

ANÁLISIS DE LOS INCENDIOS FORESTALES CAUSADOS POR IMPACTOS DE RAYO EN MALLORCA

MARGALIDA RIBAS-MUNTANER ([id](#))¹
JULIÁN GARCÍA-COMENDADOR ([id](#))¹
JOSEP FORTESA ([id](#))¹
JAUME COMPANY ([id](#))¹
MAURICI RUÍZ ([id](#))²
JOAN ESTRANY ([id](#))¹

¹*Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team -MEDhyCON. Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa Km 7.5, 07122 Palma, Illes Balears, España*

²*Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció, Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team -MEDhyCON, Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa Km 7.5, 07122 Palma, Illes Balears, España*

Autor de correspondencia: ribasmargalida@gmail.com

Resumen. Este estudio presenta un análisis de las situaciones sinópticas y variables biofísicas asociadas a los incendios forestales causados por rayos en la isla de Mallorca. Se analizó la estacionalidad, distribución espacial y características de estos incendios durante el periodo 2010-2019; las situaciones sinópticas (500 hPa - 850 hPa) causantes de las tormentas eléctricas que iniciaron incendios. Finalmente, se aplicó el modelo probabilístico *Maxent* para establecer qué variables biofísicas determinan la susceptibilidad territorial a sufrir este tipo de fenómenos, determinando las zonas de mayor vulnerabilidad. Los resultados señalan el verano como la estación más propensa a estos incendios, asociados a tres situaciones sinópticas: (i) tormenta asociada al paso de una línea frontal, (ii) tormenta de inestabilidad centrada o (iii) tormenta seca. Los usos del suelo y la pendiente fueron las variables de mayor relevancia a la hora de determinar las zonas con mayor probabilidad de verse afectadas por incendios causados por rayos. El mapa probabilístico indicó que son áreas próximas a zonas montañosas con pendientes suaves, ocupadas por usos agroforestales o forestales. Definir las condiciones atmosféricas que pueden generar incendios y determinar las zonas que potencialmente pueden verse afectadas es relevante en estrategias de prevención y gestión de estos riesgos naturales.

Palabras clave: incendios forestales, rayo, tormentas eléctricas, islas mediterráneas.

ANALYSIS OF FOREST FIRES CAUSED BY LIGHTNING STRIKES IN MALLORCA

Abstract. This study presents an analysis of the synoptic situations and biophysical variables associated with forest fires caused by lightning bolts on the island of Mallorca. The seasonality, spatial distribution and characteristics of these fires during was analysed during the 2010-2019 period; in addition to the synoptic situations (500 hPa - 850 hPa) that caused the fires. The Maxent probabilistic model was applied to establish the biophysical variables that determine the territorial susceptibility to suffer this type of phenomena, defining most vulnerable areas. Summer is most fire-prone season, associated with three synoptic situations (i) storm associated with the passage of a frontal line, (ii) storms of centred instability or (iii) dry storms. Land use and slope were the most relevant variables to determine the area's most likely to be affected by lightning fires. The probabilistic map indicated that these areas are close to mountainous areas with gentle slopes, occupied by agroforest or forest uses. The definition of atmospheric conditions prone to generate lightning fires and the determination of potentially affected areas is relevant in prevention and management strategies for these natural risks.

Keywords: forest fires, lightning bolt, lightning storms, Mediterranean islands.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son una perturbación natural en los sistemas forestales mediterráneos (Plana *et al.*, 2016), lo que ha dado lugar a comunidades vegetales con un elevado grado de adaptación, por lo tanto, especies con una mayor resiliencia frente al fuego (Mataix-Solera y Guerrero, 2014; Bodi *et al.*, 2012). Los bosques mediterráneos representan el 85% de la superficie anual quemada en Europa (Pineda y Rigo, 2017). La generación y posterior expansión de estos incendios está condicionado por una serie de factores como la meteorología, la topografía, la cantidad y distribución del combustible forestal (Plana *et al.*, 2016). Durante las últimas décadas, estos factores han sido alterados por procesos de cambio global, principalmente cambio en los usos del suelo y del cambio climático. El cambio en los usos del suelo ha generado dinámicas de forestación natural, aumentando la cantidad, densidad y continuidad de la vegetación y, por lo tanto, de combustible disponible. De esta forma, se incrementa el riesgo de incendios más severos y extensos (Estrany y Gago, 2019). Además, la expansión de las zonas residenciales hacia zonas forestales y el consecuente incremento de la interfaz urbano-forestal, aumentan significativamente el riesgo de incendio. Por otro lado, la cuenca mediterránea es una de las zonas más vulnerables frente al cambio climático por el previsible aumento en las temperaturas y de la extensión y recurrencia de los episodios de sequía, lo que incrementa la probabilidad de ocurrencia de incendios (Pineda *et al.*, 2017). Todos estos procesos provocan alteraciones en el régimen de incendios pudiendo aumentar su recurrencia e intensidad.

Los incendios forestales ocasionados por causas naturales normalmente responden al impacto de un rayo durante una tormenta eléctrica. De forma específica, son considerados la principal causa de ignición en los bosques de todo el mundo, son responsables del 5% de los incendios forestales de la cuenca mediterránea (Pineda y Rigo, 2017) y del 3,9% de los incendios del Estado Español (Nieto *et al.*, 2012). El clima, el tipo de vegetación, la topografía y las características de los rayos son variables que juegan un papel fundamental en la distribución espaciotemporal de estos (Vecín-Arias *et al.*, 2016; García-Ortega *et al.*, 2011).

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Existen muy pocos estudios que analicen incendios ocasionados por el impacto de un rayo en los territorios insulares del Estado español. En el caso de Mallorca, algunos autores como (Ruiz *et al.*, 2010) y (Tomàs-Burquera y Gelabert, 2014) han tratado aspectos relacionados con las tormentas y las descargas eléctricas, vinculadas a otras variables como usos del suelo, topografía o variables meteorológicas, entre otras. Estudios que, aun estar relacionados, no se encuentran vinculados directamente a los incendios.

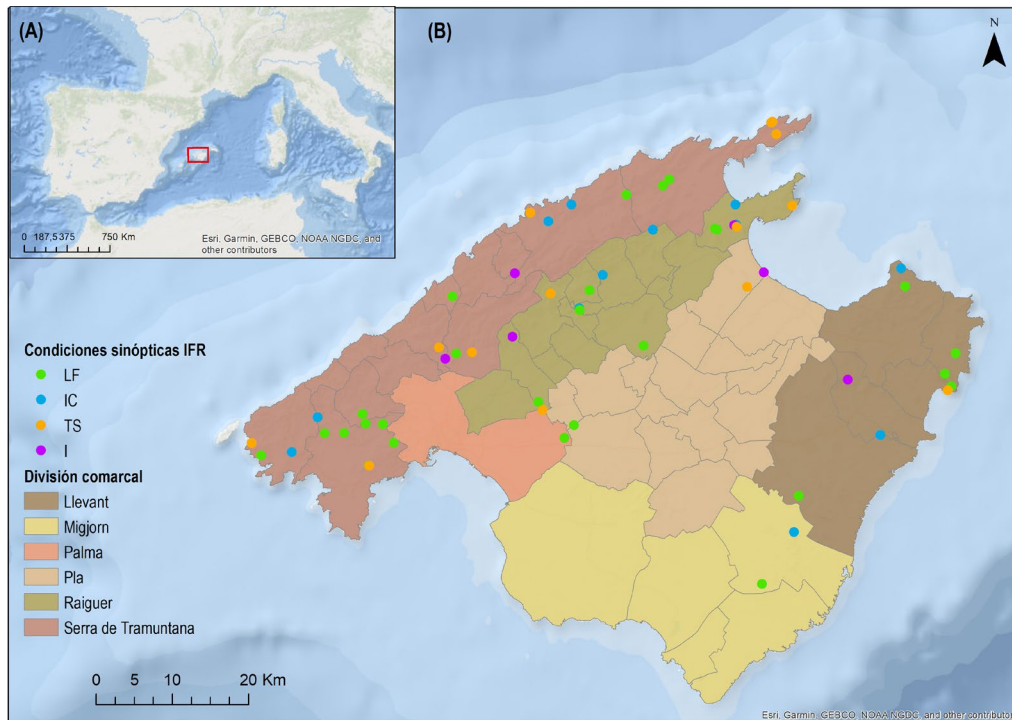
El objetivo general del trabajo es el análisis y clasificación de las situaciones sinópticas que generan las tormentas eléctricas, responsables de los incendios forestales naturales, para el periodo 2010-2019. Específicamente, se pretende: (i) caracterizar los incendios en función de la estacionalidad, distribución y localización, y posibles diferencias en relación a incendios ocasionados por diferentes causas (2010-2019); (ii) definir patrones de las variables meteorológicas (i.e. precipitación, humedad, temperatura y viento) en función de la clasificación sinóptica; (iii) elaborar un mapa de probabilidad de ocurrencia de incendio forestal generado por caída de rayo en función de diferentes variables biofísicas (i.e. topografía y usos del suelo).

3. ÁREA DE ESTUDIO

La isla de Mallorca se encuentra situada en el Mediterráneo occidental, al este de la Península Ibérica, siendo la isla más grande del archipiélago balear (Figura 1). Posee una superficie de 3.640 km² y su estructura geomorfológica se caracteriza por la presencia de la Sierra de Tramuntana, con los relieves más elevados; y las sierras de Levante que limitan con el llano central y en su centro afloran las sierras Centrales. Cuenta con un clima mediterráneo, condicionado por factores topográficos y las anomalías térmicas del Mediterráneo occidental. La estación seca destaca por temperaturas estivales elevadas, y por un marcado déficit hídrico. Los usos del suelo predominantes en la Isla son forestales, destacando pinares y encinares;

la maquia de acebuche y la vegetación de alta montaña, principalmente matorral. La tendencia mediterránea a un régimen determinado de incendios determina la presencia de especies pirrófitas y pirófilas con mecanismos de regeneración y germinación (Estrany y Gago, 2019). La ocupación territorial de la vegetación forestal se ha visto condicionada por la ocupación e influencia ejercida por parte de la sociedad humana y sus actividades. Des de la segunda mitad del siglo XX, se ha producido un cambio de modelo económico, propiciando una transición forestal, marcada por la forestación natural y expansión de los bosques en campos de cultivo abandonados y zonas marginales, favoreciéndose el incremento de la biomasa y la continuidad forestal del paisaje.

Figura 1. Área de estudio



Leyenda: (A) Localización de Mallorca en la cuenca del mediterráneo occidental. (B) Localización de los incendios en función de su clasificación sinóptica y de la división comarcal de la Isla. La leyenda de las condiciones sinópticas indica: LF (tormentas asociadas al paso de una línea frontal), IC (tormentas de inestabilidad centrada), TS (tormentas secas) e I (tormentas indefinidas). Fuente: IBANAT. Elaboración propia.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración del trabajo se ha generado una base de datos de 59 incendios ocurridos durante el periodo 2010-2019 en Mallorca. Se dispone de información proporcionada por el Instituto Balear de la Naturaleza (IBANAT), relativa a: localización; fecha; hora de detección, control y extinción; superficie forestal afectada (arbolada y no arbolada) y datos meteorológicos (precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento y humedad). La información meteorológica (precipitación, temperatura y viento) fue ampliada con datos extraídos de [Datos Clima](#) a partir de las estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), más cercanas a cada incendio.

El análisis y clasificación de las condiciones sinópticas, responsables de la formación de las tormentas eléctricas, se llevó a cabo de forma manual e individualizada partir del modelo de predicción meteorológico GFS a través de [Wetter3](#). Se identificaron los centros de acción presentes (anticiclones, dorsales, borrascas y vaguadas), su ubicación y movimiento, mediante el análisis de tres capas: 500 hPa y 850 hPa geopotencial y temperatura, y 850 hPa temperatura. También se analizaron las capas de precipitación acumulada y presencia de nubes en aquellos casos donde existía dudas a la hora de clasificar. Finalmente, en función de los resultados, se elaboró una clasificación en 3 tipologías: (i) tormentas asociadas al paso

de una línea frontal (LF); (ii) tormentas de inestabilidad centrada (IC) y (iii) tormentas secas (TS). Los casos que no coinciden con las situaciones anteriores fueron clasificados como indefinidas (I).

Las variables meteorológicas han sido tratadas estadísticamente mediante el software IBM SPSS Statistics para analizar su capacidad a la hora de definir la clasificación sinóptica previamente elaborada (LF, IC y TS). En primer lugar, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (muestra > 50 casos) para cada variable y situación sinóptica, y así contrastar la normalidad del conjunto de datos. Posteriormente, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comprobar la capacidad discriminadora de cada variable entre las diferentes categorías sinópticas.

La ubicación potencial de los incendios se encuentra vinculada a las variables biofísicas y estas pueden analizarse mediante la creación de un mapa de probabilidad a partir del software MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). MaxEnt es un modelo de máxima entropía que permite relacionar variables cuantitativas y cualitativas. Opera mediante la selección de una serie de puntos para crear un mapa de probabilidad, llamada entrenamiento, y el 25% restante para la validación del propio modelo, llamada prueba. Los puntos de prueba son seleccionados de forma aleatoria, pero con preferencia sobre aquellas zonas con mayor probabilidad. La información utilizada para la creación del modelo fue: la localización de los incendios forestales ocasionados por rayos, a partir de ahora IFR, (2010-2019); la elevación, pendiente y orientación (*eastness* y *northness*) a partir del MDT 25m; y los usos del suelo a partir del Corine Land Cover del 2006. El mapa resultante posee el formato de salida *Logistic* que combina el formato *Cumulative* y *Raw*, y representa la probabilidad de 0 a 1 para cada píxel.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características generales de los incendios ocasionados por rayos

En el periodo 2010-2019 se registraron 695 incendios forestales, siendo los incendios ocasionados por rayo la tercera causa de origen con 60 casos (8,63% del total). Estos incendios presentan una cierta estacionalidad entre los meses de junio y septiembre (Figura 2), siendo agosto y septiembre los meses con más incendios, 15 en cada caso. El periodo coincide con la temporada de mayor riesgo de incendios en la Isla establecida por el Gobierno de las Islas Baleares, entre el 1 de mayo y el 15 de octubre, y con el periodo de mayor actividad de IFR en España registrado entre el mes de mayo y setiembre (Nieto *et al.*, 2012; Conedera *et al.*, 2006; Pineda y Rigo, 2017; Rivas Soriano *et al.*, 2005). Este comportamiento estacionario puede venir definido por tres motivos: (i) la generación de tormentas eléctricas vinculadas a situaciones de inestabilidad ocasionadas por el ciclo anual de temperatura del aire superficial (Rivas Soriano *et al.*, 2005); (ii) los veranos secos, calurosos y con déficit hídrico del mediterráneo, que facilitan la posibilidad de encontrar combustible seco, óptimo para la ignición (Pineda y Rigo, 2017) y, (iii) un máximo en el registro de descargas eléctricas sobre Mallorca entre agosto y setiembre (Ruiz *et al.*, 2010). Por otro lado, también experimentan un comportamiento horario (Figura 2) relacionado con el ciclo de insolación diurno en respuesta a su actividad convectiva (Rivas Soriano *et al.*, 2005; Pineda *et al.*, 2014) y un máximo durante las horas donde se registran las temperaturas máximas en verano (15-16 h) con 22 incendios (39%). Finalmente, poseen la capacidad de generar más de un incendio durante el mismo evento. Una característica vinculada a la generación de múltiples descargas durante las tormentas eléctricas y a su circulación sobre el territorio, pudiendo aumentar la peligrosidad vinculada a la limitada capacidad de los servicios de extinción para atender más de un foco en diferentes ubicaciones de manera simultánea.

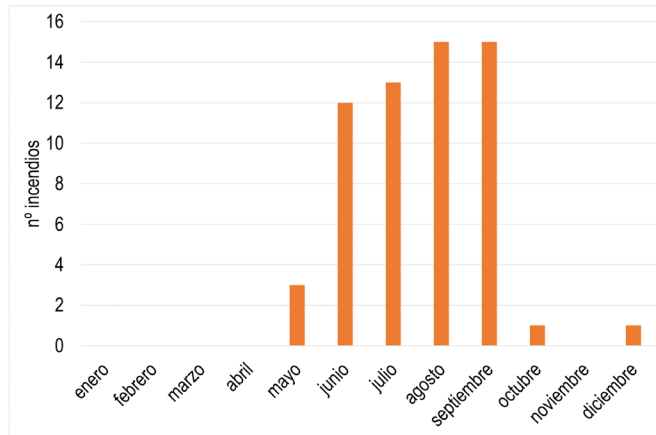
5.2. Características sinópticas y meteorológicas

El análisis de las condiciones sinópticas permite elaborar una clasificación en tres grandes grupos: tormentas asociadas al paso de una línea frontal, tormentas de inestabilidad centrada y tormentas secas, asociadas a una entrada de aire cálido inestable del norte de África. Destacan las LF con 27 casos, las TS con 14 y las IC con 12 incendios.

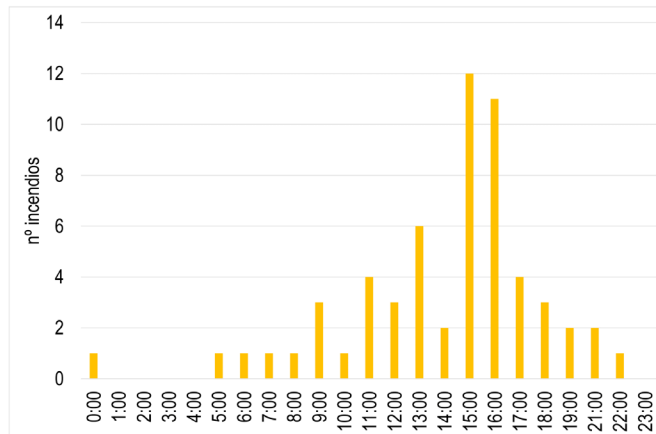
1) Tormentas asociadas al paso de una línea frontal (LF; Figura 3A y 3B). La formación de estas tormentas se encuentra asociada a la inestabilidad derivada del paso de una línea frontal detectable, en forma de vaguada, a todos los niveles atmosféricos o, únicamente, al nivel de 500 hPa. El aire frío encapsulado en la vaguada desplaza el aire cálido presente, creando diferencias de temperatura entre la parte superior e inferior de la atmósfera, ocasionando una situación de inestabilidad.

Figura 2. Comportamiento estacional y horario de los IFR

(A)



(B)

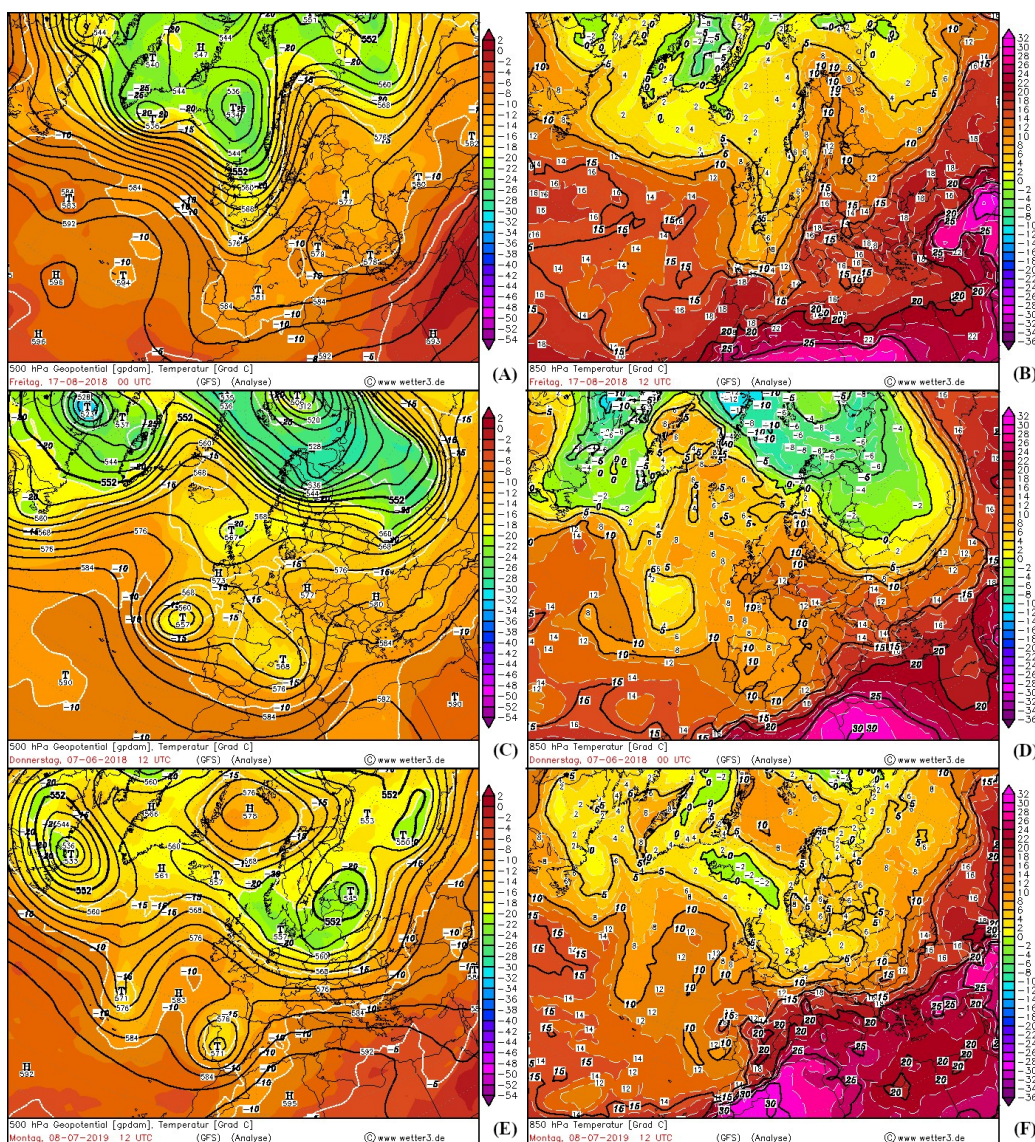


Leyenda: (A) Comportamiento estacional de los IFR para el periodo 2010-2019 (n=59). (B) Comportamiento horario de los IFR para el periodo 2010-2019 (n=59). Fuente: IBANAT. Elaboración propia.

2) Tormentas de inestabilidad centrada (IC; Figura 3C y 3D). La formación responde a la presencia de una vaguada dentro de la cual se aísla una baja o centro de circulación cerrado, por una o más isobaras. La borrasca se encuentra centrada sobre el archipiélago balear y es detectable al nivel de 500 hPa y 850 hPa. Viene acompañada de una bajada local de las temperaturas.

3) Tormentas secas (TS; Figura 3E y 3F). Las tormentas secas se asocian a la entrada de aire cálido inestable del norte de África hacia latitudes más elevadas y poseen el perfil vertical atmosférico más complejo. Su formación responde a la presencia, a 500 hPa, de una vaguada que puede presentar un centro de circulación cerrado y un eje sobre el océano Atlántico o la Península Ibérica, acompañada de aire frío procedente del norte; juntamente con una dorsal que se extiende desde el norte de África hacia el Mediterráneo central. La parte delantera de la vaguada se localiza sobre las Baleares con una circulación de viento del SW. Al nivel de 850 hPa se detecta una entrada de una masa africana de aire cálido y seco acompañado de polvo sahariano. En superficie la presión suele ser baja.

Figura 3. Clasificación de las condiciones sinópticas asociadas a las tormentas eléctricas



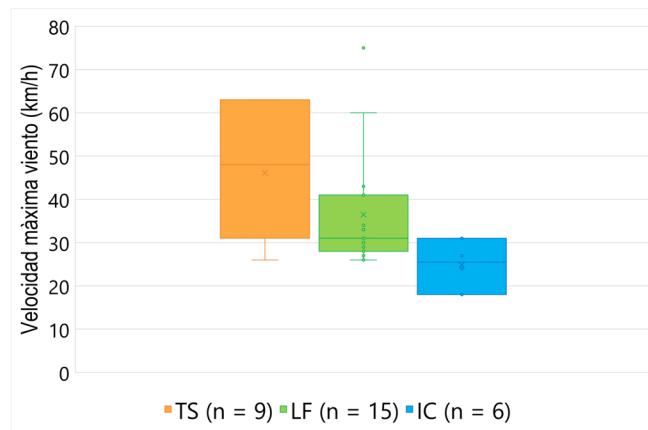
Leyenda: (A) Presión y temperatura a 500 hPa de la LF del IFR del 17/06/2018. (B) Temperatura a 850 hPa de la LF del IFR del 17/06/2018. (C) Presión y temperatura a 500 hPa de la IC del IFR del 07/06/2018. (D) Temperatura a 850 hPa de la IC del IFR del 07/06/2018. (E) Presión y temperatura a 500 hPa de la TS del IFR del 08/07/2019. (F) Temperatura a 850 hPa de la LF del IFR del 08/07/2019. Fuente: Wetter3 (<https://www.wetter3.de/>)

Finalmente, el análisis estadístico de las variables meteorológicas expone que la velocidad máxima del viento (Figura 4) es la única variable con un comportamiento diferente en función de cada situación sinóptica. Las TS registran los valores más elevados con 48 km h^{-1} , permitiendo acentuar su peligrosidad; seguidas de las LF con 31 km h^{-1} y IC con $25,5 \text{ km h}^{-1}$. En cambio, las variables de precipitación, humedad y temperatura no experimentan diferencias significativas al poseer comportamientos similares en las tres clasificaciones.

La clasificación previamente elaborada, únicamente, muestra la formación de situaciones de inestabilidad, pero no permite analizar qué elementos fomentan el ascenso de aire para la formación de las tormentas eléctricas. En los casos de LF e IC pueden relacionarse con las tormentas relacionadas con la entrada de brisas, formadas a partir de una situación de convergencia de viento en el interior de Mallorca. Estas suelen afectar las comarcas del Pla, Llevant y Migjorn de la Isla y se registran al mediodía y por la tarde (Tomàs-Burguera y Gelabert, 2014). Por otro lado, las TS son definidas como las situaciones más peligrosas a consecuencia de los fuertes vientos registrados (Figura 4) y a la entrada de aire cálido, que

permite alcanzar temperaturas más elevadas favoreciendo la generación de incendios (Augusto et al., 2020). También se relacionan con el efecto Föhn. Dicha tipología ya ha sido definida en algunas clasificaciones como en la realizada por Font donde es definida como la tipología 5. IZE Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular (Santos Burguete et al., 2019)

Figura 4. Velocidad máxima del viento registrada durante el día del incendio



Fuente: Datos Clima (<https://datosclima.es/>). Elaboración propia.

5.3. Características biofísicas

Los IFR, en comparación con otras causas de origen, son definidos como incendios puntuales y relativamente pequeños. Difícilmente llegan a quemar una hectárea, pero si la situación se complica pueden afectar superficies más grandes como en el caso de Escorca (8/7/2019) con 75,3 ha, y Alcudia (7/6/2014) con 19,3. Su localización se centra en zonas de relieve como la comarca de la Sierra de Tramuntana, del Raiguer y de Llevant, respectivamente. Además de una acumulación de estos en los extremos norte, este y oeste de la Isla. La mayor parte afectan áreas ocupadas por bosques, vegetación arbustiva y herbácea y espacios abiertos con poca o sin vegetación. Cabe destacar que la clasificación sinóptica no experimenta ninguna relación en función de la distribución, superficie o usos del suelo.

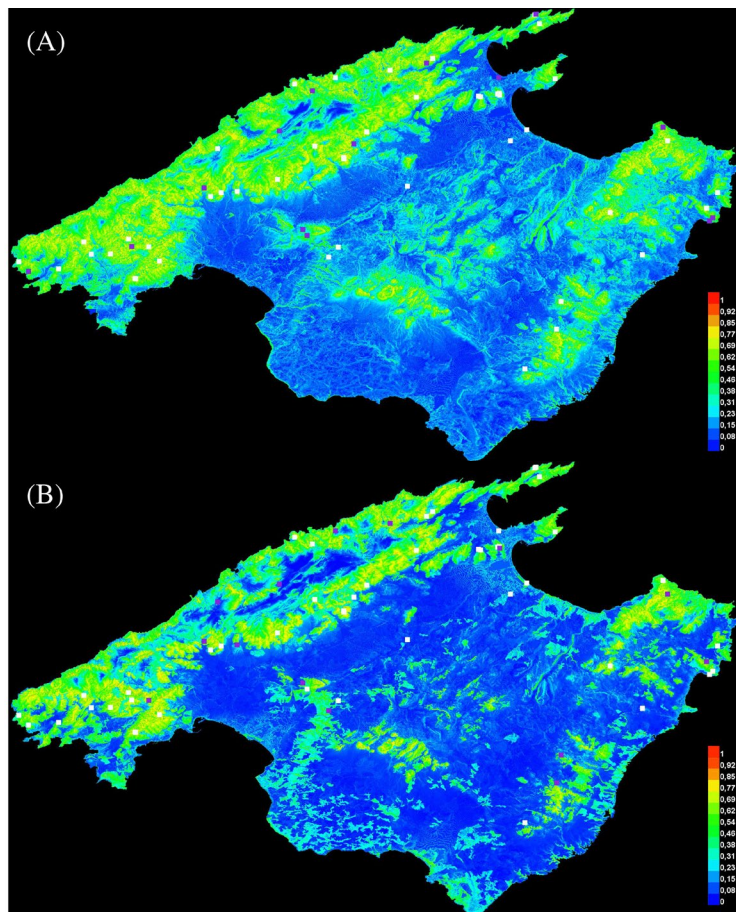
5.3.1. Modelo de probabilidad

El modelo de MaxEnt define la pendiente y los usos del suelo como las variables más vinculadas al desarrollo de estos incendios y más relevantes a la hora de definir las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia. La combinación de las variables topográficas muestra la elevada contribución de la pendiente al modelo, con un 82%, seguido de la elevación 11,6% y las orientaciones *eastness* 6,5% y *northness* 0%. Posteriormente, la incorporación de la variable cualitativa de los usos del suelo reajusta las contribuciones de las variables y destacan el pendiente con un 54,7% y los usos del suelo con un 35,1%. La incorporación de la nueva variable permite ajustar la localización de las zonas con una mayor probabilidad de verse afectadas (Figura 5), y estas son las que poseen un pendiente suave (10-20°), una elevación alrededor de los 400 m, una orientación al este máxima y ocupadas por bosques de coníferas o sistemas agroforestales. También destacan los mosaicos de cultivos, bosques mixtos y pastos naturales. Estas áreas (Figura 5) se localizan de forma concreta en las vertientes norte y sur de la Sierra de Tramuntana y sus extremos este y oeste el macizo de Randa y las Sierras de Levante, sobre todo la zona este.

En primer lugar, las variables topográficas más significativas son la pendiente y la elevación, ambas experimentan un comportamiento negativo perdiendo probabilidad a medida que aumentan. La pendiente contrasta con otros estudios donde la probabilidad se asocia a pendiente más pronunciadas (Vecín-Arias et al., 2016; Conedera et al., 2006). Por otro lado, la elevación disminuye la probabilidad a partir de los 400 m pudiendo estar relacionado con la disminución de la temperatura y aumento del volumen de precipitación en función de la elevación juntamente con el límite ecológico altitudinal de los bosques (Vecín-Arias et al.,

2016). Aun así, contrasta con el aumento de la densidad de rayos en función de la altitud (Vecín-Arias et al., 2016). En segundo lugar, en función de las comunidades vegetales, las zonas boscosas poseen una mayor probabilidad debido a: (i) la mayor presencia de combustible y la alta inflamabilidad de las especies de coníferas y de su sotobosque (Pineda y Rigo, 2017; Pacheco et al., 2009; Vecín-Arias et al., 2016), y (ii) la presencia de un albedo más bajo aumentando la energía disponible para flujos de calor latente. En los sistemas agroforestales, las especies forestales suelen ser arbóreas y son estas las vinculadas al fuego debido a la baja inflamabilidad y cantidad de combustible de las especies agrícolas. Finalmente, en la localización de los incendios también se debe tener en cuenta el gradiente de descargas eléctricas de la Isla que disminuye de norte a sur, siendo mayor en el centro y mitad norte en verano, y en el norte de ambas Sierras en otoño (Guijarro y Heredia, 2004; Ruiz et al., 2010).

Figura 5. Modelos probabilísticos de MaxEnt



Leyenda: (A) Modelo de MaxEnt elaborado a partir de las variables topográficas (elevación, pendiente, *northness* y *eastness*). (B) Modelo de MaxEnt elaborado a partir de las variables topográficas (elevación, pendiente, *northness* y *eastness*) y usos del suelo (Corine Land Cover 2006). La leyenda indica el rango de probabilidad del 0 al 1 con colores que van del azul marino al rojo. Las zonas con una mayor probabilidad se encuentran representadas en rojo y aquellas con una probabilidad nula en azul marino. Aquellos colores más cálidos (verde-rojo) indican valores por encima del 0,5 y aquellos más fríos (azul marino -verde claro) indican valores por debajo de 0,5. Fuente: IBANAT, MDT 25m IGN y Corine Land Cover 2006. Elaboración propia.

6. CONCLUSIÓN

Los IFR en Mallorca, aun ser considerados escasos y afectar superficies habitualmente pequeñas, son eventos de gran importancia debido a su coincidencia con el periodo de mayor riesgo de incendio. En primer

lugar, la definición de tres situaciones sinópticas permite conocer tres escenarios óptimos para la formación de tormentas eléctricas siendo mayor su probabilidad de ocurrencia, aun así no asegura su formación debido a la intervención de otros factores como: forzamiento del aire para la formación de la tormenta y variables biofísicas favorables a la ignición. En segundo lugar, el modelo MaxEnt permite ilustrar el papel de las variables biofísicas, consiguiendo un mayor ajuste mediante la combinación de las variables topográficas y usos del suelo; y generar una aproximación en la definición de las zonas con características más idóneas y una mayor vulnerabilidad. Este modelo abre las puertas hacia una futura mejora en el estudio de la ocurrencia de dichos eventos y en su cartografía. Finalmente, la unión entre el análisis sinóptico y la modelización biofísica se muestra como una herramienta útil para los servicios de prevención, control y extinción de incendios. Permite incrementar la alerta ante una mayor probabilidad de ocurrencia en función del escenario sinóptico y focalizar la atención en aquellas zonas más susceptibles. Aporta información importante para los planes de gestión, defensa o actuación frente a incendios forestales en las Islas Baleares.

REFERENCIAS

- Augusto, S., Ratola, N., Tarín-Carrasco, P., Jiménez-Guerrero, P., Turco, M., Schuhmacher, M., Costa, S., Teixeira, J. P., Costa, C. (2020). Population exposure to particulate matter and related mortality due to the Portuguese wildfires in October 2017 driven by storm Ophelia. *Environment International*, 144, 106056. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106056>
- Bodi, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, 33–56. <https://doi.org/10.21138/bage.2058>
- Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, G. B., Zumbunnen, T., Spinedi, F. (2006). Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. *Forest Ecology and Management*, 234, S68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.096>
- Estrany, J., Gago, J. (2019). Incendis forestals i riscos de desertificació en un context de canvi global. In J. Estrany, J. Gago (Eds.), *Gestió ambiental post-incendi forestal. Monitoratge i control de processos ecogeomorfològics amb tecnologies de precisió* (pp. 1–21).
- García-Ortega, E., Trobajo, M. T., López, L., Sánchez, J. L. (2011). Synoptic patterns associated with wildfires caused by lightning in Castile and Leon, Spain. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 851–863. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-851-2011>
- Gujjarro, José A., Heredia, M. A. (2004). Climatología de descargas eléctricas nube-tierra en las Islas Baleares. *Revista de Climatología*, 4, 9–19. <https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/3725/1/reclim04b.pdf>
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C. (2014). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno Activa*, 5, 59–67. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130>
- Nieto, H., Aguado, I., García, M., Chuvieco, E. (2012). Lightning-caused fires in Central Spain: Development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162–163, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.002>
- Pacheco, C., Aguado, I., Nieto, H. (2009). Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 9, 232–249.
- Pérez, M. R., Tomás-Burguera, M., Riera, C. M., Pou, L. S., Gelabert, M. G. (2012). Climatología de descargas eléctricas en Mallorca y su relación con las precipitaciones intensas (1944-2010). In *Cambio climático. Extremos e impactos: [Ponencias presentadas al VIII Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología]* (pp. 951-960). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Pineda, N., Rigo, T. (2017). The rainfall factor in lightning-ignited wildfires in Catalonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.016>
- Pineda, N., Montanyà, J., Van der Velde, O. A. (2014). Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. *Atmospheric Research*, 135–136, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.07.011>

- Plana, E., Font, M., Serra, M., Borràs, M., Vilalta, O. (2016). El fuego y los incendios forestales en el Mediterráneo, la historia de una relación entre bosques y sociedad. *Cinco mitos y realidades para saber más. Cataluña, España. Ediciones CTFC.*
- Rivas Soriano, L., de Pablo, F., Tomas, C. (2005). Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(16), 1632–1639. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.019>
- Santos Burguete, C., Subías Díaz-Blanco, Á., Roa Alonso, A. (2019). Recuperación de la clasificación sinòptica de Font: reconstruida con el reanálisis ERA40. *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents*, 1–45.
- Tomàs-Burguera, M., Gelabert, M. G. (2014). Actividad tormentosa, marítima, litoral y micro continental en ámbitos insulares. Un análisis geográfico aplicado a Mallorca. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 66, 125–142. <https://doi.org/10.21138/bage.1783>
- Vecín-Arias, D., Castedo-Dorado, F., Ordóñez, C., Rodríguez-Pérez, J. R. (2016). Biophysical and lightning characteristics drive lightning-induced fire occurrence in the central plateau of the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, 225, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.003>