretendía era seleccionar únicamente aquellas variables que para un determinado factor tuvieran mayor influencia o relación con la ocurrencia de incendios, cosa que de partida desconocíamos.

Con el fin de reducir los posibles efectos de multicolinealidad y el ruido de variables irrelevantes, se realizaron análisis exploratorios y matrices de correlación entre todas las variables. Además se examinaron varios estadísticos de diagnóstico de multicolinealidad obtenidos en análisis de regresión lineal, como el coeficiente de tolerancia, el factor de inflación de la varianza (VIF), etc. Tras todos estos análisis se seleccionaron 26 variables para crear el modelo de riesgo final.

Para comprobar que la selección de esas 26 variables era adecuada, se llevaron a cabo también algunos test de estadística comparativa entre conjuntos de datos. En este caso, interesaba comprobar si existía o no una diferencia significativa en los valores de las variables seleccionadas correspondientes a dos muestras de municipios, unos con alta incidencia de incendios y otros con baja incidencia. Si estos test mostraban una escasa diferencia entre los valores de una determinada variable entre esos dos conjuntos de municipios se podría asumir que esa variable no estaba relacionada con la ocurrencia de incendios. Se aplicaron las pruebas paramétricas y no paramétricas de U-Mann-Whitney y Ji Cuadrado para dos muestras y la prueba H de Kruskal-Wallis para cuatro muestras. Las tres pruebas presentaron resultados muy similares, señalando como significativamente todas las variables previamente seleccionadas, a un nivel inferior al 0,05.

Regresión Logística

El modelo de regresión logística ha sido utilizado previamente, y con buenos resultados, para predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios y examinar los factores más críticos de incidencia tanto a escala local (Chou 1992, Chou y otros 1993, Latham y Schilieter 1989, Loftsgaarden y Andrews 1992, Vasconcelos y otros 2000, Vega-García y otros 1993 y 1995) como regional y global (Chuvienco y otros 1999, Martell y otros 1987 y 1989). Esta técnica de regresión, muy flexible y fácil de usar, es la más conocida y utilizada cuando la variable dependiente a predecir es dicotómica, en función los valores de un conjunto de variables predictoras. Se basa en la siguiente función:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

donde z se obtiene por una combinación lineal estimada de las variables independientes mediante un ajuste de máxima probabilidad. Los valores z se pueden

interpretar como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. La función $f(z)$ convierte los valores de z en una función continua cuyo rango oscila entre 0 y 1. Habitualmente los valores menores a 0,5 se asignan a no ocurrencia del fenómeno y los iguales o superiores se interpretan como ocurrencia.

Antes de abordar el análisis de regresión, se seleccionaron únicamente aquellos municipios que cumplieren dos requisitos: tener uno o más incendios durante el periodo de estudio y poseer más de 50 ha (0,5 km²) de superficie forestal. Se pretendía con ello reducir casos con valores extremos o extraños en la variable dependiente. Así se redujo en número de casos de 7704 a 6080 municipios. Además, y con el propósito de realizar una validación de los resultados obtenidos, se seleccionaron aleatoriamente el 60% de los casos (es decir, 3619 municipios) que fueron los que finalmente se emplearon para calcular la función de regresión. El 40% restante, se utilizó posteriormente para validar o medir la calidad de las estimaciones.

Por otro lado, como se trataba de predecir la probabilidad de alta o baja ocurrencia de incendios, fue preciso convertir la variable dependiente en una variable dicotómica. Para hacerlo, se optó por ordenar, de menor a mayor incidencia, los 3619 municipios seleccionados tomando como referencia la variable dependiente. A continuación, se dividió la variable en tres grupos con idéntico número de casos (1206). A los municipios incluidos en el primer grupo (baja incidencia) se les dio el valor 0 y a los del grupo 3 (alta incidencia) se les asignó el valor 1. Se descartaron los municipios del grupo 2 (incidencia media) para la construcción del modelo.

Los cálculos de la regresión logística se realizaron con el paquete estadístico SPSS v.11.5. Se ensayaron diversos métodos automáticos, controlando los criterios por los cuales las variables se introducen y se eliminan de la ecuación: por pasos hacia delante, por pasos hacia atrás e introducir todos. El punto de corte para la clasificación de los casos se estableció en 0,5.

Resultados

Tras probar diferentes métodos automáticos de selección de variables, se eligió el “stepwise forward selection algorithm”, que nos proporcionó 17 modelos diferentes. Entre todos ellos se escogió el último modelo que lograba el porcentaje de acierto global más alto e incluía el mayor número de variables. Aunque quizá no sea aconsejable incluir en el modelo un número tan elevado de variables, se eligió éste porque pretendíamos, más que obtener buenas predicciones, lograr un modelo explicativo, en el que se observaran las variables y factores más influyentes en la ocurrencia. Las variables incluidas en el modelo (con números arábigos) y agrupadas por tipo de factores (indicados en letra cursiva) son las siguientes:

Transformaciones socioeconómicas en entornos urbanos: presión antrópica sobre zonas forestales y crecimiento urbano:

1. Porcentaje de zona de interfaz urbano forestal en el municipio (IUFSUP_P)
2. Variación de la población de hecho entre 1950 y 1970 (CRE50_70)

Transformaciones socioeconómicas en áreas rurales: éxodo rural, envejecimiento de la población, abandono de cultivos y actividades tradicionales en el monte

3. Porcentaje de sup. agrícola que cambió a forestal entre los 70 y 90 (ICO_90)

Mantenimiento de actividades tradicionales relacionadas con el fuego en áreas rurales: agricultura y ganadería

4. Porcentaje de ocupados en el sector primario (OCUPAGRA)
5. Porcentaje de zona de interfaz cultivo-forestal en el municipio (ICFSUP_P)
6. Densidad de ganado en régimen extensivo sobre la sup. forestal (GAN_FOR)
7. Porcentaje de zona de interfaz pasto-forestal en el municipio (IPFSUP_P)

Desinterés por el monte y su conservación. Insuficiente protección y gestión de los terrenos forestales:

8. Porcentaje de superficie de montes con menor gestión, control y ordenamiento a lo largo del tiempo (montes privados, de entidades locales de libre disposición consorciados y los montes vecinales en mano común). (NOGES_PF)

Accesibilidad y riesgo derivado de las vías de comunicación:

9. Densidad de carreteras por superficie municipal (ROADMU_D)
10. Densidad de vías de ferrocarril por superficie municipal (FFCCMU_D)

Otros factores que pueden causar incendios por accidentes o negligencias:

11. Densidad de maquinaria agrícola sobre superficie municipal (MAQUIN_D)
12. Porcentaje de la zona de interfaz entre infraestructuras de riesgo (vertederos, minas y canteras) y las zonas forestales. (IFIFSU_P)

Estructura del paisaje, territorio y poblamiento:

13. Densidad de parcelas agrícolas (fragmentación agrícola) (PAR_SEXP)
14. Porcentaje de población que vive en diseminados (DISEM_P)
15. Densidad de entidades singulares de población (ENTSIN_M)
16. Media municipal del índice de fragmentación. (FRAG7X7)

Factores que generan conflictos y pueden desembocar en incendios intencionados:

17. Tasa de paro (PARO)

En la *tabla 1* se observan los coeficientes de la regresión y el estadístico *Wald*, con su correspondiente nivel de significación, para cada variable independiente. Las variables han sido ordenadas de forma descendente según el nivel de significación del estadístico *Wald*. También se ha calculado el cambio en $-2LL$ si una variable es eliminada en cada paso ($-2LL$ es el logaritmo neperiano del coeficiente de verosimilitud multiplicado por -2), que es también una medida complementaria de la importancia de las variables en el modelo. Las variables que primero aparecen en la *tabla 1*, por orden descendente, son las que más influencia tienen en la ocurrencia de incendios a nivel nacional: la densidad de maquinaria agraria, la densidad de parcelas agrícolas, la densidad de entidades singulares de población, la densidad de ganado en régimen extensivo en zonas forestales y la tasa de paro.

Tabla 1— Variables incluidas en el modelo y coeficientes de la regresión

Variables: Paso 17	Coef B	E.T.	Wald	gl	Sig.	Exp(B)	Cambio en -2LL si se elimina la variable
MAQUIN_D	0,538	0,047	129,150	1	0,0000	1,7132	186,234
PAR_SEXP	0,013	0,002	64,595	1	0,0000	1,0130	76,107
ENTSIN_M	6,999	0,974	51,647	1	0,0000	1095,8907	71,469
GAN_FOR	0,013	0,002	51,451	1	0,0000	1,0127	88,979
PARO	0,026	0,005	25,014	1	0,0000	1,0259	25,047
ICFSUP_P	-0,130	0,027	22,853	1	0,0000	0,8778	23,785
CRE50_70	0,011	0,002	22,796	1	0,0000	1,0109	27,955
ROADMU_D	0,002	0,000	16,492	1	0,0000	1,0020	17,040
FRAG7X7	102,114	25,165	16,465	1	0,0000	2,225E+44	16,895
DISEM_P	-0,027	0,007	15,474	1	0,0001	0,9731	17,271
FFCCMU_D	0,003	0,001	9,377	1	0,0022	1,0030	9,624
OCUPAGRA	0,010	0,004	7,391	1	0,0066	1,0101	7,431
IPFSUP_P	-0,125	0,046	7,282	1	0,0070	0,8827	7,549
IFFSU_P	0,767	0,317	5,840	1	0,0157	2,1531	7,609
IUFSUP_P	0,319	0,141	5,100	1	0,0239	1,3752	6,490
ICO_90	0,011	0,005	4,759	1	0,0291	1,0109	4,667
NOGES_PF	-0,005	0,002	4,443	1	0,0350	0,9949	4,420
Constant	-3,766	0,326	133,579	1	0,0000	0,0231	

Según estos resultados, factores de riesgo como la estructura del territorio, especialmente la fragmentación de la actividad agrícola, y la utilización negligente del fuego en actividades tradicionales en zonas rurales (quemadas de matorral realizadas por pastores para regenerar los pastos y quemadas de rastrojos, restos y podas agrarias) son de gran importancia en la ocurrencia de incendios en España. Otras variables incluidas en el modelo son: el interfaz urbano-forestal, la presencia y densidad de carreteras y ferrocarril y la variación de población entre 1950-1970. La mayoría de los signos de los coeficientes para cada variable son lógicos en relación al conocimiento previo que se tiene de las causas de incendios en España. Para alguna variable la relación no es la esperada, como en el caso del interfaz agrícola-forestal, cuyo coeficiente es negativo. Estos signos contradictorios se pueden deber a posibles efectos de multicolinealidad que no se han podido eliminar.

La bondad de ajuste de la regresión se recoge en la *tabla 2*. El porcentaje de acierto global de la clasificación supera el 85 % y alcanza el 90% para los municipios con baja incidencia de incendios. Se puede decir que la exactitud de la clasificación es muy buena, si consideramos que el área de estudio es bastante grande y abarca situaciones de riesgo y causalidad humana muy diferentes, y que no se han tenido en cuenta variables de tipo físico.

Tabla 2— Tabla de contingencia acierto/error de la clasificación por regresión logística. Casos predichos frente a observados (muestra del 60%)

OBSERVADO		PREDICHO		
		Baja	Alta	% de acuerdo
	0	1080	117	
Baja ocurrencia	0	1080	117	90,23
Alta ocurrencia	1	221	976	81,54
Porcentaje global de acierto				85,88

Para confirmar la validez de los resultados, se aplicó la ecuación resultante del modelo a la muestra de control que incluía el 40 % de los municipios (1640). El porcentaje global de acuerdo es casi el mismo (84% correctamente clasificados) que el obtenido con la muestra original del 60% con la que se construyó el modelo.

En la *figura 1* se presenta un mapa contrastando la probabilidad de ignición pronosticada con la observada para el conjunto de municipios utilizados en la validación (muestra del 40%). Los municipios donde no coincide la ocurrencia pronosticada y la ocurrencia observada se representan en color azul (sobrestimado ó predicho pero no observado) o en color verde (observado pero no predicho ó infraestimado). Para estos casos el modelo no funciona adecuadamente, lo que indica que es necesario tener en cuenta otras variables explicativas, o incluso diseñar otro modelo diferente para estos casos. En rojo y naranja aparecen los municipios correctamente clasificados.

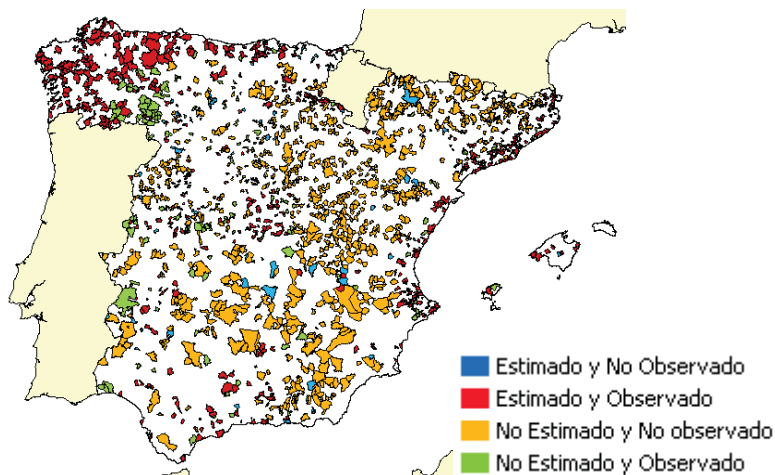


Figura 1—Validación del modelo de estimación de la ocurrencia. Ocurrencia pronosticada frente a observada (muestra del 40%)

Una vez verificada la validez del modelo, se aplicó a todos los casos del área de estudio que cumplían los requisitos previamente mencionados (6080 municipios) y se generó un mapa que expresa, en una escala probabilística comprendida entre 0 y 1, la posibilidad estimada de que un municipio cuente con alta incidencia de incendios provocados por la actividad humana (*fig. 2*). La escala ha sido dividida en cinco intervalos con el mismo número de casos (cuantiles) para facilitar su visualización. Los municipios que aparecen en blanco son aquellos que no entraron dentro del análisis por no haber padecido incendios y no tener más de 50 ha de forestales.

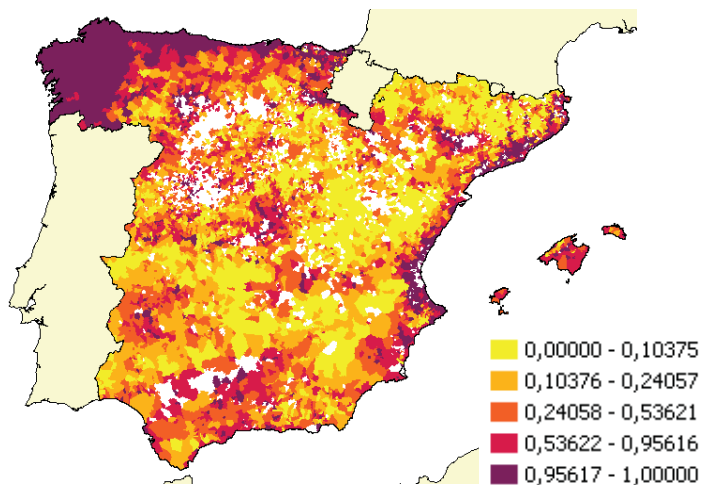


Figura 2—Probabilidad de alta ocurrencia de incendios por factores humanos

La comparación visual entre este mapa y el que aparece en la *figura 3*, que representa la variable dependiente original, nos da una idea de la buena adecuación del modelo con la realidad de la ocurrencia histórica.

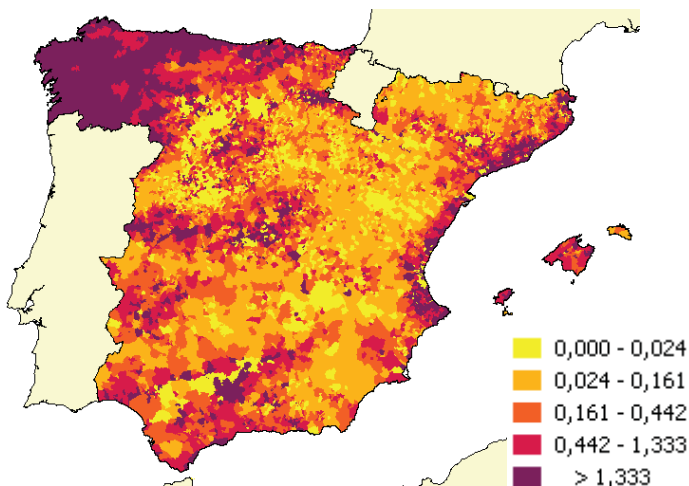


Figura 3— Índice de ignición: número de incendios forestales de origen humano / superficie forestal del municipio (clasificación de intervalos por cuantiles)

Conclusiones y discusión

En este trabajo se ha intentado mostrar la potencialidad de la estadística espacial y de la cartografía del riesgo estructural como herramientas para mejorar el conocimiento sobre los incendios forestales, especialmente necesario sobre todo de cara a planificar y diseñar los planes y políticas de prevención a escala estatal. El método de regresión logística, se ha mostrado nuevamente, aunque con ciertas limitaciones, como una técnica sencilla y eficaz para el estudio de las variables que explican el riesgo de incendio, en este caso para identificar los factores humanos más influyentes a escala global en España.

Los resultados obtenidos confirman la importancia que tiene la utilización negligente o intencionada del fuego en actividades ganaderas y agrícolas en zonas rurales. Según datos de causalidad para el periodo 1988-2001, las quemas de matorral

para regenerar el pasto y las quemadas agrícolas con fines diversos, son la causa principal conocida tanto de negligencias (42,7%) como de incendios intencionados (69,6%). Ambas suponen el origen del 20,4% del total de incendios, aunque se estima que pueden alcanzar el 50%. Por otro lado, factores referidos a la estructura del paisaje o territorio, como el grado de fraccionamiento de la propiedad agrícola (minifundismo) o el índice de fragmentación, unido al abandono agrario (porcentaje de cambio agrícola a forestal) parecen contribuir a crear situaciones graves de peligro. Pensamos que el abandono generalizado de parcelas agrícolas, aunque sean de muy pequeño tamaño, y que han sido colonizadas por vegetación altamente inflamable, constituye una seria amenaza para las zonas forestales contiguas, aunque éstas se encuentren bien cuidadas. Esta situación se ve en ocasiones agravada por la existencia de conflictos sociales y de aprovechamientos.

Los resultados también confirman que la contigüidad de determinados tipos de ocupación puede favorecer la ocurrencia (interfaces forestal/agrícola, forestal/pastos y urbano/forestal) ya que, además del riesgo asociado al uso del fuego negligente o intencionado en las propias actividades rurales o urbanas, estas estructuras implican un mayor tránsito por zonas forestales en contraposición a las grandes masas forestales homogéneas. En concreto el riesgo puede ser muy alto en la zona de interfase urbano/forestal. Otro tipo de factores influyentes se refieren a la forma en que la población habita y se distribuye por el territorio (densidad de entidades singulares de población y población viviendo en diseminados) ya que pueden favorecer una mayor presencia de agentes humanos en contacto habitual con el monte.

Por último, como era de esperar, la presencia y densidad de carreteras y vías de ferrocarril, muestran relación significativa con los incendios, así como la variación de población entre 1950 y 1970, época más destacada en España de éxodo rural y crecimiento urbano. También la tasa de paro, parece encontrarse bien relacionada con la ocurrencia. En este sentido, algunos autores (Bertrand y Baird 1975, Leone y Vita 1982, Vélez 2000), han señalado que las dificultades económicas pueden influir en la aparición de conflictos que se manifiesten en el uso del fuego intencionado

Todos estos resultados deben ser considerados únicamente válidos para el conjunto de España, ya que no hay ninguna garantía de que sean aplicables en cualquier otro lugar. Muy probablemente, algunas de las variables seleccionadas aquí no se encuentren relacionadas con la ocurrencia en otras regiones o países. Por otro lado, el modelo desarrollado tiene carácter global, en el sentido de que no contempla variaciones locales y regionales dentro del área de estudio, que de hecho son bastante importantes. Por ello, consideramos que este trabajo debe ampliarse construyendo modelos de regresión ponderados espacialmente para cada una de las unidades de análisis, por medio de técnicas de estadística espacial de tipo local que permiten identificar las variables cuyos coeficientes de regresión varían significativamente a lo largo del espacio, tanto en signo como en magnitud (Fotheringham 2002).

Referencias

- Altobellis, A. 1983. **A survey of rural population density and forest fire occurrence in the South, 1956-1970**. Report S0-294. New Orleans, Southern Forest Experimental Station. Forest Service, U.S. Department of Agriculture.
- Abhineet, J.; Ravan, S. A. et al. 1996. **Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system**. Current Science 70(10): 928-933.

- wildland fire occurrence.** Crestline, California, USDA, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Report C0027.00
- Benvenuti, M., Testi, C. et al. 2002. **Forest Fires Ignition Probability Model: test and validation on FORFAIT Italian pilot site.** En: IV International Conference on Forest Fire Research & 2002 Wildland Fire Safety Summit, ADAI & Univ of Coimbra.
- Bertrand, A.L.; Baird, A.W. 1975. **Incendiarims in Southern Forest: a decade of sociological research,** Southern. For. Exp. Stat. Social Science Research Center at Mississippi University. Bulletin n° 838. Forest Service.U.S. Department of .Agriculture.
- Bradshaw, W.G.; Webster, A.L. et al. 1987. **GIS and Wildland Fire Prevention Planning: an on-the-Ground Test.** En: Proceedings of GIS' 87, San Francisco, California.
- Chou, Y.H. 1990. **Modeling Fire Occurrence for Wildland Fire Management: A GIS Spatial Analysis for Fire Control and Prevention.** En: Proceedings of GIS/LIS'90, Anaheim, California.
- Chou, Y.H. 1992. **Management of Wildfires with a Geographical Information System.** International Journal of Geographical Information Systems 6(2): 123-140.
- Christiansen, J.; Folkman, W. 1971. **Characteristics of people who start fires...some preliminary findings.** Berkeley, Cal., Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Note PSW-251. Forest Service. U.S. Department of .Agriculture.
- Chuvieco, E.; Congalton, R.G. 1989. **Application of remote sensing and Geographic Information Systems to Forest fire hazard mapping.** Remote Sensing of Environment 29: 147-159.
- Chuvieco, E.; Salas, F. J. et al. 1999. **Integrated fire risk mapping.** En: Chuvieco, E., ed. Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Berlin, Springer-Verlag: 61-84.
- Cole, L.W.; Kaufman H.F. 1963. **Socio-economic factors and forest fire in Mississippi counties.** Preliminary Report 14. Mississippi. USA: Mississippi State University Social Sciences Research Centre; 68 p.
- Donoghue, L.R.; Main, W.A. 1985. **Some Factors Influencing Wildfire Occurrence and Measurement of Fire Prevention Effectiveness.** Journal of Environmental Management 20(1): 87-96.
- Doolittle, M.L. 1972. **The dimensions of man-caused forest fire risk: a systematic assessment.** Seattle, University of Washington, College of Forest Resources. Tesis Doctoral.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C. y Charlton, M. 2002. **Geographically Weighted Regression. The analysis of spatially varying relationships.** West Sussex, John Wiley & Sons, Ltd.: 269 p.
- Hasbrough, T. 1961. **A sociological analysis of man-caused forest fires in Louisiana.** Baton Rouge, Louisiana State University. Ph.D. Thesis.
- Johnson, F.B. 1968. **Demographic and socioeconomic factors and forest fire in the southeastern United States.** Mississippi, USA., Mississippi State University M.Sc.Thesis: 73 p.
- Jones, A.R.; Taylor, M.L. et al. 1965. **Some human factors in woods burning.** Agricultural Experiment Station Bulletin N°. 601. Baton Rouge, La., La. State University: 28 p.
- Kalabokidis, K.D.; Konstantinidis, P. et al. 2002. **GIS analysis of physical and human impact on wildfire patterns.** En: IV International Conference on Forest Fire Research & 2002 Wildland Fire Safety Summit, Coimbra, Portugal, ADAI & Univ. of Coimbra.

- Latham, D.J.; Schlieter, J.A. 1989. **Ignition probabilities of wildland fuels based on simulated lightning discharges**. Res. Pap. INT-411. Ogden, UT: Intermountain Research Station. Forest Service, U.S. Department of Agriculture: 16 p.
- Leone, V.; Vita, F. 1982. **Incendi boschivi e marginalità economica: il caso della Puglia**. Cellulosa e Carta 7/8: 41-57.
- Lin 1999. **Modeling probability of ignition in Taiwan Red Pine Forests**. Taiwan Journal Forest Science 14(3): 339-44.
- Loftsgaarden, D.; Andrews P.L. 1992. **Constructing and testing logistic regression models for binary data: applications to the National Fire Danger Rating System**. General Technical Report INT-286. Ogden, UT: Intermountain Research Station. Forest Service U.S. Department of Agriculture: 36.
- Martell, D.L.; Bevilacqua, E. et al. 1989. **Modelling seasonal variation in daily people-caused forest fire occurrence**. Canadian Journal of Forest Research 19(12): 1555-1563.
- Martell, D.L.; Otukol, S. et al. 1987. **A logistic model for predicting daily people-caused forest fire occurrence in Ontario**. Canadian Journal of Forest Research 17: 394-401.
- Martínez, J., Martín, M. P. et al. 2004 [en prensa]. **El factor humano en los incendios forestales: análisis de factores socio-económicos relacionados con la incidencia de incendios forestales en España**. En: Chuvieco E.; Martín. M.P. e.d. Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Madrid. Colección de Estudios Ambientales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Phillips, C.B; Nickey. 1978. **The concept of spatial risk and its application to fire prevention**. Fire Management Notes 39(4): 7-8-19.
- Salas, J.; Chuvieco, E. 1994. **GIS applications to forest fire risk mapping**. Wildfire 3:7-13.
- Vasconcelos, M.J.P.; Silva, S. et al. 2001. **Spatial prediction of fire ignition probabilities: comparing logistic regression and neural networks**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67(1): 73-83.
- Vega Garcia, C.; Woodard, P.M. et al. 1993. **Geographic and temporal factors that seem to explain human-caused fire occurrence in Withecourt Forest, Alberta**. En: Proceedings of GIS'93 Symposium, Vancouver, British Columbia.
- Vega García, C.; Woodard, P.M. et al. 1995. **A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires**. International Journal of Wildland Fire 5(2): 101-111.
- Vélez, R. 2000. **La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias**. En: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. Madrid: 1281 p.
- Vliegheer, B.M.d. 1992. **Risk assessment for environmental degradation caused by fires using remote sensing and GIS in a Mediterranean Region (South-Euboia, Central Greece)**. En: IGARSS'92. Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium. Houston, TX: 44-47.

Esta página se deja en blanco intencionadamente.