

ANÁLISIS DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES CAUSADOS POR RAYO EN LA ESPAÑA PENINSULAR

CARLOS EDUARDO PACHECO ANGULO¹, INMACULADA AGUADO SUÁREZ² y HÉCTOR
NIETO SOLANA²

¹Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela CP: 5101

²Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España. CP 28801

¹carlosa@ula.ve, ²inmaculada.aguado@uah.es, ²hector.nieto@uah.es

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios por causa natural (rayo) para la España peninsular mediante el ajuste de un modelo logístico. El modelo utiliza como variable dependiente los partes de incendios por causa de rayo y como variables independientes los índices meteorológicos (FFMC, DMC, 1h y 10h), las descargas de rayos, la topografía (pendiente, altitud y exposiciones), las coberturas forestales y los tipos de clima. Los resultados muestran que el DMC medio, los rayos totales, el clima oceánico y mediterráneo de montaña son las variables más explicativas en el proceso. El modelo ofrece una precisión global aceptable (64,12%). Esto demuestra que las condiciones climáticas, el grado de humedad del combustible y la actividad de tormentas están relacionadas con la probabilidad de ocurrencia de incendios.

Palabras claves: Ocurrencia, incendios, rayos, modelo logístico.

ANALYSIS OF OCCURRENCE OF FOREST FIRES CAUSED BY LIGHTNING IN PENINSULAR SPAIN

ABSTRACT

The purpose of this research was the prediction of forest fire caused from natural factors as lightning for the Iberian peninsula. This aim was obtained by applying an adjustment to the logistical model. The model utilizes as dependent variable fires caused by lightning and as independent variables meteorological indexes (FFMC, DMC, 1h and 10h), lightning discharges, topography (slope, altitude and aspect), forest coverage and climate types. These results show that the average DMC, the total lightning, the Oceanic and Mediterranean mountain climate were the most explanatory variables in the process. The model offers an acceptable global precision

(64,12%). These results demonstrate that climatic conditions, the moisture content of fuel and activities of storms are related with the probability of forest fire occurrence.

Key words: Occurrence, fires, lightning, logistic model.

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen actualmente la causa más importante de destrucción de los bosques de los países del Mediterráneo (Vélez, 2000).

Según la Dirección General para la Biodiversidad (2007) en España, para ese año, se produjeron 10.932 incendios con 86.113 ha. de superficie quemada, siendo el origen de los mismos el ser humano, de manera directa o indirectamente, con un 95,69% y los rayos con un 4,31%, representando este último el 2,9% del área total forestal quemada. Estas cifras varían según los años, de tal forma que es posible encontrar años con alta incidencia de incendios frente a otros años donde la ocurrencia de incendios es menor.

A diferencia de lo acontecido en España, en Alaska el 93% de las áreas quemadas son por causa natural (Boles y Verbyla, 2000, citado por Dissing y Verbyla, 2003); en Finlandia el 13% de los incendios son causados por rayos (Larjavaara, *et al.*, 2005); en Canadá las causas naturales son aproximadamente el 38% de 10.000 incendios ocurridos cada año, ocupando el 82% del total de área quemada (Anderson, 2002); asimismo en el Oeste de los Estados Unidos la principal causa de incendio es la natural (Rorig y Ferguson, 1999; Krawchuk, *et al.* 2006). Se observa a tenor de estos datos que la ocurrencia de incendios causados por rayo tiene un importante papel en áreas boreales.

La proporción de igniciones causadas por el hombre es alta, pero el tamaño de sus incendios son típicamente más pequeños que los causados por rayos. Esta diferencia se debe generalmente a la lejanía y la inaccesibilidad a las zonas de incendios causados de manera natural, lo que dificulta la supresión de los mismos (Podur *et al.*, 2003; McRae, 1992; Wierzchowski *et al.*, 2002).

Los rayos como elemento principal de las causas naturales de incendios son el producto de una descarga eléctrica de energía generada por la separación de cargas positivas y negativas de las nubes (Latham y Williams, 2001, citado por Larjavaara, *et al.*, 2005). Esta o estas descargas pueden ser enviadas a la tierra bajo una corriente continua o de largas transferencias de cargas eléctricas (Latham y Williams 2001). Si éstas tuvieran lugar bajo un escenario de veranos de escasa precipitación y temperaturas diurnas medias superiores a los 30 °C, donde la humedad del material vegetal muerto se reduce (Vélez, 2000), se incrementaría la probabilidad de ignición del combustible, lo que desencadenaría una violenta conflagración.

En la Península Ibérica, según Rivas Soriano *et al.* (2001), la distribución temporal de la actividad de tormentas durante el periodo 1992 -1994 tiene una variación mensual, donde el pico más alto se localiza entre los meses más calurosos (mayo a septiembre), con una variabilidad de año a año cada vez más fuerte y con un porcentaje de cargas positivas del 8%. Por otro lado, la media de las descargas de los rayos múltiples es de 2 para las cargas negativas y 1,1 para las cargas positivas,

similares en el invierno y en el verano. Respecto a su distribución espacial, los incendios causados por rayo se encuentran asociados a la topografía de la zona, principalmente en las cadenas montañosas (condiciones parecidas a las encontradas por Dissing y Verbyla (2003) en el interior de Alaska). De igual manera, Rivas Soriano *et al* (2005), dentro del estudio de la actividad de los rayos durante diez años en la Península Ibérica, vuelven a señalar estas conclusiones acerca de las características de los rayos.

Pero solo los rayos no nos darán la información sobre la incidencia de incendios. Hay que conocer otros tipos de variables que, junto con ellos, nos permitirán predecir la ocurrencia de incendios de causa natural. Estas variables son: el combustible y sus niveles de humedad, la topografía y sus variables derivadas (pendiente, altitud y exposiciones) y las características meteorológicas que influyen en el proceso de ignición y propagación del mismo. Estas variables han sido utilizadas por Vasconcelos *et al.* (2001) en la validación de los modelos de predicción de distribución espacial para probabilidad de ignición de incendios de causa natural en la parte central de Portugal, utilizando las variables derivadas de la topografía, uso de la tierra, vías de comunicación, áreas urbanas, distancias entre las vías de comunicación y las áreas urbanas, así como los registros históricos de los incendios. Por su parte, Wierzchowski, *et al.* (2002) analizan la distribución de los rayos y los incendios en el sureste de British Columbia y Alberta, Canadá; los resultados muestran una diferencia significativa entre los rayos que producen y los que no producen incendio, ya que no están uniformemente distribuidos en el tiempo ni en el espacio de la Cordillera y Llanuras Interiores. Dolling, *et al.* (2005) generaron el *índice de sequedad Keetch Byram* para determinar las actividades de incendios de causa natural en las islas hawaianas en base a la temperatura máxima y la precipitación, como responsables de la pérdida y ganancia de humedad del combustible. Krawchuk, *et al.* (2006) estudiaron la ocurrencia de ignición de incendios forestales por causa de rayos, determinando que la mayor frecuencia de ocurrencia de incendios se ubicaban en el combustible de la especie *Picea* spp y las menores frecuencias en el combustible de la especie *Populus* spp.

En la elaboración de los modelos de probabilidad de ocurrencia de incendios por causa de rayos, una de las variables fundamentales a considerar es el contenido de humedad de la vegetación muerta. En este sentido es necesario que se evapore todo el agua contenida en el combustible para que se pueda iniciar el proceso de ignición, de esta forma a mayor contenido de agua menor será la probabilidad de que el combustible pueda arder. Tradicionalmente, el contenido de humedad en el combustible se calcula a través de índices meteorológicos que son instrumentos que predicen la probabilidad de que pueda suceder un incendio, tomando en consideración únicamente las variables meteorológicas. Los más utilizados son el Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios de Estados Unidos (NFDRS) (Bradshaw, 1983) y el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (CFFWI) (Van Wagner, 1987). Hay numerosos trabajos en los que se han utilizado dichos índices como variables explicativas de la ocurrencia de incendios causados por rayo: Krawchuk *et al.* (2006), Nieto (2007).

Acerca de los modelos desarrollados para predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios por rayos, las aportaciones son variadas. McRae (1992) estimó un método de predicción de incendios por causa de rayos en Austria basado en la topografía y la distribución de frecuencia de los rayos; utilizó el estadístico *chi* cuadrado para comparar los incendios causados por rayos con los

lugares donde topográficamente se podían dar, es decir, lugares con un radio mínimo horizontal de curvatura de 200 m. Por su parte Anderson (2002) predice la ocurrencia del fuego en Canadá; a partir de modelos probabilísticos; se calcularon las probabilidades en cuatro fases de ocurrencia de incendios: probabilidad actual de una corriente continua larga, probabilidad de ignición asumiendo una corriente continua larga, probabilidad de supervivencia del rayo para la ignición sin arder con llamas hasta un tiempo después y probabilidad de que el rayo al arribar cause ignición. Podur *et al.* (2003) estudian los incendios forestales por causa de rayos en Ontario entre 1976 y 1998 a partir del *método Kernel*, del cual se obtuvo principalmente la localización de los incendios mediante la base de datos de incendio y la meteorológica; de esta última se obtuvieron los índices FWI y DMC. Larjavaara, *et al.* (2005) estimaron la probabilidad de que los rayos ocasionen la ignición de incendios en los bosques de Finlandia durante el período 1998-2002; para ello se agruparon los incendios causados por rayos y los rayos que ocurrieron dentro de un radio de 10 km. y durante 50 horas para calcular la probabilidad de cuál rayo hubiese iniciado un incendio. Wotton y Martell (2005) analizaron los incendios por rayos y generaron un modelo de ocurrencia en Ontario; el modelo calculó la probabilidad de que los rayos causen una ignición en los bosques y la probabilidad de que una ignición sea detectada y reportada en la Dirección de Incendios de la provincia de Ontario.

En general, estos modelos de probabilidades de ocurrencia de incendios por causas de rayos pueden realizarse a corto y largo plazo. El primero se calcula, semanal o diariamente, con variables que cambian en esta dirección, como las meteorológicas, mientras que el segundo considera aquellas variables más estables en el tiempo, como las topográficas, las características del combustible y las características climáticas.

Los modelos a largo plazo son los más adecuados para la definición de patrones espaciales de riesgo y, por tanto, para el diseño de planes de prevención y planificación de la lucha contra los incendios forestales (Chuvienco y Salas, 2004), constituyéndose en una herramienta muy eficaz para la toma de decisiones en este ámbito (Rodríguez, 2002; Vilar *et al.*, 2007), especialmente en el diseño de los planes regionales de defensa: "*gestión del combustible, diseño de cortafuego, limpieza del sotobosque, quemas controladas, localización de torres de vigilancia, diseño de itinerarios de patrullas móviles, diseño de la red de puntos de agua, etc.*" (Martín *et al.*, 2003).

En este orden de ideas, se plantea como objetivo principal de este trabajo predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios por causa natural (rayo) a largo plazo para la España peninsular, mediante el ajuste de un modelo logístico.

2. Área de estudio

El área de trabajo seleccionada en este estudio es la Península Ibérica. En este espacio geográfico el resultado de la acción conjunta de temperatura y precipitación definen el clima mediterráneo dominante en España; por su parte, la zona norte del país queda definida por un clima de tipo oceánico. En este trabajo se utilizará para representar las variaciones climáticas peninsulares el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.*, 2005), donde encontramos cinco

zonas climáticas: mediterráneo continental, oceánico, mediterráneo litoral, mediterráneo de montaña y de montaña.

Estas condiciones naturales y la prolongada ocupación humana han sido determinantes en la composición forestal de la España peninsular, encontrándose ésta, según el mapa CORINE *Land Cover* del año 2000, de la siguiente manera: el 7,82% del territorio son coníferas, el 9,34% frondosas, el 3,02% vegetación mixta de frondosas y coníferas, el 41,81% matorrales, el 26,28% pastizales y el 8,27 otros tipos de vegetación forestal.

En cuanto a la distribución espacial de los rayos como elemento principal de la causa natural de incendios, se encuentran espacialmente distribuidos por los Pirineos, Sistema Ibérico, Cordillera Cantábrica, Sistema Central y la costa mediterránea, mostrando una menor actividad hacia la parte sur de la Península Ibérica (Rivas *et al.*, 2005). Esta información está apoyada en la información sobre número de descargas de rayos durante el periodo 2002 -2004 del Centro Europeo de Predicciones MetOffice que se encuentran representados en la [figura 1](#).

3. Metodología

Una vez establecida la problemática de esta investigación y enunciado explícitamente el objetivo general, se procedió a establecer la metodología que permitirá dar respuesta a dicho planteamiento. Para ello es necesario conocer en primera instancia la fuente de datos que permitirá obtener las variables necesarias para la obtención del modelo de ocurrencia de incendio por causa natural y proponer, a continuación, el método de análisis basado en la regresión logística.

3.1. Datos

3.1.1. Puntos de ignición

La ocurrencia de incendio por causas naturales (rayo) se obtuvo a partir de los partes de incendio de la Dirección General para la Biodiversidad (DGB) del Ministerio de Medio Ambiente, donde se localizan espacialmente los incendios a nivel de cuadrícula de 10 Km. de resolución. El incendio se registró a partir de los términos municipales de origen y la hoja UTM. En esta base de datos se encuentran los partes de incendios desde el año 1980 hasta el 2004, límite superior éste que, junto con los límites inferiores de la información disponible en cuanto a datos meteorológicos y descargas de rayos, definieron el período de estudio de la presente investigación (2002 – 2004) ([figura 2](#)). De igual forma, la cuadrícula utilizada fue la que sirvió de base para procesar el resto de los datos, así como para desarrollar y obtener los resultados finales del modelo.

3.1.2. Datos meteorológicos

Los datos utilizados en este trabajo fueron suministrados por la empresa Meteorológica S.A.. Esta información procede del Centro Europeo para la Predicción a Medio Plazo (ECMWF) y está referenciada a una cuadrícula de 3x3 Km de resolución que cubre toda la península con datos diarios.

Estos datos fueron usados para estimar el estado hídrico del combustible muerto a través de índices meteorológicos de peligro. Se utilizaron el sistema de predicción de riesgo de incendio estadounidense (NFDRS), del cual se calcularon los índices meteorológicos de 1h y 10h, y el canadiense (CFFWI), con sus correspondientes códigos de humedad: FFMC, DMC y DC. Estos índices y códigos fueron calculados diariamente, desde marzo hasta octubre, dentro del período 2002-2004. En este estudio solamente se seleccionaron los índices correspondientes a los días en que se registraron las tormentas; estos fueron calculados para las cuadrículas de 3x3 Km.

Para poder ser utilizados con las otras variables de interés en el estudio fue necesario generalizar esta información, pasándola a la cuadrícula de 10x10 Km. que utiliza la base de datos de incendios de la DGB. Mediante la superposición de ambas capas de información se determinaron los valores máximos, medios y mínimos de los índices en cada cuadrícula de 10 Km. A estos índices se les aplicó un umbral del 90% como valor crítico a partir del cual se producen los incendios naturales, siguiendo la metodología propuesta por Nieto (2007).

3.1.3. Rayos

Los datos de descargas de rayos fueron cedidos por la empresa Meteorológica S.A. y proceden del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas MetOffice. La información sobre descargas incluye: fecha de observación (año/mes/día; hora/minutos/segundos) y ubicación espacial (X, Y). Estos datos se utilizaron, por un lado para determinar espacialmente el número de descargas producidas dentro de la cuadrícula 10x10 Km. de la DGB y, por otro lado para determinar temporalmente los días de tormentas durante el período de estudio (2002-2004). Para este estudio se consideró un día de tormenta aquél que ha registrado al menos un rayo cuando ha ocurrido un evento de precipitación.

3.1.4. Vegetación

Se utilizó el mapa del CORINE *Land Cover* de España del año 2000, cedido por el Instituto Geográfico Nacional, para generar a partir del mismo un mapa de cobertura forestal, utilizando la leyenda establecida por Nieto (2007). Se reclasificaron las 44 categorías del mapa original, en áreas no forestales y áreas forestales formando un total de 7 categorías ([tabla 1](#)).

Los resultados de este mapa de cobertura fueron ubicados dentro de la cuadrícula de 10 Km. de la DGB, representando la variable vegetación el porcentaje que ocupa cada categoría dentro de cada celda, incluyendo la zona no forestal.

3.1.5. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Se utilizó el MDT de 1.000 m. de resolución de la Base Cartográfica Nacional; la variable que se utilizó en el trabajo fue la altitud y la pendiente media dentro de la superficie forestal de la cuadrícula 10x10 Km. de la DGB. De la misma forma, se ubicaron dentro de la superficie forestal y la cuadrícula 10x10 Km. los porcentajes de ocupación espacial de cada orientación del terreno derivados del MDT: todos los vientos (TV), norte (N), noreste (NE), este (E), sureste (SE), sur (S), suroeste (SW), oeste (W), noroeste (NW).

3.1.6. Clima

Se usó el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica realizado por la Universidad Autónoma de Barcelona (Ninyerola, *et al.*, 2005). El mismo está conformado por diecisiete tipos de clima que se encuentran agrupados en cuatro clases; cada clase tiene siete, seis, cinco y cuatro niveles, respectivamente, del cual se utilizó el nivel cinco para incluirlo en el modelo de regresión ([figura 3](#)).

El clima se incluyó como una variable dicotómica o *dummy*, donde 1 indica la presencia y 0 la ausencia de un tipo de clima ([tabla 2](#)). Por ser estas variables cualitativas se requiere de una codificación numérica para ser incluida dentro del modelo. Sin embargo, de las cinco categorías climáticas sólo se utilizaron cuatro, para no caer en situaciones de multicolinealidad entre las categorías (Damodar, 2006).

3.2. Prueba U de Mann-Whitney

Una vez procesados los datos y obtenidas las variables para la construcción del modelo de predicción de ocurrencia del fuego de origen natural, fue necesario utilizar las variables que mejor explicaron el mismo, tal y como lo han señalado McRae (1992), Díaz *et al.* (2001), Anderson (2002), Dissing y Verbyla (2003) y Nieto (2007). De esta manera se eliminan las variables que son redundantes y las que aportan menos información.

Para seleccionar las variables con mayor explicación de ocurrencia de incendio en cada celda existen varias pruebas estadísticas que han sido utilizadas: *Kruskal-Wallis*, *U-Mann Whitney* y *Kolmogorov-Smirnov*, entre otras. Sin embargo, todas estas pruebas producen resultados similares (Wierzchowski, *et al.* 2002) por lo que se decidió utilizar la prueba no paramétrica *U-Mann Whitney*, con un nivel de significación de p-valor < 0,01.

En este sentido, se realizó un análisis espacio-temporal para tener una primera aproximación de la ocurrencia de incendios naturales en estas dos dimensiones.

Desde el punto de vista espacial se analizó la ocurrencia de un incendio para cada una de las celdas de 10 Km., con las variables presentadas en la [tabla 3](#). Mientras que en el análisis temporal se analizó la ocurrencia de incendio para los días que se generaron tormentas con una precipitaciones

por debajo de 2,54 mm., tal y como lo utilizaron Rorig y Ferguson (1999). Este análisis se efectuó para cada variable que aparece en la [tabla 3](#). Ambos análisis se realizaron para el periodo 2002-2004, y los meses de marzo a octubre.

Por su parte, el clima no se incluyó en la prueba estadística no paramétrica (*U-Mann Whitney*) ya que la característica de la misma no permite trabajar con variables *dummy*. Sin embargo, por considerarla una variable relevante en la ocurrencia de incendio por causa natural, se incluyó en el análisis para determinar, por un lado la cantidad de incendios ocurridos dentro de cada tipo de clima y, por otro lado, para ver la influencia de ésta directamente en el modelo logístico probabilístico.

Posteriormente se procedió a generar el modelo logístico a largo plazo, con las categorías de clima y con las variables de mayor explicación de ocurrencia de incendio desde el punto de vista espacial y temporal. Desde el punto de vista temporal se utilizaron los valores medios de las variables que caracterizan el estado hídrico de la vegetación, es decir, los índices meteorológicos.

3.3. Probabilidad logística

Una vez procesadas las variables se utilizó el modelo de probabilidad logística. Por su característica binaria en la variable dependiente (0 y 1), ha sido usado en muchos estudios para determinar la probabilidad de ausencia (0) o presencia (1) de incendio (Vasconcelos *et al.*, 2001; Chuvieco *et al.*, 2003; Wotton y Martell, 2005; Krawchuk *et al.*, 2006; Vilar *et al.*, 2007; Vilar, 2006; Nieto, 2007). La base del modelo es la siguiente función:

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

donde z es:

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k \quad [2]$$

Donde β_0 es el constante y β_1 n el factor de ponderación de la variable x_n . El resultado de la función $f(z)$ será un valor para cada celda entre 0 y 1 que estima la probabilidad de ignición.

Este modelo se aplicó utilizando como método de selección de variables significativas el de pasos hacia atrás, según el *estadístico de Wald*; el valor de corte utilizado para la clasificación de las celdas en la que al menos haya ocurrido un incendio fue la proporción de incendios ocurridos durante el periodo de estudio. Se tomó el 60% de las muestras para la realización del entrenamiento del modelo, mientras que el restante 40% se dejó para la validación.

Una vez que el modelo se generó, se aplicó a las variables de las cuadrículas de 10 Km. para obtener la cartografía de la ocurrencia de incendios de causa natural en la España peninsular.

4. Resultados

Los resultados del análisis espacial se señalan en la [tabla 4](#). Allí se observan las variables con diferencias significativa (p-valor < 0,01) entre las celdas en las que se ha producido al menos un incendio natural de las que no se han producido, éstas son: el número de rayos totales, exposición a todos los vientos, norte, sureste, suroeste, oeste, noroeste, bosque de coníferas (VEG1), bosque de frondosas (VEG2), bosque mixto de coníferas y frondosas (VEG3), pastizal (VEG5) y otras formaciones vegetales (VEG6).

De manera similar, en la [tabla 5](#) se muestran los resultados obtenidos del *test U Mann-Whitney* entre las tormentas que causaron incendio y las que no lo causaron. Con un valor de significación de p-valor < 0,01 encontramos el número de rayos producido durante la tormenta y los índices FFMCmáx, FFMCmedio, DMCmáx y DMCmedio, mientras que la variable precipitación no resultó significativa.

Las variables que resultaron significativas en el análisis espacial y temporal se combinaron con los diferentes tipos de clima en el modelo de regresión logística. En estas combinaciones se determinaron cuáles fueron las que mejor explicaron el fenómeno de ocurrencia de incendios, evitando que se relacionaran entre sí. De esta manera se consiguió el mejor modelo que explicó la ocurrencia de incendio para la España peninsular. Sus resultados se muestran en la [tabla 5](#) y su expresión matemática se señala en la ecuación 3:

$$P_{\text{España}} = \frac{1}{1 + \exp(-(-2,713 + 0,001 \cdot \text{RayosTotal} + 0,788 \cdot C \text{ lim } a1 + 0,5551\% C \text{ lim } a5 + 0,004 \cdot \text{DMCmedio})} \quad [3]$$

La [tabla 6](#) muestra las variables que resultaron significativas (p-valor < 0,01) dentro del modelo logístico. Asimismo, se observa que todas ellas influyen positivamente, sobresaliendo con mayor peso el clima oceánico o clima 1 (0,788) y el clima mediterráneo de montaña o clima 5 (0,551), seguido de los rayos totales (0,001) y el índice DMC medio (0,004).

La precisión global para las muestras del calibrado y validación fue del 63,54% y de 64,12%, respectivamente. Por su parte, los valores de la precisión en la ocurrencia de incendio para cada píxel fueron de 54,60% y de no ocurrencia de 66,85% en la muestra de validación ([tabla 7](#)).

Por otro lado, se aplicó el modelo a las cuadrículas de la DGB para obtener un resultado cartográfico y determinar las celdas con probabilidades de ocurrencia ([figura 4](#)). En este mapa se puede apreciar que las probabilidades más altas se encuentran ubicadas en la zona montañosa de la España peninsular, hacia la Cordillera Cantábrica (noroeste), Sistema Ibérico (norte), Cordillera Costera Catalana (noreste), los Pirineos (noreste), el Sistema Central y hacia las Cordilleras Béticas (sur).

Por su parte, los porcentajes de ocupación espacial de los incendios ocurridos entre los años 2002 hasta el 2004 en las diferentes zonas climáticas se observan en la [tabla 8](#). Allí se detalla que el clima mediterráneo de montaña tiene 39,91% del área que fue incendiada durante este período, el

oceánico 32,25%, el de montaña 27,78%, el mediterráneo litoral 25,44% y el mediterráneo continental 19,54%.

5. Discusión

Espacialmente, el número de descargas por cada celda a lo largo del período de estudio resultó ser significativo para la ocurrencia de incendio, lo que se interpreta que al aumentar el número de descargas aumenta la probabilidad de ocurrencia de incendio. Resultados parecidos los obtuvieron Nieto (2007) y Wierzchowski *et al.* (2002).

Por otro lado, la orientación del terreno resultó significativa en algunas de sus exposiciones (a todos los vientos, norte, noroeste, sureste y suroeste) debido a la complejidad del relieve que está conformado por mesetas, depresiones y sistemas montañosos. Esta complejidad del relieve en la Península es señalada también por Rivas *et al.* (2005) como responsable de la distribución de las actividades de los rayos.

Asimismo, la vegetación en la mayor parte de sus categorías resultó significativa, ya que se encuentra distribuida de manera heterogénea y asociada a la topografía en toda la Península, lo que hace que aumente la probabilidad de ocurrencia de incendios. Resultado parecido al de Díaz Avalos *et al.* (2001) al estudiar el efecto de la vegetación en la probabilidad de ignición.

Temporalmente, la cantidad de rayos por tormenta resultó significativa en la ocurrencia de incendios, contradiciendo los resultados de Rorig *et al.*, (1999, 2002) y Nieto (2007), donde se encontraron que esta variable resultó no significativa en la ocurrencia de incendios.

Respecto a la importancia de la variable precipitación, tanto mínima como media, asociada a las tormentas resultó no significativa para la ocurrencia de incendio, es decir, que a mayor actividad de rayos, mayor es la precipitación y menor la ocurrencia de incendios (Pineda, 2007).

Por su parte, los índices meteorológicos DMC y FFMC, tanto medio como máximo, resultaron significativos para la ocurrencia de incendio. El primero corresponde con los resultados obtenidos por Podur *et al.* (2003), Wotton *et al.* (2005) y Nieto (2007), mientras que el segundo corresponden con los resultados de Nash *et al.* (1996). Estos índices son importantes ya que representan el estado hídrico del material fino (FFMC) donde se inician los incendios y del mantillo orgánico (DMC), variables fundamentales para la predicción de la ocurrencia de incendio.

En el modelo, las variables con mayor peso fueron los tipos de clima oceánico (clima 1) y mediterráneo de montaña (clima 5), lo que indica que están muy relacionadas con la ocurrencia de incendio, ya que estos se localizan hacia la Cordillera Cantábrica, el Sistema Ibérico, los Pirineos, Sistema Central y las Cordilleras Béticas, zonas éstas donde ocurren las mayores cantidades de rayos en la España peninsular.

Por otro lado, las variables DMC medio y número total de rayos por celdas también influyen positivamente en el modelo generado. La primera corrobora los resultados obtenidos en la

prueba *U de Mann-Whitney*, mientras que la segunda corrobora el estudio de Podur *et al.* (2003), donde la probabilidad de ocurrencia de incendio aumenta con el número de rayos. Asimismo, estos rayos están relacionados con las zonas montañosas de la España peninsular, aumentando así la probabilidad de incendio en estas zonas. Esto afirma la relación existente entre la topografía y la ocurrencia de tormentas observada por Rivas Soriano *et al.* (2001, 2005), Dissing y Verbila (2003) y López Ruiz *et al.* (1996).

De igual manera, esta afirmación se refleja en los resultados de la cuantificación porcentual de los incendios ocurridos entre el 2002 y 2004, encontrándose que los climas con mayor incidencia de incendios (> 30% de superficie quemada) fueron el mediterráneo de montaña y el oceánico, seguidos del clima de montaña y mediterráneo litoral (entre 25% y 30% de superficie quemada).

6. Conclusiones

Esta investigación confirma la relación existente entre la topografía y las actividades de tormentas, así como el efecto de ésta con las probabilidades de ocurrencia de incendio causado por rayo dentro de la España peninsular.

El método de probabilidades logística generó como resultado la ocurrencia de incendio a largo plazo, herramienta para el diseño de planes de prevención y planificación de la lucha contra los incendios forestales en la España peninsular.

En el proceso de construcción del modelo se observan ciertas limitaciones a la hora de generar las variables, ya que las mismas proceden de datos espaciales con incertidumbres en la precisión de la ubicación, tal es el caso de los rayos. Se espera disponer de una base de datos de mayor calidad en futuras investigaciones.

Sería interesante probar con estos mismos datos otras metodologías de integración de variables para comparar los resultados, así como también ampliar el período de estudio.

Del mismo modo, parece de interés construir modelos de situación de la ocurrencia de incendios causados por rayo de carácter regional ya que se generarían diferencias en función de los distintos tipos de climas, una de las variables más críticas según los resultados del modelo.

No obstante, es necesario un mayor esfuerzo en la investigación ya que los modelos propuestos estiman con acierto el 60%, aproximadamente, de la realidad.

Referencias bibliográficas

- Anderson, K. (2002): "A model to predict lightning-caused fire occurrences", *International Journal of Wildland Fire*, 11(4), pp. 163-172.
- Bradshaw, B. S., y Deeming, J. E. (1983): *The 1978 National Fire Danger Rating System. Technical documentation*, General Technical Report INT-169. Ogden, Utah: USDA.

- Chuvieco, E., Allogower, B., y Salas, J. (2003): "Integration of physical and human factors in fire danger assessment", *World Scientific Publishing*, pp. 197-218.
- Chuvieco, E., y Salas, F. (2004): "Métodos para la integración de variables de riesgo", *Colección de Estudios Ambientales y Socioeconómicos*, 4, pp. 143-158.
- Díaz Avalos, C., Peterson, D. L., Alvarado, E., Ferguson, S. A., y Besag, J. E. (2001): "Space-time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon", *Canadian Journal of Forest Research*, 31(9), pp. 1579-1593.
- Damodar, G. (2006): *Principios de econometría*. Madrid, McGraw-Hill.
- Dirección General para la Biodiversidad (2007): *Estadística de incendios forestales*. [Consulta: 24-04-2009]. Disponible en:
http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios/
- Dissing, D. y Verbyla, D. L. (2003): "Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation", *Canadian Journal of Forest Research*, 33 770-784.
- Dolling, K., Chu, P., y Fujioka, F. (2005): "A climatological study of the Keetch/Byram drought index and fire activity in the Hawaiian islands", *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, pp. 17-27.
- Krawchuk, M. A., Cumming, S. G., Flannigan, M. D. y Wein, R. W. (2006): "Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest", *Ecology*, 87(2), 458-468.
- Larjavaara, M., Pennanen, J., y Tuomi, J. (2005): "Lightning that ignites forest fires in Finland", *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (3-4), pp. 171-180.
- Latham, D., y Williams, E. (2001): "Lightning and forest fires", *Forest fires. Behavior and ecological aspects* en E.A. Johnson y K. Miyanishi (Eds.). San Diego, California, Academic Press, pp. 375-418.
- López Ruiz, F. J., Pérez Puebla, F. y Gutiérrez Núñez, J. M. (1996): "Análisis de la distribución temporal y espacial de los rayos registrados por la red de detección del I.N.M. en el período de 1992-1995", *IV Simposio Nacional de Predicción I.N.M. Meteorológica* (Ed.) (14 pp). Madrid.
- Martín, M. P., Riaño, D., y Salas, F. J. (2003): "Cartografía de riesgo de incendio en la gestión de espacios naturales protegidos", *Colección de Estudios Ambientales*, pp. 81-105.
- McRae, R. (1992): "Prediction of areas prone to lightning ignition", *International Journal of Wildland Fire*, 2(3), pp. 123-130.
- Nash, C. H., y Johnson E.A. (1996): "Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests", *Canadian Journal of Forest Research*, 2(3), pp. 123-130.
- Nieto, H. (2007): *Análisis del peligro de incendio forestal debido a causas naturales: Elaboración de modelos de probabilidad de ocurrencia a corto y largo plazo para la comunidad de Madrid y Aragón*, Trabajo de investigación tutelado. Programa de doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección, Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares Madrid España (Sin publicar).
- Ninyerola, M., Pons, X, y Roure, J.M. (2005): "Atlas Climático Digital de la Península Ibérica", Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Pineda, N., Rigo, T., Bech, J., y Soler, X. (2007): "Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the north western mediterranean region", *Atmospheric Research*, 85(2), pp. 159-170.
- Podur, J., Martell, D. L., y Csillag, F. (2003): "Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998", *Ecological Modelling*, 164(1), pp. 1976-1998.

Rivas Soriano, L., de Pablo Dávila, F., y García, D., E. (2001): "Cloud-to-ground lightning activity in the Iberian peninsula: 1992-1994", *Journal of Geophysical Research*, 106(D-11), pp. 11891-11901.

Rivas Soriano, L., de Pablo, F., y Tomas, T. (2005): "Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian peninsula", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(16), pp. 1632-1639.

Rodríguez y Silva, F. (2002): "Visual forest fire weather index (VFFWI) a mathematical model for the prediction of forest fires weather danger in mediterranean ecosystems", *Forest Fires Research and Wildland Fire Safety: Proceedings of IV International Conference on Forest Fire Research D.X. Viegas*.

Rorig, M. L. y Ferguson, S. A. (1999): "Characteristics of lightning and wildland fire ignition in the pacific northwest", *Journal of Applied Meteorology*, 38(11), pp. 1565-1575.

Rorig, M. L., y Ferguson, S. A. (2002): "The 2000 fire season: Lightning-caused fires", *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), pp. 786-791.

Van Wagner, C. E. (1987): "Development and structure of the Canadian Fire Weather Index System", Forestry Technical Report 35, Canadian Forest Service, Ottawa.

Vasconcelos, M. J. P., Silva, S., Tomé, M., Alvim, M., & Pereira, J. M. (2001): "Spatial prediction of fire ignition probabilities: Comparing logistic regression and neural networks", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(1), pp. 73-83.

Vélez, R. (2000): *La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Madrid, McGraw-Hill.

Vilar, L. (2006): "Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgos humano de incendios forestales", *XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Granada (España).

Vilar, L., Gómez, I., Martín, M. P., y Martínez-Vega, F. J.(2007): "Análisis comparativo de los diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales", *IV International Wildland Fire*, 11(1), pp. 41-51.

Wierzchowski, J., Heathcott, M., y Flannigan, M. D. (2002): "Lightning and lightning fire, Central Cordillera, Canada", *International Journal of Wildland Fire*, 11(1), pp. 41-51.

Wotton, B. M., y Martell, D. L. (2005): "A lightning fire occurrence model for Ontario", *Canadian Journal of Forest Research*, 35(6), pp. 1389-1401.

TABLAS

Tabla 1. Tipos de cobertura forestal derivadas del mapa CORINE Land Cover 2000 de España

Código	Coberturas Forestales
0	No Forestal
1	Bosque de Coníferas
2	Bosque de Frondosas
3	Bosque Mixto de Coníferas y Frondosas
4	Matorral
5	Pastizal
6	Otras Formaciones Vegetales

Fuente: Adaptado de Nieto (2007).

Pacheco Angulo, C. E., Aguado Suárez, I. y Nieto Solana, H. (2009): "Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 232-249. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Codificación de los tipos de clima.

Código Píxel	Oceánico (Clima 1)	Mediterráneo Continental (Clima 2)	Montaña (Clima 4)	Mediterráneo de Montaña (Clima 5)
1	0	0	1	0
2	0	0	0	1
3	1	0	0	0
4	0	1	0	0
5	0	0	1	0
n	n	n	n	n

Tabla 3. Variables analizadas espacial y temporalmente.

Datos	Variables	Descripción	Tipo
MDT	Altitud Media	Altitud media de la superficie forestal de cada píxel	E S P A C I A L
	Pendiente Media	Pendiente media de la superficie forestal de cada píxel	
	Todo Viento (TV)	% de superficie forestal orientada a todos los vientos dentro de cada píxel	
	Norte (N)	% de superficie forestal orientada al norte dentro de cada píxel	
	Noreste (NO)	% de superficie forestal orientada al noreste dentro de cada píxel	
	Este (E)	% de superficie forestal orientada al este dentro de cada píxel	
	Sureste (SE)	% de superficie forestal orientada al sureste dentro de cada píxel	
	Sur (S)	% de superficie forestal orientada al sur dentro de cada píxel	
	Suroeste (SO)	% de superficie forestal orientada al suroeste dentro de cada píxel	
Corine land cover 2000	Oeste (O)	% de superficie forestal orientada al oeste dentro de cada píxel	
	Noroeste (NO)	% de superficie forestal orientada al noroeste dentro de cada píxel	
	Forestal	% de superficie forestal dentro de cada píxel	
	Bosque de Coníferas	% de superficie Bosque de Coníferas dentro de cada píxel	
	Bosque de Frondosas	% de superficie Bosque de Frondosa dentro de cada píxel	
	Bosque Mixto de Coníferas y Frondosas	% de superficie Bosque Mixto de Coníferas y Frondosas dentro de cada píxel	
	Matorral	% de superficie Matorral dentro de cada píxel	
Pastizal	% de superficie Pastizal dentro de cada píxel		
Rayos	Otras Formaciones Vegetales	% de superficie Otras Formaciones Vegetales dentro de cada píxel	
	Número de los Rayos	Número de descarga producidas en cada píxel	
Datos Meteorológicos	Número de los Rayos	Número de descarga producidas durante cada tormenta	T E M P O R A L
	Precipitación Mínima	Precipitación acumulada mínima registrada durante la tormenta dentro de la tesela	
	Precipitación Media	Precipitación acumulada media registrada durante la tormenta dentro de la tesela	
	FFMC Máximo	Valor máximo en el píxel del código FFMC calculado para cada tormenta	
	FFMC Medio	Valor medio en el píxel del código FFMC calculado para cada tormenta	
	DMC Máximo	Valor máximo en el píxel del código DMC calculado para cada tormenta	
	DMC Medio	Valor medio en el píxel del código DMC calculado para cada tormenta	
	DC Máximo	Valor máximo en el píxel del código DC calculado para cada tormenta	
	DC Medio	Valor medio en el píxel del código DC calculado para cada tormenta	
	1h Mínimo	Valor mínimo en el píxel del índice 1h calculado para cada tormenta	
	1h Medio	Valor medio en el píxel del índice 1h calculado para cada tormenta	
10h Mínimo	Valor mínimo en el píxel del índice 10h calculado para cada tormenta		
10h Medio	Valor medio en el píxel del índice 10h calculado para cada tormenta		

Tabla 4. Resultados del test U Mann-Whitney para las variables espaciales.

Variables	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	Sig. (p<0.01)
Num. Rayos	310710.000	673236.000	-7.003	0.000
Altitud Med.	379136.000	741662.000	-0.560	0.576
Pendiente Media	380913.000	743439.000	-0.392	0.695
TV	354753.000	764718.000	-3.770	0.000
N	333929.000	743894.000	-4.824	0.000
NE	363392.000	773357.000	-2.045	0.041
E	358729.500	721255.500	-2.483	0.013
SE	354103.500	716629.500	-2.918	0.004
S	368554.000	778519.000	-1.557	0.119
SW	348053.000	758018.000	-3.489	0.000
W	357408.000	767373.000	-2.608	0.009
NW	348900.000	758865.000	-3.410	0.001
Forestal	375103.500	737629.500	-0.939	0.348
VEG1	251514.500	614040.500	-12.601	0.000
VEG2	299218.500	709183.500	-8.100	0.000
VEG3	349877.000	712403.000	-3.469	0.001
VEG4	377821.000	787786.000	-0.683	0.494
VEG5	355858.000	765823.000	-2.753	0.006
VEG6	326095.000	736060.000	-5.636	0.000

Tabla 5. Resultados del test U Mann-Whitney para las variables temporales.

Variables	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	Sig.(p<0.01)
Num. Rayos	1,851,366.000	9,702,069.000	-11.740	0.000
PPmín	2,381,338.500	10,232,041.500	-0.955	0.340
PPmean	2,325,927.500	10,176,630.500	-1.263	0.207
FFMCmáx	2,274,539.000	10,125,242.000	-3.009	0.003
FFMCmean	2,286,775.500	10,137,478.500	-2.670	0.008
DMCmáx	2,274,220.000	10,124,923.000	-3.022	0.003
DMCmean	2,276,753.500	10,127,456.500	-2.948	0.003
DCmáx	2,337,491.000	10,188,194.000	-1.440	0.150
DCmean	2,300,612.000	10,151,315.000	-2.287	0.022
H1mín	2,377,473.000	3,101,679.000	-1.226	0.220
H1mean	2,310,145.000	10,160,848.000	-2.023	0.043
H10mín	2,377,473.000	3,101,679.000	-1.226	0.220
H10mean	2,310,151.500	10,160,854.500	-2.023	0.043

Tabla 6. Modelo logístico seleccionado para la probabilidad de ocurrencia a largo plazo.

	B	Wald	Sig.	Exp(B)
Rayos Total	0.001	54.914	0.000	1.001
Clima1	0.788	42.986	0.000	2.198
Clima5	0.551	15.014	0.000	1.734
DMC medio	0.004	50.351	0.000	1.004
Constante	-2.713	293.046	0.000	0.066

Tabla 7. Precisión en la ocurrencia de incendios naturales.

Calibrado 60%				Validación 40%			
	No Incendio	Incendio	Precisión		No Incendio	Incendio	Precisión
No Incendio	1556	808	65.82	No Incendio	1089	540	66.85
Incendio	323	415	56.23	Incendio	212	255	54.60
Precisión Global			63.54	Precisión Global			64.12

Tabla 8. Porcentaje de ocurrencia de incendios para el periodo 2002-2004 en las diferentes zonas climáticas.

Tipos de Clima		Ocurrencia de Incendios (%)	
		No Incendio (0)	Incendio (1)
C1	Oceánico	67.75	32.25
C2	Mediterráneo Continental	80.46	19.54
C3	Mediterráneo Litoral	74.56	25.44
C4	Montaña	72.22	27.78
C5	Mediterráneo de Montaña	60.09	39.91

FIGURAS

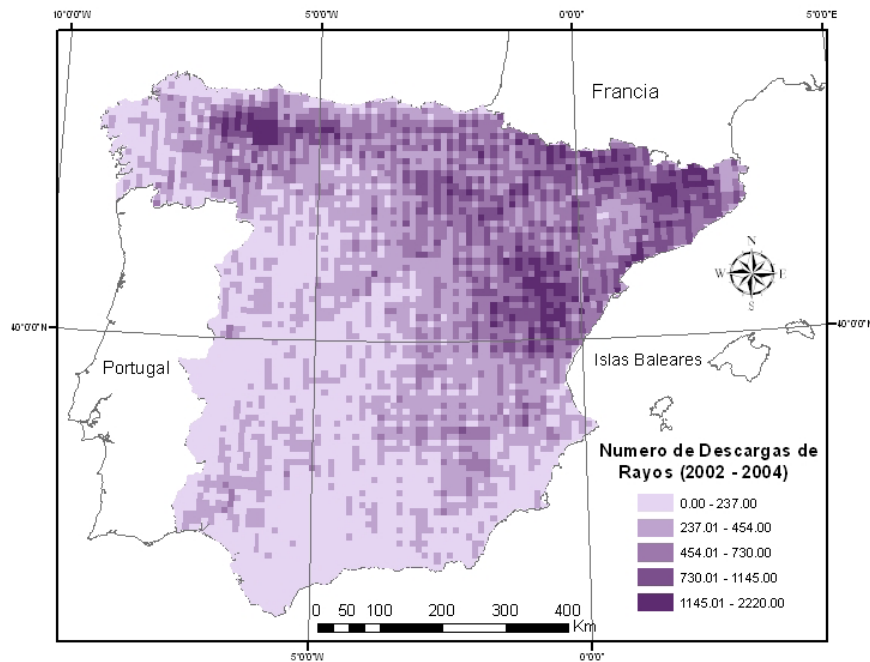


Figura 1. Número de descargas de rayos durante el período 2002-2004.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por Meteorológica S.A.

Pacheco Angulo, C. E., Aguado Suárez, I. y Nieto Solana, H. (2009): "Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 232-249. ISSN: 1578-5157

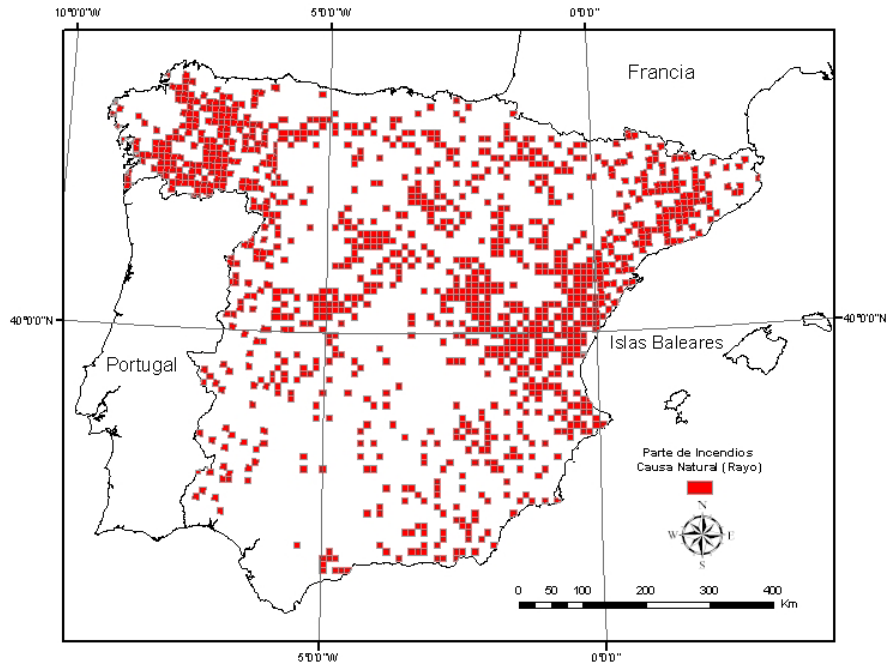


Figura 2. Distribución de los incendios por causa natural. Período 2002-2004.
Elaboración propia. Fuente: Dirección General de Biodiversidad.

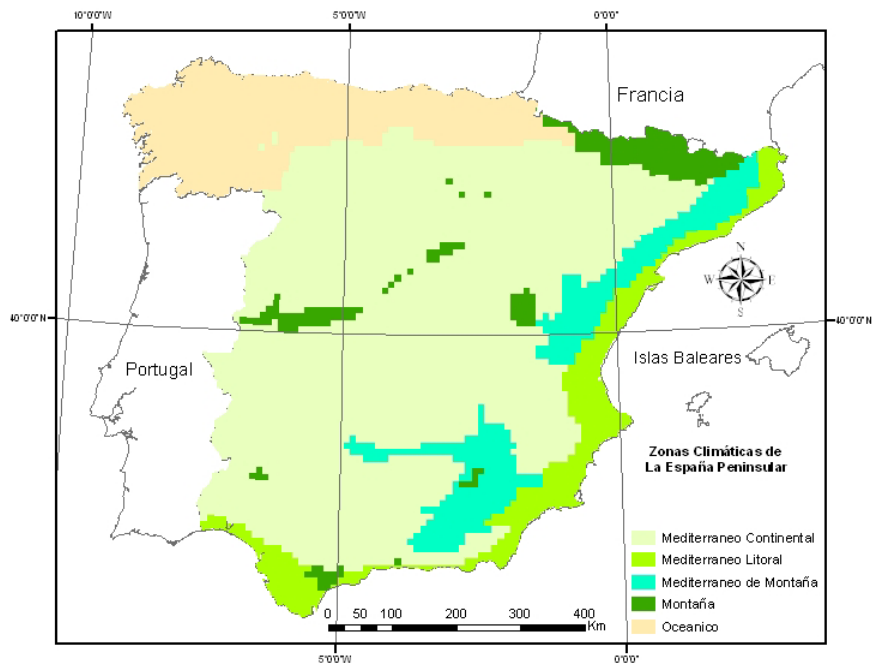


Figura 3. Mapa climático clasificado de la España peninsular.
Fuente: Universidad Autónoma de Barcelona.

Pacheco Angulo, C. E., Aguado Suárez, I. y Nieto Solana, H. (2009): "Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 232-249. ISSN: 1578-5157

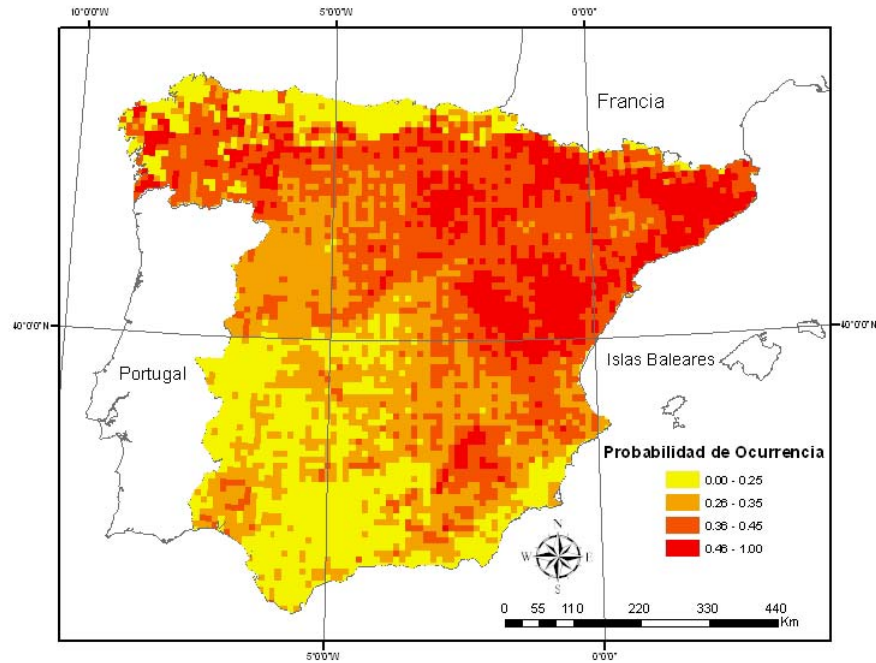


Figura 4. Modelo de probabilidad de ocurrencia a largo plazo para la España peninsular.