



RISCOS

territorium 32 (N.º Especial), 2025, 159-178

journal homepage: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>

DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_32-extra1_13

Artigo científico / Scientific article



IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PATRONES TEMPORALES Y ESPACIALES DE LOS INCENDIOS FORESTALES CAUSADOS POR RAYOS EN LA REGIÓN DE MURCIA (SURESTE DE ESPAÑA): PERIODO 2000-2020*

159

IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF TEMPORAL AND SPATIAL PATTERNS OF WILDFIRES CAUSED BY LIGHTNING IN THE REGION OF MURCIA (SOUTHEAST SPAIN): PERIOD 2000-2020

Miguel Ángel López-Sandoval

Universidad de Murcia (España)

EDIUM - Escuela Internacional de Doctorado

ORCID 0000-0002-2961-700X miguelangel.lopez5@um.es

Ramón García-Marín

Universidad de Murcia (España)

Departamento de Geografía

ORCID 0000-0003-3268-5182 ramongm@um.es

RESUMEN

Se presenta un estudio en el que se han analizado diferentes elementos que han permitido la consecución de toda una secuencia de patrones temporales y espaciales asociados a los incendios forestales originados por rayos en la Región de Murcia, a lo largo del periodo 2000-2020. El resultado ha sido la obtención de una relación entre los incendios inducidos por rayos con una serie de patrones temporales desde el punto de vista de tendencia dentro del periodo, interanual, mensual, por quincenas y horaria, además de la consecución de toda una serie de patrones espaciales desde el punto de vista de su localización geográfica, altitud, pendiente, orientación, modelo de combustible, comunidades vegetales, humedad del material vegetal fino, condiciones meteorológicas, piso bioclimático, edafología, litología e intensidad eléctrica (Kiloamperios) de los rayos. En la investigación se han analizado los datos proporcionados por la UDIF (Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia), obtenidos de los informes realizados por los agentes medioambientales que recogieron la información. Se concluye que la distribución de los incendios forestales originados por rayos no es aleatoria, y el riesgo de simultaneidad de incendios al que dan lugar las descargas eléctricas provocadas por tormentas hacen que este fenómeno de origen natural deba tenerse muy en cuenta por parte de las administraciones y gestores ambientales.

Palabras clave: Riesgo natural, análisis de tendencias, variabilidad, probabilidad, modelo predictivo.

ABSTRACT

This study analyses various elements that have enabled the identification of a sequence of temporal and spatial patterns associated with wildfires caused by lightning in the Region of Murcia between 2000 and 2020. The result has been to establish a relationship between lightning-induced fires and a series of temporal patterns from the point of view of trends within the period, namely interannual, monthly, fortnightly and hourly trends. A series of spatial patterns was also involved, from the point of view of their geographical location, altitude, slope, orientation, fuel model, plant communities, moisture content of fine plant material, meteorological conditions, bioclimatic floor, edaphology, lithology, and the electrical intensity (kiloamperes) of the lightning. The research analysed the data provided by the UDIF (Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Region of Murcia/Forest Fire Defence Unit), obtained from the reports by the environmental agents who collected the information. It is concluded that the distribution of wildfires caused by lightning is not random, and the risk of simultaneous fires resulting from electrical discharges caused by storms means that this natural phenomenon must be considered by environmental authorities and managers.

Keywords: Natural hazard, temporal and spatial trend analysis, variability, probability, predictive model.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no VI Congresso Internacional de Riscos, tendo sido submetido em 29-09-2023, sujeito a revisão por pares a 17-11-2023 e aceite para publicação em 18-01-2024. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 32 (N.º Especial), 2025, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introducción

Los rayos se producen principalmente a partir de cumulonimbos, que se forman a través de cuatro mecanismos: debido al flujo de aire caliente que se eleva por causa del intenso calentamiento de la superficie, por el fuerte contraste de temperatura entre superficies, al ascenso frontal o al ascenso de masas de aire debido a la orografía (Sturman y Tapper, 1996). Todos estos procesos pueden desencadenar desarrollos convectivos en la atmósfera y, por lo tanto, la generación de rayos. Estos se originan alrededor de los 3000-4000 metros sobre el nivel del mar, debido a una separación de carga que tiene lugar dentro de la masa de aire de la nube cargada negativamente y el campo eléctrico positivo de la superficie del suelo (Cooray, 2003). Los vientos de valle-montaña producidos a partir de las diferencias de temperatura entre dos superficies inclinadas, unido al ascenso del aire que ocasiona la orografía puede ser un incitador a la producción de rayos (fot. 1), por lo que existe una relación entre la altitud y la densidad de rayos (López y Holle, 1986; Lericos *et al.*, 2002; Orville *et al.*, 2002; Dissing y Verbyla, 2003) (fig. 1). Las predicciones basadas en los Modelos de Circulación Global indican que la fracción de lluvia convectiva tenderá a aumentar, así como el número de descargas de rayos (Price y Rind, 1994a).

160



Fot. 1 - Inicio de incendio forestal por rayo latente en el Cerro de la Canaleja en el municipio de Caravaca de la Cruz (Región de Murcia), 09/07/2020 a las 14:17 horas (Fuente: UDIF-Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Photo 1 - Start of a wildfire caused by latent lightning at Cerro de la Canaleja in the municipality of Caravaca de la Cruz (Region of Murcia), 09/07/2020 at 14:17 hours (Source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Las tormentas secas con gran cantidad de aparato eléctrico tienen como consecuencia determinadas condiciones meteorológicas adversas (fuertes vientos erráticos, baja humedad relativa y altas temperaturas), generando simultaneidad de puntos de ignición y creando las condiciones de una auténtica "Tormenta de Fuego" en la que los bomberos forestales son incapaces de controlar esos incendios y no importa cuantos efectivos y equipos estén disponibles (Komanek, 1967). Valga como ejemplo lo sucedido el 06/08/2015 con tres incendios forestales prácticamente simultáneos ocasionados por varias tormentas secas que afectaron al territorio regional, o lo acaecido en la Región de Murcia y Albacete

el 13/08/2022 en Cerro Patoja (Jumilla) y Gamonal (Hellín), o también lo acontecido el 20/07/2023 con 6 incendios por rayos, uno latente y 5 de ellos simultáneos todos generados por la misma tormenta.

Los rayos no sólo serán más abundantes, sino que se extenderán más a lo largo del año, ampliando la estación de incendios (Price y Rind, 1994b). Se ha demostrado que existe una estrecha relación entre la temperatura del Mar Mediterráneo y la fracción convectiva de lluvia (Rambal y Hoff, 1998). En el pasado, la mayoría de los incendios causados por rayos se produjeron durante unos pocos eventos, esto es, días consecutivos con actividad tormentosa (Vázquez y Moreno, 1998). Por tanto, la persistencia de dichas situaciones debido a la mayor estabilidad de las condiciones atmosféricas puede ser particularmente peligrosa. El mayor grado de abandono forestal que suele ocurrir en las zonas altas, donde son más frecuentes los rayos, permite suponer que la acumulación de combustible va en aumento, y con ello los incendios producidos por rayos (fot.2). Los rayos son la principal causa natural de ignición de incendios forestales en España y en todo el mundo (Pyne *et al.*, 1996), y es la principal causa global de ignición en algunas masas forestales, como las de bosque boreal y en determinadas masas forestales mediterráneas en los últimos años. Sin embargo, un incendio forestal con ignición en un rayo puede quemar una superficie más grande de bosque que los originados por el ser humano, debido a su lejanía y agregación en el espacio y en el tiempo (Poduret *et al.*, 2003). Aunque la mayoría de los incendios provocados por rayos suelen extinguirse antes de propagarse demasiado lejos, este tipo de incendios tienden a ocurrir en las elevaciones superiores y en lugares remotos, lo que plantea desafíos para su extinción (Conedera *et al.*, 2006). Varios autores han informado que los incendios inducidos a rayos no ocurren al azar, sino que tienden a comenzar en lugares específicos (Vankat, 1985), pudiendo confirmar tras este trabajo que dichas afirmaciones no van desencaminadas.



Fot. 2 - Imágenes del resultado del impacto de un rayo sobre un pino (*Pinus halepensis*) en Sierra Larga, en el municipio de Jumilla (Región de Murcia), origen del incendio forestal por rayo latente que tuvo lugar el 27/08/2022 (Fuente: UDIF -Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Photo 2 - Images of the result of a lightning strike on a pine tree (Pinus halepensis) in Sierra Larga, in the municipality of Jumilla (Region of Murcia), origin of the wildfire caused by latent lightning that took place on 27/08/2022 (Source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

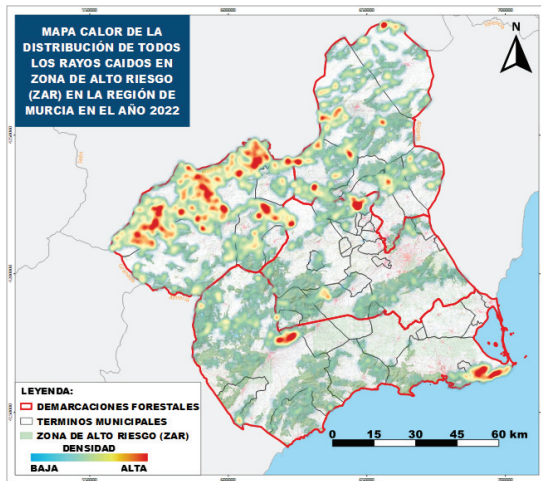


Fig. 1 - Mapa de densidad de rayos nube-tierra caídos dentro de Zona de Alto Riesgo (ZAR) en color verde, en la Región de Murcia a lo largo de todo el año 2022

(Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 1 - Map of the density of cloud-to-ground lightning strikes within the Zona de Alto Riesgo (ZAR) in green, in the Region of Murcia throughout 2022 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

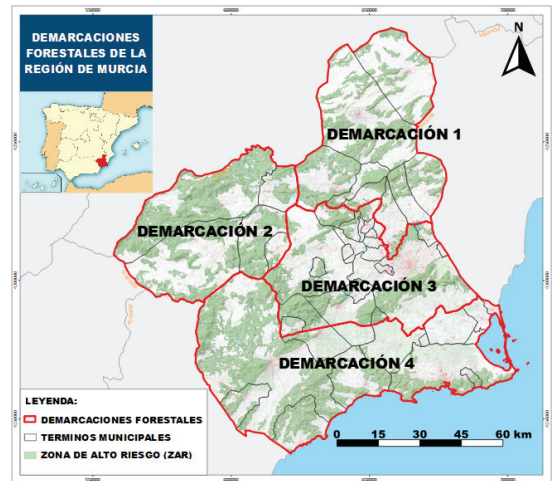


Fig. 2 - Mapa de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia con sus 4 Demarcaciones Forestales (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 2 - Map of the Autonomous Community of the Region of Murcia with its 4 Forest Demarcations (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

La eficacia de un rayo para dar lugar a una ignición que pueda desencadenar un incendio forestal va a depender de una serie de variables que van a estar relacionadas también con los propios rayos, tales como por la cantidad, polaridad e intensidad, además de otra serie de variables como son la humedad del combustible de la masa forestal resultante de condiciones climáticas previas, incluyendo la precipitación, temperatura y humedad, además de variables topográficas que pueden afectar a las variables antes mencionadas (Díaz-Ávalos *et al.*, 2001). Por otro lado, hay que tener en cuenta que la importancia o la influencia de las variables que influyen en la ignición originada por un rayo en una masa forestal varía con la escala considerada, no siendo realista y viéndose distorsionados los resultados en modelos que consideran grandes áreas geográficas, siendo recomendable el desarrollar modelos de identificación y análisis a escala local o regional (Pacheco *et al.*, 2009; Nieto *et al.*, 2006), como es el caso de este trabajo para la Región de Murcia (fig. 2).

Área geográfica de estudio

Dentro del área geográfica de estudio se analiza de manera simultánea el espacio en dos perspectivas, en primer lugar, a nivel regional, desde el punto de vista de todas las masas forestales que en conjunto la Región de Murcia posee, enfocadas de una manera global; y en segundo lugar, a un nivel desde el punto de vista de

cada una de las cuatro demarcaciones forestales de las que consta el territorio regional (fig. 2). En este sentido, vamos a tener en cuenta solamente aquellas áreas forestales denominadas como Zonas de Alto Riesgo (ZAR) inscritas dentro de su correspondiente demarcación forestal. Como Zona de Alto Riesgo (ZAR) se entiende aquellas áreas en las que la frecuencia o virulencia de los incendios forestales y la importancia de los valores amenazados hacen necesarias medidas especiales de protección contra los incendios, estando declaradas por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia de acuerdo con la ley 43/2003, de 21 de noviembre, modificada por la Ley 21/2015, de 20 de julio, y delimitadas por la Orden de 12 de julio de 2012, de la Consejería de Presidencia (BORM nº169 de 23 de julio de 2021).

Los municipios de la Demarcación Forestal I (Noreste) son: Yecla, Jumilla, Cieza, Abarán, Blanca, Molina de Segura, Fortuna y Abanilla. Dentro de su vegetación forestal predominan los pinares de pino carrasco con un sotobosque de lentiscos, espinos, enebros y coscojas en las umbrías, y en las solanas se abren los pinares con un matorral de romeros, tomillos y espartales. Los municipios de la Demarcación Forestal II (Noroeste) son: Moratalla, Caravaca de la Cruz, Cehégín, Calasparra y Bullas. Dentro de su vegetación forestal predominan en las zonas más degradadas submatorrales formados por romeros, jaras, aliagas y espartales. En las sierras occidentales donde existe una mayor precipitación aparecen los mejores encinares y pinares de rodeno, y en las cotas más altas pinares de laricio y las sabinas

albares. Los municipios de la Demarcación Forestal III (Centro) son: Ricote, Mula, Pliego, Ulea, Ojós, Campos del Río, Librilla, mitad norte del municipio de Alhama de Murcia, mitad norte del municipio de Totana, extremo septentrional del municipio de Fuente-Álamo, Aledo, Murcia, Santomera y Beniel. Dentro de su vegetación forestal predominan los pinares de pino carrasco en umbrías y en cotas más altas de las Sierras de Ricote, Espuña y Carrascoy, con un sotobosque de lentiscos, acebuches, espinos y a veces palmito. En las zonas más altas encontramos rodales relecticos de encinas, mientras que, en las laderas más bajas y transformadas de la vega del Segura, río Mula y valle del Guadalentín se desarrolla un matorral bajo formado por romeros, tomillos, bojás y salados. Los municipios de la Demarcación Forestal IV (Sur) son: Lorca, Puerto Lumbreras, Águilas, Mazarrón, mitad sur del municipio de Totana, tercio sur del municipio de Alhama de Murcia, las dos terceras partes meridionales del municipio de Fuente Álamo, Cartagena y La Unión. Dentro de su vegetación forestal predominan los pinares de pino carrasco que se desarrollan en las umbrías de las sierras litorales, como sotobosque de este y en las solanas encontramos un matorral costero formado por lentiscos, espinos, palmitos, cornicales y azufaiños, así como un matorral bajo formado por erguenes y espartales.

Metodología

La Dirección General del Medio Natural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia posee una base de datos de los incendios forestales que han tenido lugar en la región y que incluyen información sobre la causa, fecha, ubicación del punto estimado del inicio, término municipal, paraje, superficie, tipo de incendio (forestal, agrícola, periurbano, etc.), causas reales del incendio, causas supuestas, especies arbustivas afectadas, especies arboladas afectadas, propiedad del terreno forestal afectado (pública o privada), si la masa forestal afectada por el incendio posee alguna figura de protección medioambiental (ENP, ZEPA, LIC, ZEC, etc.).

Dentro de este trabajo y desde el punto de vista del área de intervención en el que se clasifican los incendios en la Región de Murcia, hemos tenido en cuenta los incendios dentro de la serie estadística acontecidos a lo largo del periodo 2000-2020 y que además hayan tenido lugar dentro de Zona de Alto Riesgo (ZAR), que son las áreas forestales dentro de la región en las que la frecuencia o virulencia de los incendios pueden llegar a suponer un riesgo sobre una serie de valores naturales que pueden verse amenazados. Además, solamente se han tenido en cuenta aquellos incendios cuyo origen han sido por causa natural, debida a la ignición de un rayo de manera real o supuesta según las determinaciones de la BRIDA (Brigada de Delitos Ambientales) en sus correspondientes informes.

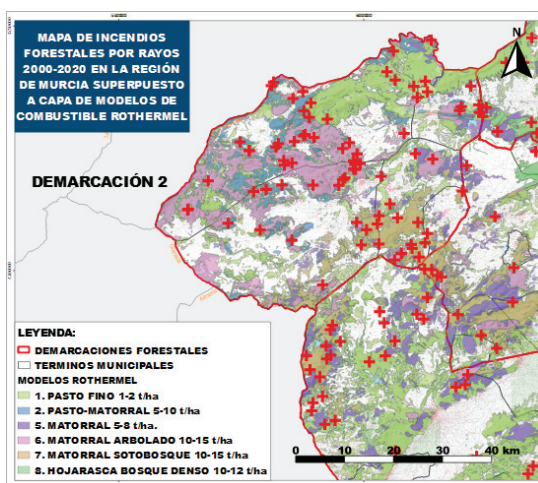


Fig. 3 - Superposición de las ubicaciones de los incendios forestales por rayos del periodo 2000-2020 sobre la capa de modelos de combustible de la Región de Murcia (Fuente: UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 3 - Overlapping of lightning induced wildfire locations for the period 2000-2020 on the fuel model layer of the Region of Murcia (Source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

A lo largo de la serie estadística analizada, se han registrado un total de 4462 incendios, de los cuales 229 han sido provocados por rayos dentro de Zona de Alto Riesgo (ZAR) de una manera real o supuesta, según los informes realizados por la BRIDA (Brigada de Delitos Ambientales). Por lo que de esta manera podemos afirmar que el 5,13% de los incendios forestales en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 han tenido su origen en la ignición directa o latente de un rayo de una manera real o en determinadas ocasiones de una manera supuesta. Para la visualización gráfica y cartográfica de las variables espaciales que se han decidido representar, y para poder caracterizar los posibles patrones que pudieran seguir los incendios inducidos a rayos dentro de las masas forestales en las Zonas de Alto Riesgo (ZAR) de la Región de Murcia, se ha trabajado con el Sistema de Información Geográfica QGIS, el cual ha permitido elaborar toda una cartografía gracias a las ubicaciones con coordenadas UTM (X, Y) de cada uno de los 229 incendios. Todas las coordenadas UTM de las ubicaciones de los incendios inducidos a rayos se han obtenido de los informes post-incendio elaborados por la BRIDA (Brigada de Delitos Ambientales) o por los Agentes Medioambientales de cada zona. El Sistema de Información Geográfica QGIS, ha permitido solapar las coordenadas UTM (X, Y) de cada uno de los inicios de los incendios por rayos con otras capas con valores y variables que han interesado (altitud, pendiente, orientación, modelo de combustible, tipo de suelo, litología, climatología, kiloamperaje de rayos, patrones mensuales y horarios, tiempo de ignición tras el impacto, etc.), y que han posibilitado el caracterizar las condiciones iniciales de cada uno de los incendios por

rayos y, en la medida de lo posible, vislumbrar posibles patrones de variables espaciales y temporales que hacen viable su ignición.

Utilizando hojas de cálculo (Excel) y con las descripciones de las comunidades vegetales presentes en las ubicaciones de los inicios de los incendios por rayos se ha podido determinar un patrón de aquellas comunidades vegetales que poseen una mayor presencia en este tipo de incendios. También se ha trabajado para obtener información sobre cuáles son los patrones climáticos, como la Humedad Relativa Mínima Absoluta, Temperatura Máxima Absoluta, Precipitación Media Diaria, Velocidad del Viento Máxima Diaria, así como la Dirección del Viento Medio medida en grados, o su componente y dirección cardinal presentes cada día a lo largo de la quincena más recurrente en incendios forestales a lo largo del periodo 2000-2020 en cada una de las cuatro demarcaciones forestales de la Región de Murcia. Y de esta manera, se ha podido determinar cuáles han sido las condiciones meteorológicas iniciales más favorables a lo largo del año para que un impacto eléctrico nube-tierra sea viable y ocasione una ignición en las diferentes demarcaciones forestales. Asimismo, se han realizado cuatro salidas de campo para tomar muestras y poder determinar patrones de porcentaje de humedad del material vegetal fino vivo en especies herbáceas como el esparto (*Macrochloa tenacissima*), precisamente en las quincenas del mes de agosto en las que cada demarcación forestal es más recurrente a este tipo de incendios. Se ha elegido a esta especie vegetal porque se trata de una de las especies herbáceas forestales más representativas de la región, ya que está presente en todas las demarcaciones forestales.

Esto ha permitido tener una idea de la situación de humedad de esta especie y de las masas forestales circundantes y la predisposición que este tipo de herbáceas posee para hacer viable una ignición al recibir el impacto de una descarga eléctrica, y ser la responsable del conocido como efecto “yesca” al que dan lugar, pues hay que decir que esta herbácea está presente en casi todos los incendios inducidos a rayos junto con el lastón (*Brachypodium retusum*), aunque esta última en menor medida. Finalmente, también se ha intentado determinar un patrón de kiloamperaje de los rayos nube-tierra que han producido ignición ocasionando incendio forestal a nivel regional y en cada una de las demarcaciones forestales. Hay que decir, que sólo se ha podido disponer de datos de kiloamperaje de rayos nube-tierra gracias a la web “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINETview”, y sólo ha sido posible la visualización de rayos nube-tierra de tormentas eléctricas desde el año 2020 hasta 2022 dentro de su apartado de serie histórica. La web ha permitido recopilar información de cada uno de los impactos que han ocasionado ignición proporcionando datos de su fecha, hora, kiloamperaje

(positivo, negativo), tipo (nube-tierra) y coordenadas UTM (X, Y), entre otras variables y para el territorio regional. Con esta información se han elaborado gráficas que han permitido representar el momento del día en el que los incendios por rayos son más recurrentes, así como el retardo en el que el impacto de una descarga eléctrica nube-tierra que ha conseguido la ignición hace acto de presencia dentro de una masa forestal con llama y pequeña columna de humo ya visible por los vigilantes.

Resultados y discusión

Con anterioridad al periodo de análisis 2000-2020, ya se consideraba la posibilidad de un progresivo aumento de los incendios forestales inducidos a rayos como consecuencia del cambio climático producido por el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (Price y Rind, 1994a). En un estudio del año 1994 se consideraban los posibles efectos del cambio climático con un incremento de los incendios forestales naturales provocados por rayos. Los resultados indicaban que la relación en la disminución de la precipitación efectiva como producto de la Precipitación menos Evapotranspiración potencial ($P-Ep$) y la frecuencia de la actividad de las tormentas conducirían a aumentos tanto en el número de incendios como en el total de las superficies quemadas. En este estudio se demuestra la probabilidad de que a diferentes escalas espaciales se experimente una mayor actividad de los incendios provocados por rayos en un clima más cálido. Por lo que las tendencias de estas relaciones para este estudio en concreto son válidas y sólidas. Los cambios en la frecuencia e intensidad de los incendios (naturales) deben tenerse en cuenta en las estimaciones de causas del cambio climático debido a su potencial para alterar las concentraciones atmosféricas de gases (invernadero) y partículas (aerosoles), así como su capacidad para cambiar la vegetación y el albedo de la superficie de la tierra (Price y Rind, 1994b).

Patrones temporales

Patrones de tendencia en número de siniestros y superficies calcinadas a lo largo del periodo 2000-2020

Dentro del gráfico de patrones de tendencia para la Región de Murcia (fig. 4), se observa una disposición al alza de los incendios forestales originados por rayos a lo largo del periodo de análisis 2000-2020, posiblemente como consecuencia del cambio climático que afecta ya a nuestras masas forestales, dando lugar a alteraciones en las principales variables climáticas y a modificaciones en los comportamientos fenológicos de la vegetación forestal. Otra variable para tener en cuenta es la posibilidad del aumento del volumen de combustible disponible en las masas forestales de la región como

resultado del abandono de los aprovechamientos y de las actividades silvícolas tradicionales por parte de la población rural a lo largo del todo el siglo XX y de lo que llevamos del siglo XXI, como consecuencia del conocido como “éxodo rural”, facilitando con ello una mayor viabilidad de los impactos eléctricos nube-tierra como consecuencia de una mayor proporción de combustible muerto disponible.

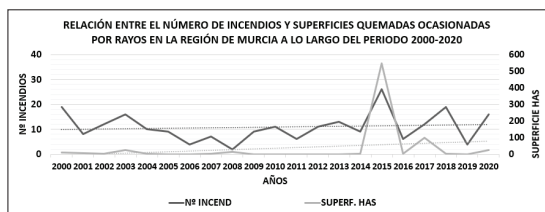


Fig. 4 - Relación entre el número de incendios por rayos y superficie quemada en la Región de Murcia 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 4 - Relationship between the number of fires caused by lightning and the area burnt in the Region of Murcia 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Dentro del gráfico de tendencias (fig. 4) es observable un ligero aumento de los incendios forestales originados por rayos a partir del año 2009, siendo el año 2015 el de mayor número de incendios forestales debidos a rayos de toda la serie con un número de 26. A lo largo del periodo de estudio se puede confirmar para el territorio regional la existencia de una tendencia al alza en el número de hectáreas que han sido pasto de las llamas originadas por rayos. Dentro de la serie destaca el año 2015, en el que ardió 545,71 hectáreas en total, siendo éste el año de toda la serie en el que más superficie forestal ardió debido a la ignición por rayos. Cabe destacar que la superficie quemada por rayos a lo largo del periodo de estudio fue de 730,15 hectáreas, pudiendo afirmar la tendencia al alza de una manera contundente, puesto que en el año 2022 la superficie total calcinada por rayos fue de 627,68 hectáreas, lo que supuso que en un solo año se quemara aproximadamente el 85% de la superficie que se había calcinado a lo largo de todo el periodo de más de 20 años (2000-2020).

En todos y cada uno de los incendios por rayos del periodo 2000-2020, los medios operativos de la UDIF fueron movilizados para su extinción. La superficie quemada dependió siempre de manera directa del tiempo empleado para acceder al lugar del incendio, así como de las condiciones del combustible con relación a su humedad relativa y a otra serie de variables meteorológicas, como velocidad del viento, temperatura, topografía, orientación, etc. En la actualidad podría estimarse la superficie que un incendio

forestal causado por un rayo podría calcinar si este se dejara a su libre albedrío con programas como FLAMMAP, WILDFIRE ANALYST, FARSITE, etc., proporcionándoles datos de tipología de combustible afectado, topografía, condiciones meteorológicas, etc. Actualmente, en la Región de Murcia no se plantea el dejar un incendio forestal causado por rayo que se apague de manera natural, por lluvia o condiciones meteorológicas no aptas para la continuidad del fuego o por falta de combustible, cosa que si ocurre en otros países como EEUU, Australia, Canadá, Rusia, etc., en los que algunos incendios forestales se dejan libremente siempre que sean por causa natural y que los mismos no supongan un riesgo para poblaciones, infraestructuras o empresas.

Patrones mensuales

Dentro de las quincenas anuales analizadas con mayor número de incendios forestales causados por rayos son de destacar, en primer lugar, las dos quincenas del mes de agosto en las que en cada una de ellas han tenido lugar 36 incendios, lo que supone que en cada quincena de este mes se han producido un 15,72% de los siniestros y un 31,44% para el conjunto del mes. Agosto, por tanto, es el mes del año con mayor riesgo de incendio forestal por rayos en la región. Lógicamente, esta situación es consecuencia de que este mes sea en el que mayor número de días con tormenta de tipo convectivo tienen lugar en la montaña media de la costa mediterránea, así como en las zonas de mayor relieve dentro del territorio regional, unido además a unas condiciones meteorológicas que favorecen la predisposición de las masas forestales en general, y del material vegetal fino muerto en particular, a la combustión tras el impacto de una descarga eléctrica nube-tierra procedente de una tormenta como resultado de la escasa humedad de las mismas. Tras el mes de agosto, destaca la primera quincena de julio y la primera quincena de junio. En consecuencia, el patrón mensual más recurrente se corresponde con los meses de agosto y en menor medida julio y junio (fig. 5).

Patrones horarios

La frecuencia diaria de incendios forestales en la Región de Murcia por rayos (fig. 6) muestra que en cualquier momento del día se producen incendios como consecuencia de la ignición producida por una descarga eléctrica nube-tierra. Sin embargo, se puede afirmar que más de la mitad de las igniciones por rayos que ocasionaron incendios forestales en la región a lo largo del periodo 2020-2022 ocurrieron a partir del mediodía solar (desde las 14:00 horas UTC) y hasta aproximadamente el ocaso (21:00 horas). Tal distribución de la variación diurna de incendios por rayos será más o menos similar a lo largo de toda la costa mediterránea, pues los procesos convectivos que los provocan funcionan a partir

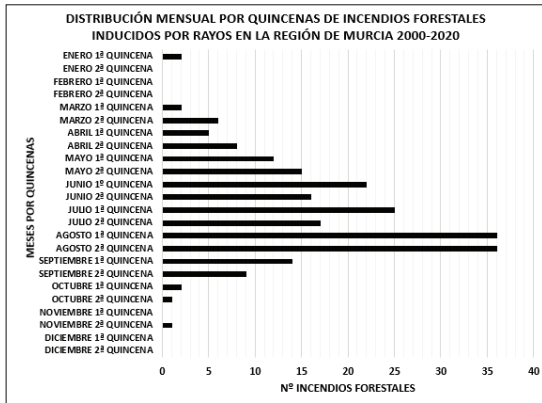


Fig. 5 - Distribución mensual por quincenas de incendios forestales inducidos a rayos en la Región de Murcia 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 5 - Monthly distribution by fortnight of lightning-induced wildfires in the Region of Murcia 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

del mediodía solar, y de la misma manera a lo largo de toda la franja mediterránea e interior peninsular, corroborándose del mismo modo en la distribución de los incendios forestales inducidos a rayos en este trabajo para la Región de Murcia, así como en los resultados obtenidos del estudio realizado por Pineda *et al.* (2012).

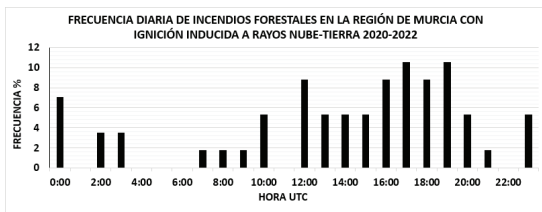


Fig. 6 - Frecuencia diaria de incendios forestales con ignición inducida a rayos nube-tierra en la Región de Murcia 2020-2022 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF (Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 6 - Daily frequency of wildfires with cloud-to-ground lightning-induced ignition in the Region of Murcia 2020-2022 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

La distribución diaria de las igniciones inducidas a rayos en las masas forestales representadas en este gráfico pueden ser extrapoladas a lo largo de la franja mediterránea, considerando pequeñas variaciones como son la latitud, altitud y la distancia a la costa, pero todas estas variables estarán influenciadas siempre desde el punto de vista de que los procesos convectivos de las tormentas que dan origen a los rayos y a los incendios forestales causados por ellos van a estar determinados

por el mar mediterráneo y sus vientos. Se puede observar una distribución horaria más concentrada desde las 12:00 horas UTC hasta las 20:00 horas UTC, donde se concentran casi un 70% de los incendios, alcanzando un máximo entre las 17:00 y 19:00 horas. Parecen existir también dos valles donde las igniciones horarias son más reducidas, por un lado, entre las 21:00 y 22:00 horas, y otro más prolongado entre las 1:00 y 9:00 horas (fig. 6).

Se puede observar la existencia de un ciclo diurno de actividad eléctrica causado como respuesta a los procesos convectivos tormentosos, debido al ciclo diurno de la insolación (Pineda *et al.*, 2012). También existe un patrón que relaciona la duración en tiempo que transcurre desde el impacto del rayo en el suelo hasta que la ignición de este es visible (fig. 7), ocasionalmente puede que la visibilidad de la ignición (incendio forestal) no ocurra de una manera inmediata. A veces, con posterioridad al impacto del rayo nube-tierra, se produce un fuego latente, cuya ignición desembocará en una combustión con llamas que será vista, registrada y comunicada por los vigilantes de incendios forestales, pero habiendo transcurrido un tiempo entre la propia ignición provocada por el rayo y la posterior combustión con llamas. El tiempo de espera o remanente muestra una distribución bimodal desde que el rayo impacta en el suelo hasta que es detectado, mostrando dos picos o máximos, uno alrededor de los 6 minutos tras el impacto del rayo nube-tierra y otro alrededor de las 20 horas. Respecto a este fenómeno de rayo latente se pueden poner varios ejemplos en nuestra región; como el incendio del “Cerro de la Canaleja o Cerro Gordo” en la Sierra del Buitre, en el municipio de Caravaca de la Cruz (09/07/2020), pues el rayo impactó a las 0:58 y el incendio fue declarado a las 14:17 horas, habiendo transcurrido poco más de 13 horas; o el incendio de Los Cantaores en Sierra Larga, en el municipio de Jumilla, en el que el rayo impactó el 26/08/2022 a las 22:09 horas y el incendio fue declarado el 27/08/2022 a las 13:36 horas, habiendo transcurrido poco más de 15 horas, destacando de entre todos el declarado el 3/05/2023 a las 16:59 en la Sierra de Lavia, en Bullas, habiendo transcurrido unas 70 horas de la descarga del rayo, habiendo impactado en el suelo el 30/04/2023 a las 19:00 horas.

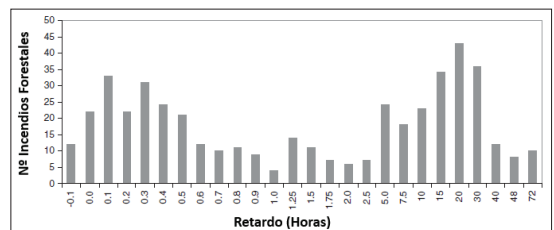


Fig. 7 - Distribución del retardo (latencia) entre la ignición y la detección de la combustión con fuego (Pineda *et al.*, 2012).

Fig. 7 - Distribution of the delay (latency) between ignition and detection of combustion with fire (Pineda *et al.*, 2012).

En el gráfico (fig. 7) encontramos un máximo de actividad que se corresponde con incendios forestales que presentaron una combustión llameante pocos minutos (6 minutos) después del impacto del rayo nube-tierra tras la correspondiente ignición. La mayoría de estos incendios forestales poseen un breve periodo latente y acontecen generalmente entre las 12:00 horas UTC y las 18:00 horas UTC. El segundo máximo se corresponde con incendios cuya ignición fue producida por un rayo nube-tierra presentando una combustión llameante desencadenando un incendio forestal tras un periodo latente de aproximadamente 1 día. Un análisis más detallado muestra que la mayoría de las igniciones que dan lugar a un fuego latente tienen lugar al anochecer, la ignición sobrevive toda la noche permaneciendo encendida gracias a la lenta combustión de la hojarasca o mantillo existente bajo el árbol, y esta etapa en la que la ignición está encendida de una manera subyacente suele durar hasta pasado el mediodía siguiente, siempre que la cantidad disponible de hojarasca o mantillo sea suficiente (fot. 3), despertando finalmente la llama que originará el incendio forestal en el momento en el que las condiciones de temperatura y humedad la hagan viable, unido a la entrada en juego del aporte de oxígeno que proporcionan los vientos de valle a mediodía.

Patrones espaciales

Patrones geográficos

En la distribución espacial de los incendios forestales inducidos a rayos en la Región de Murcia (periodo 2000-2020) tuvieron lugar 229 siniestros dentro de Zona de Alto Riesgo (ZAR), quedando reflejado de manera clara la relación entre estos y el relieve. De mayor a menor densidad de incendios por rayos destacan las sierras del Altiplano Jumilla-Yecla (Demarcación Forestal I) como las que mayor densidad de incendios padecen

dentro de la región, seguidas de las sierras del Noroeste (Demarcación Forestal II), Sierra Espuña y Sierra de Carrascoy (Demarcación III) y Sierra del Almiraz, Sierra de Pericay, Sierra del Gigante, Sierra de las Moreras, Sierra del Algarrobo y Sierra de Cartagena (Demarcación Forestal IV) (fig. 8).

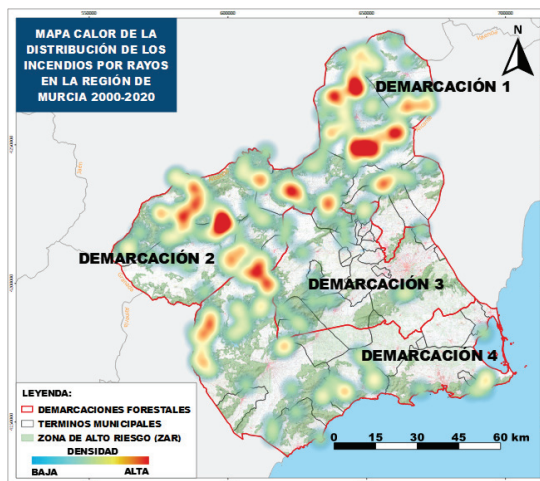


Fig. 8 - Distribución espacial en mapa de calor de los incendios forestales inducidos a rayos en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 8 - Spatial distribution of lightning-induced wildfires in the Region of Murcia on a heat map over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Además, son visibles dos gradientes espaciales de incendios forestales inducidos a rayos en el territorio regional, pudiendo distinguir que siguen dos diagonales diferentes; una diagonal que va en aumento desde la costa murciana hacia el interior y una segunda diagonal que va en aumento desde el noroeste hacia el noreste de



Fot. 3 - Imágenes de detalle de la base del pino (*Pinus halepensis*) por el anverso y el reverso en la que se observan las dos entradas del rayo al suelo y que permitió una combustión subyacente de la hojarasca o mantillo existente bajo el mismo a lo largo de más de 15 horas, dando lugar a un incendio por rayo latente el 27/08/2022 a las 13:36 horas en Jumilla (Región de Murcia) (Fuente: UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Photo 3 - Detailed images of the base of the pine tree (*Pinus halepensis*) from the front and back, showing the two point where the lightning struck the ground, causing underlying combustion of the leaf litter or much beneath it for more than 15 hours, resulting in a fire caused by latent lightning on 27/08/2022 at 13:36 hours in Jumilla (Region of Murcia) (Source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

la región. De esta representación destacamos tres figuras, una “U” inclinada a la derecha formada en el Altiplano con mayor densidad de incendios por rayos en la Sierra de Sopalmo-Sierra Larga, Sierra de la Pedrera-Sierra del Escabizado-Pico de Tella-Sierra de los Gavilanes, una “V” muy abierta formada por la Sierra del Búho, Almadenes, Sierra de Ricote y Sierra de la Pila, y una “J” inclinada a la izquierda formada por la Sierra de la Muela, Sierra del Buitre, Sierra del Quípar, Sierra de Burete, Sierra de Lavia, girando hacia la izquierda desde la Sierra de Pedro Ponce hacia la Sierra del Almirez y Sierra de Pericay en Lorca. Dos puntos aislados en Sierra Espuña y en la Sierra de Carrascoy. Así como algunas densidades en la línea que forman los relieves costeros en la Sierra de las Moreras, Sierra de lo Alto, Sierra del Algarrobo y en la Sierra de Cartagena.

Patrones altitudinales

Dentro de la distribución altitudinal queda reflejado que el intervalo situado entre los 600-800 metros de altitud es el que mayor número de incendios registra con 67, suponiendo el 29,26% del total de los acontecidos en el periodo de análisis. Si la altitud en la Región de Murcia oscila entre los 0 metros a nivel del mar y los 2015 metros de altitud máxima en el Pico del Obispo en la Sierra de Revolcadores, se observa que el número de incendios por rayos es ligeramente superior desde el nivel del mar hasta los 800 metros que desde los 800 metros hasta la cota de mayor altitud de la región (fig. 9). Lógicamente, las igniciones por rayos en este caso estarán determinadas por los intervalos altitudinales que mayor superficie forestal y disponibilidad de combustible posean y las altitudes de relieve en las que con mayor frecuencia se desarrollan los procesos meteorológicos en la atmósfera que son los que dan lugar a las tormentas de tipo convectivo, a las descargas eléctricas y como consecuencia de ello a incendios forestales por causa natural.

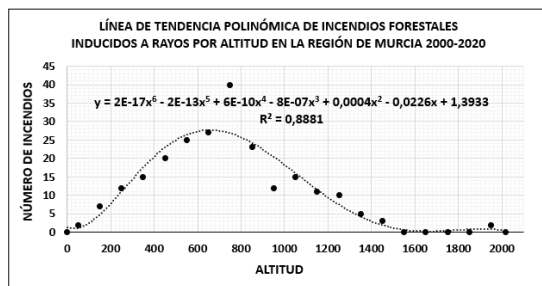


Fig. 9 - Número de incendios forestales causados por rayos según altitud y su correspondiente línea de tendencia polinómica en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 9 - Number of wildfires caused by lightning according to altitude and its corresponding polynomial trend line in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

La línea de tendencia de incendios forestales inducidos a rayos según la altitud ha sido obtenida mediante el programa Excel, tras haber introducido como variable independiente la altitud y como dependiente el número de incendios por rayos acontecidos dentro de cada uno de los intervalos altitudinales, aclarando que se ha posicionado el número total de incendios provocados por rayos dentro de cada intervalo en el valor medio del mismo, es decir, y que valga como ejemplo, los incendios por rayos que han tenido lugar entre los 200 y 300 metros de altitud se han posicionado en el valor altitudinal de 250 metros. Mediante el programa Excel también se ha podido obtener una curva de tendencia polinómica que relaciona el número de los incendios forestales originados por rayos en zona ZAR (Zona de Alto Riesgo) con la altitud a la que han tenido lugar cada uno de ellos (fig. 9), obteniendo que dicha curva de tendencia posee un coeficiente de correlación con un valor de $R^2 = 0,8881$. Dentro de la curva, se confirma que el mayor porcentaje de incendios por rayos se concentra entre los 500 y los 820 metros de altitud. Así lo confirman, por ejemplo, los dos últimos grandes incendios acaecidos en la Región de Murcia por rayos en la campaña 2022, con los incendios de Cerro Patoja (Jumilla), originado el 13/08/2022 y ubicado a los 741 metros de altitud, en el que se calcinaron 225,09 hectáreas; y el incendio de Sierra Larga (Jumilla), originado el 27/08/2022 y ubicado a los 512 metros de altitud, en el que se calcinaron 424,82 hectáreas. La curva de tendencia polinómica obtenida es una línea que relaciona la altitud en la región con el número de incendios forestales por rayos, siendo su fórmula la siguiente:

$$y = 2E-17x^6 - 2E-13x^5 + 6E-10x^4 - 8E-07x^3 + 0,0004x^2 - 0,0226x + 1,3933$$

La letra “E” en la ecuación no representa una variable, sino que se utiliza como una abreviatura de “exponente” en notación científica. En lugar de representar números grandes o pequeños en su forma completa, se abrevia usando este tipo de anotación, donde se escriben en términos de potencia 10. Si bien es cierto que la letra “E” es empleada como sigla en forma exponencial, valga como ejemplo que $2E-17x^6$ equivaldría a $2 \cdot 10^{-17}x^6$. Esta curva es interesante porque nos permite conocer cuál es el intervalo altitudinal donde acontecen más incendios por rayos en la Región de Murcia dentro de Zona de Alto Riesgo (ZAR), pudiendo de esta manera llevar a cabo una mejor gestión y prevención del riesgo de incendio forestal al que dan lugar los rayos mediante trabajos silvícolas de limpieza de cortafuegos y pistas forestales, quemas prescritas, así como la realización de nuevos cortafuegos, etc., gracias a la información que nos proporciona.

Dentro de los valores de superficie quemada (ha) por rayos y su relación altitudinal para toda la Región de Murcia quedan reflejados dos intervalos altitudinales en los que han tenido lugar varios incendios forestales originados por

rayos y con una superficie a tener en consideración por su extensión. Un primer intervalo se situaría entre los 450-550 metros de altitud, con un incendio cuya superficie máxima calcinada supera ligeramente las 250 hectáreas; y otro intervalo con varios incendios situados aproximadamente entre los 1000-1100 metros de altitud y con una superficie máxima calcinada en el mayor de ellos de unas 230 hectáreas aproximadamente (fig. 10). Estos dos intervalos aportan información acerca de cuáles serían las altitudes potencialmente más propensas dentro de la región a padecer un incendio forestal de grandes dimensiones, en las que se podría incluir y así lo avala la altitud de 512 metros del incendio de Sierra Larga en jumilla de la campaña 2022 con 424,82 hectáreas. Esta información, unida a la anterior, tendría que servir para centrar en determinadas áreas forestales de nuestra región aquellos trabajos silvícolas destinados a la prevención de incendios forestales con este origen natural y que estadísticamente está demostrado que irán en aumento por las condiciones climáticas recurrentes que nos está deportando el cambio climático en el arco mediterráneo en general y en el sureste de la Península Ibérica en particular.

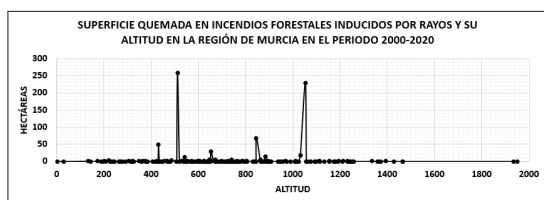


Fig. 10 - Distribución de la superficie quemada de incendios forestales inducidos a rayos y su altitud en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF -Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 10 - Distribution of the area burnt by lightning-induced wildfires and their altitude in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Patrones de pendiente

La pendiente afecta a la velocidad y dirección de propagación del incendio, que se transmite más rápido cuesta arriba y con pendientes más pronunciadas (Rothermel, 1991). Las pendientes que oscilan entre el 25-50% constituyen los intervalos que más incendios por rayos registran en la Región de Murcia con 88 siniestros, lo que suponen el 38,43% de los mismos, siendo más del doble de los que han acontecido en el periodo de estudio en el intervalo de pendientes del 50-75% (inmediatamente superior), con 41 sucesos y suponiendo el 17,90%; y casi el doble de los que han tenido lugar en el intervalo de pendientes del 12-25%, con 46 siniestros y suponiendo el 20,09% (fig. 11).

Además, hay que decir que el intervalo de pendientes del 25-50% coincide desde el punto de vista geográfico con

las denominadas pendientes reguladas o vertientes de “Richter”, que se caracterizan por poseer un perfil regular y que llevan el nombre del geomorfológico norteamericano Charles Francis Richter. Son estas las vertientes rectilíneas y claramente inclinadas de 25°-35° (25° = 46,6%), sin rupturas de pendiente (George, 2003), las que facilitan mejor la ignición ocasionada por un rayo desde el punto de vista geomorfológico. La pendiente muestra una relación directa con la superficie quemada, siendo mayor la proporción de área quemada en las zonas con una mayor pendiente. Este dato está relacionado con varios factores, entre los que destacan la ocupación por cultivos de las zonas más planas. En zonas de una gran pendiente comienzan a aparecer los roquedos que dificultan la propagación. Otros estudios muestran resultados similares a los aquí obtenidos para zonas de montaña de la región mediterránea (Lozano *et al.*, 2008).

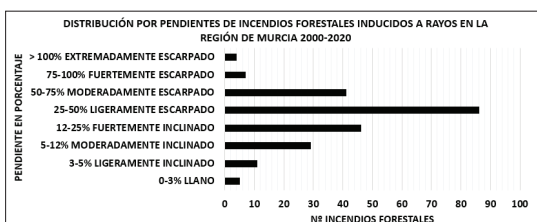


Fig. 11 - Distribución de incendios forestales inducidos a rayos por pendientes en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 11 - Distribution of lightning-induced wildfires by slopes in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Patrones de orientación

El medio mediterráneo se caracteriza por recibir una fuerte insolación, por lo que el efecto de orientación de las laderas tiene una importancia notable compartimentando el espacio en mesoclimas diferenciados en “solanas” y “umbrías”, cuya consecuencia se traduce en una menor disponibilidad hídrica del material vegetal vivo, del material vegetal muerto, así como del suelo y su hojarasca en solana en relación con la umbría (Mesón y Montoya, 1993; González Ochoa *et al.*, 2003), lo que predispone de esta manera a las solanas a una más fácil ignición originada en una descarga eléctrica provocada por una tormenta. Este patrón de orientación se confirma en el análisis de las igniciones por rayos en la Región de Murcia a lo largo del periodo de estudio (fig. 12). La orientación condiciona el estado del combustible, que se seca más rápidamente en las laderas de solana apareciendo combustibles más secos y menos densos que los de la ladera de umbría (Anderson, 1982). La vegetación es un elemento clave para establecer los patrones espaciales

de los incendios forestales. Existen varios factores que determinan su ocurrencia, entre ellos, las características de los combustibles, como son el tipo, carga, humedad e inflamabilidad (Rothermel, 1983), siendo todas estas características en gran medida dependientes de la orientación solana-umbría.

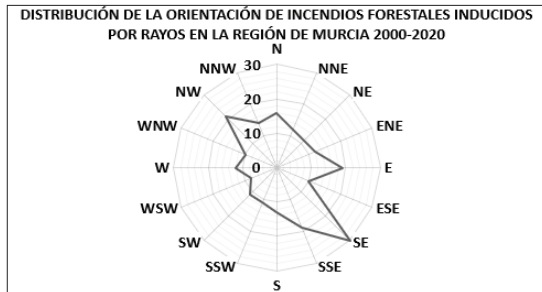


Fig. 12 - Distribución de la orientación de los incendios forestales inducidos a rayos en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 12 - Distribution of the orientation of lightning-induced wildfires in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Dentro de los patrones espaciales de distribución de incendios forestales en relación con la orientación a nivel regional, destaca la orientación SE como la que ocupa el mayor número de siniestros con 30, suponiendo el 13,1% del total, seguido de las orientaciones NW con 21, suponiendo el 9,17%, E y SSE con 19 sucesos y significando cada una de ellas el 8,29% de los sucesos. Esta situación es el resultado de la orientación SW-NE de la mayoría de los relieves en la Región de Murcia, como consecuencia de la alineación de la cordillera del Sistema Bético que afecta a nuestro territorio (Conesa, 2007). Esta situación va a determinar que el mayor número de igniciones inducidas a rayos posean la orientación SE-NW (solana-umbría) como resultado en primer lugar de ser las orientaciones preponderantes en nuestra región por la tectónica y en segundo lugar, como resultado del factor exposición S-SE (solana), ya que en estas orientaciones el combustible está mucho más desecado y propenso a la ignición que el resto por la insolación, sobre todo en los meses de verano cuando tienen lugar las tormentas de tipo convectivo con un gran número de descargas eléctricas.

Patrones de modelo de combustible

Dentro de la distribución de incendios forestales inducidos a rayos, y siguiendo los patrones de modelos de combustible en el territorio regional (fig. 3), destaca en primer lugar el Modelo 1 de combustible con 81 siniestros, suponiendo el 35,37% del total, formado

por pasto fino seco bajo con valores de carga de 1-2 toneladas por hectárea y suponiendo más del doble de sucesos a lo largo del periodo de estudio que el siguiente modelo de combustible, formado por el Modelo 8, con 40 siniestros y suponiendo el 17,47% del total de ellos, formado por hojarasca bajo bosque denso con carga de 10-12 toneladas de combustible por hectárea. El tercer lugar lo ocupa el Modelo 5, formado por matorral denso bajo, con 5-8 toneladas de combustible por hectárea, y con 34 sucesos, representando el 14,85% del total (fig. 13). Dentro de este tipo de patrón se puede deducir la efectividad que en el proceso de ignición proporciona un pasto fino seco y bajo, como es el Modelo 1 de combustible frente al resto, en concreto con la viabilidad que este tipo de combustible ofrece al impacto de la descarga eléctrica nube-tierra cuando toca suelo y consigue hacer llama (efecto “Yesca”).

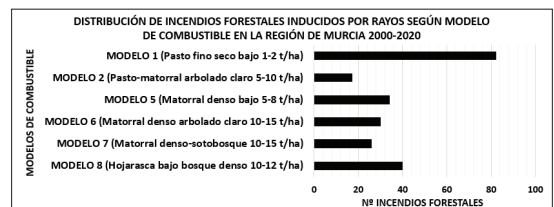


Fig. 13 - Distribución por modelos de combustible de incendios forestales inducidos a rayos en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 13 - Distribution by fuel model of lightning-induced forest fires in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Patrones de comunidades vegetales

En relación con las comunidades vegetales forestales presentes, algunos autores han encontrado relaciones significativas entre la ocurrencia de incendios forestales y la composición de especies y la densidad total (Minnich y Bahre, 1995). Un aumento en la cantidad de combustible supone un incremento en la inflamabilidad, que repercute en la extensión y severidad del incendio (Broncano y Retana, 2004). La ocurrencia de incendios forestales se ha relacionado con otros parámetros forestales, como la fracción total de cabida de la masa forestal, la proporción de coníferas y no-coníferas, y la no presencia de combustible (Flannigan *et al.*, 2005; Johnson, 1992). Se han realizado estudios en diferentes ecosistemas forestales con la finalidad de determinar el grado de inflamabilidad de las especies que lo conforman, especies arbóreas, arbustivas y herbáceas (Marino *et al.*, 2010), y con una fuente de punto de ignición en diferentes combustibles forestales, especialmente la hojarasca y pastos, tanto en el campo (Blackmarr, 1972; Lin, 1999;

Tanskanen *et al.*, 2006; Beverly y Wotton, 2007) como en estudios de laboratorio (Ferreira, 1987; McAlpine y Wakimoto 1991; Ellis, 2000; Guijarro *et al.*, 2002; Pérez-Gorostiaga *et al.*, 2002; Plucinski, 2003; Satoh *et al.*, 2003; Manzello *et al.*, 2006; Jappiot *et al.*, 2007; Plucinskiy & Anderson 2008). También existen diferentes estudios que han sido llevados a cabo para evaluar la sostenibilidad de la ignición de suelos orgánicos (Frandsen, 1987; Hartford, 1993; Lawson *et al.*, 1997; Frandsen, 1997; Miyanishi y Jonhson, 2002; Otway *et al.*, 2007; Reardon *et al.*, 2007). Una investigación reciente (Curt *et al.*, 2007) evaluó la inflamabilidad de los combustibles en diferentes tipos de vegetación, incluyendo un complejo de combustibles compuesto por pastos, arbustos, etc.

Dentro de las comunidades vegetales forestales presentes en incendios forestales con ignición inducida a rayos en la Región de Murcia destaca la comunidad arbolada formada por *Pinus halepensis*, *Stipa tenacissima*, *Salvia rosmarinus* y *Thymus sp.*, suponiendo esta comunidad el 21,40% del total de las igniciones acontecidas, y por otro lado, dentro de las comunidades vegetales forestales no arboladas destaca la comunidad vegetal forestal formada por *Stipa tenacissima*, *Salvia rosmarinus* y *Thymus sp.*, suponiendo la misma el 19,21% del total. Dentro de las dos comunidades vegetales forestales mencionadas anteriormente, es de destacar que sea ligeramente mayor la proporción del número de igniciones por rayos en la comunidad arbolada, frente a la no arbolada, siendo posible la respuesta a este porcentaje ligeramente superior a un pequeño efecto "Receptor" al que pudieran dar lugar los árboles, que a veces salpican los espartizales con pequeñas manchas arboladas aisladas formadas principalmente de pino carrasco (*Pinus halepensis*) que, cargados positivamente, frente a las nubes tormentosas cargadas negativamente, facilitarían este fenómeno que tal vez no ocurre de igual manera en las comunidades vegetales forestales no arboladas. Valga como ejemplo la gran cantidad de pinos (*Pinus halepensis*) impactados y algunos de ellos muy próximos unos a otros la noche del 25/08/2022 en Sierra Larga y Sierra de Sopalmo, en Jumilla, y Sierra del Serral en Yecla, así como el 26/07/2022 en el paraje de Tobarrillas en la Sierra Lacera de Yecla.

Patrones de pisos bioclimáticos

En cuanto a los pisos bioclimáticos que existen en la Región de Murcia, definidos como cada uno de los tipos o grupo de medios que se suceden en una zonación altitudinal o latitudinal y delimitados en función de los factores climáticos y de las comunidades vegetales cambiantes, encontramos a mayor altitud al piso bioclimático Oromediterráneo, que es el que aparece en las montañas más elevadas de la Península Ibérica y en la Región de Murcia. Los ecosistemas maduros son ya casi forestales, excepto en las zonas donde existe influencia oceánica. El estrato arbóreo no es muy

denso y está formado fundamentalmente por coníferas. El estrato arbustivo, en cambio, presenta una gran diversidad, estando formado por sabinas, piornos y enebros. El piso bioclimático Supramediterráneo está distribuido por toda la Península Ibérica. Los ecosistemas maduros son forestales, formados por sabinas, encinares, quejigares, hayedos, etc. En la Región de Murcia se encuentran tanto sabinas albares como encinares. El piso bioclimático Mesomediterráneo está ampliamente representado, y encontramos tanto encinares como coscojares. El piso bioclimático Termomediterráneo es el que aparece en zonas costeras, aunque en la Región de Murcia también aparece en áreas alejadas del litoral, con formaciones de lentiscos y espinales murciano-almerienses (Dirección General de Medio Natural-CARM, <https://murcianatural.carm.es>).

Dentro de los patrones de los pisos bioclimáticos de la distribución de incendios forestales inducidos a rayos para la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020, destaca en primer lugar el Piso Mesomediterráneo Cálido, siendo el que mayor número de incendios originados por rayos ha soportado dentro de la región a lo largo del periodo, con un total de 111 incendios suponiendo el 48,47% del total de siniestros, en segundo lugar se encuentra el Piso Mesomediterráneo Frio con 71 incendios suponiendo el 31,00%, en tercer y cuarto lugar se sitúan el Piso Termomediterráneo Superior y el Piso Supramediterráneo, con 17 incendios originados por rayos en cada uno de ellos, suponiendo cada uno el 7,42% del total de siniestros por rayos a lo largo del periodo de estudio. Finalmente, encontramos el Piso Termomediterráneo Inferior con 11 incendios suponiendo el 4,80% de los incidentes y el Piso Oromediterráneo con sólo 2, suponiendo el 0,87% del total (fig. 14).

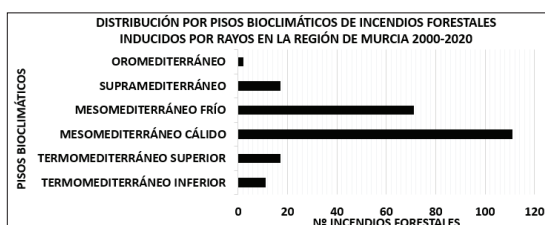


Fig. 14 - Distribución de incendios forestales inducidos a rayos por pisos bioclimáticos en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 14 - Distribution of lightning-induced wildfires by bioclimatic zones in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Source: Prepared by the authors based on data provided by the UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Es de destacar que, si en valores absolutos es el Piso Mesomediterráneo Cálido el que mayor número de incendios inducidos a rayos posee con 111, existe un significativo valor de densidad de incendios

en el Piso Mesomediterráneo Frío en relación con su menor superficie. Ocurre lo mismo en el piso Supramediterráneo, sumando entre ambos 88 incendios, siendo su superficie más reducida que la que poseen el Piso Mesomediterráneo Frío y el Piso Termomediterráneo Superior unidos. Lógicamente, tras esto está la íntima relación que existe en la región entre la altitud y el número de incendios originados por rayos (fig.9).

Patrones climáticos

En la Región de Murcia también se han estudiado las tendencias de las precipitaciones durante las últimas décadas, así como la posible intensificación de sequías y el impacto de estas sobre el territorio (García Marín y Conesa García, 2006; García Marín y Calvo García-Tornel, 2008; Sánchez Toribio *et al.*, 2010). En estos estudios de ámbito regional se habla de la acentuación e intensificación de los periodos secos en el SE peninsular desde mediados del S. XX. Algunos autores muestran que las rachas secas se manifiestan como uno de los hechos climáticos definidores del ambiente mediterráneo, y su trascendencia es sustancial en el funcionamiento de muchos ecosistemas, al generar fuertes alteraciones en la disponibilidad de agua dentro de un ambiente semiárido, afectando todo esto de manera directa a la disponibilidad de humedad de las masas forestales en la región y a su predisposición a la ignición por causa natural o antrópica (García Marín y Calvo García-Tornel, 2008). Por otro lado, estudios recientes de la Universidad de Murcia ponen de manifiesto para el territorio regional una tendencia positiva en el número de días de lluvia ≥ 1 mm en la mayor parte de los observatorios analizados, siendo significativamente positiva en algunas series del interior, evidenciando posiblemente un aumento en el

número de días en el acontecen tormentas secas en los meses de verano. Por lo tanto, los periodos de sequía se están alargando, confirmando de esta manera una mayor probabilidad de incendio forestal por rayos cuando las tormentas ocurren en el mes de agosto. Algunos autores afirman que las condiciones de sequía y la probabilidad de incendio (forestal natural) siguen una relación de tipo umbral, es decir, [...] existe un nivel de sequía a partir del cual el área afectada aumenta enormemente (Pausas, 2020). La mayor frecuencia de situaciones con déficit hídrico en el suelo hace suponer que la eficiencia de las descargas en producir un incendio forestal será mayor (Nash y Jonson, 1996). La estrecha relación entre condiciones meteorológicas y el estado de los combustibles hace que los índices de peligro de incendio al uso, como el índice de peligro meteorológico FWI (Fire Weather Index) (Van Wagner, 1987), estén basados en unas pocas variables meteorológicas: humedad relativa del aire, velocidad del viento, temperatura y precipitación (Vélez, 2009; Viegas *et al.* 2000), así como en el número medio anual de días de tormenta.

Los resultados para cada una de las variables climáticas definitorias de los patrones climáticos y que determinan de cierta manera la viabilidad de las igniciones por rayos en la Región de Murcia han sido los siguientes; los valores medios para la Humedad Relativa Mínima Absoluta (HRMINABS %) fueron del 23,88%, los valores medios para la Temperatura Máxima Absoluta (TMAXABS °C) fueron de 35,8 °C, los valores de Precipitación Media Diaria fueron de 0,29 mm, la Velocidad del Viento Máxima (VVMAX m/s) fueron de 5,43 metros por segundo, que equivalen a 19,55 Km/h, y, finalmente, la Dirección del Viento Medio (DVMED°) fue de 135,64°, que cardinalmente supone un viento de componente SE y de dirección NW (TABLA I).

TABLA I - Variables climáticas medias más determinantes en la viabilidad de una descarga eléctrica en la quincena más recurrente de cada una de las demarcaciones forestales de la Región de Murcia y media anual a lo largo del periodo 2000-2020.

TABLE I - Average climatic variables most decisive in the viability of an electrical discharge in the most recurrent fortnight in each of the forest demarcations of the Region of Murcia and annual average over the period 2000-2020.

VARIABLES CLIMÁTICAS MEDIAS POR QUINCENA MÁS RECURRENTE INCENDIOS POR RAYOS POR DEMARCACIÓN 2000-2020				
DEMARCACIÓN FORESTAL	QUINCENA-FECHA	ESTAC. METEOR.	HR.MIN.ABS % (Humedad)	T.MAX.ABS °C
Demarcación 1	1ª Quincena agosto	Las Encebras	23,88	35,9
Demarcación 2	2ª Quincena agosto	La Torrecica	28,3	33,5
Demarcación 3	1ª Quinc. junio/1ª Quinc. Agosto	La Paca	26,93-25,76	27,6-32,3
Demarcación 4	2ª Quincena agosto	La Paca	29,93	30,9
Región Murcia MEDIA	agosto	-	26,96	32
IF Los Losares-Cieza	06-08-2015	La Carrichosa	18,38	36,4

VARIABLES CLIMÁTICAS MEDIAS POR QUINCENA MÁS RECURRENTE INCENDIOS POR RAYOS POR DEMARCACIÓN 2000-2020				
DEMARCACIÓN FORESTAL	PREC. MEDIA DIARIA mm	VV.MAX. km/h	DVMED°	COMPONENTE
Demarcación 1	0,29	19,51	135,64°	SE
Demarcación 2	0,92	19,15	119,62°	ESE
Demarcación 3	0,35-0,26	20,88-21,46	133,27°-131,85°	SE-SE
Demarcación 4	0,65	20,27	125,72°	SE
Región Murcia MEDIA	0,49	20,25	129,22°	SE
IF Los Losares-Cieza	0	54	129,15°	SE

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la Red del Sistema de Información Agraria de Murcia (SIAM) y del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA).

Source: Prepared by the authors based on data obtained by the network of the Murcia Agrarian Information System (SIAM) and by the Murcian Institute of Agricultural and Environmental Research and Development (IMIDA).

Patrones de humedad vegetal

En relación con los patrones de humedad vegetal, se trabajó de la siguiente manera; se realizaron cuatro salidas de campo a las ubicaciones geográficas donde son más recurrentes los incendios provocados por rayos para cada una de las demarcaciones forestales para determinar la humedad que posee el material vegetal fino vivo. Se decidió tomar la humedad que poseía el esparto (*Macrochloa tenacissima*) por ser una especie de herbácea que está representada en todas las demarcaciones forestales, además de estar presente como especie vegetal en casi todos los incendios descritos por los agentes medioambientales en los informes. En la TABLA II se detallan los datos de las muestras y el porcentaje de humedad.

La fecha en las que han sido tomadas las cuatro muestras se corresponde con la quincena del año en la que cada demarcación es más recurrente a la ignición por rayos. Cada muestra analizada permite extrapolar información acerca del estado de humedad y su predisposición a generar un incendio por rayo. La hora que se eligió para tomar las muestras fue las 12:45 h, para que no se correspondiera con la primera hora de la mañana ni con la última del día, ni tampoco con la hora de mayor temperatura ambiental. Los porcentajes de posesión de humedad por parte del esparto (*Macrochloa tenacissima*) obtenidos fueron de menor a mayor los siguientes; en primer lugar, con un 7,48% de su peso de humedad la muestra de la Demarcación Forestal I (Noreste), tomada en la Sierra de Sopalmo (Jumilla), siendo esta muestra la que menor proporción en peso de humedad poseía. En segundo lugar, con un 14,06% de su peso de humedad la muestra de la Demarcación Forestal III (Centro), tomada en la Cuerda de la Selva (Mula). En tercer lugar, con un 17,97% de su peso en humedad la muestra de la Demarcación Forestal IV (Sur), tomada en la Sierra del Almirez (Lorca). Finalmente, en cuarto lugar, con un 23,51% de su peso en humedad, la muestra de la Demarcación Forestal II (Noroeste), tomada en la Sierra del Buitre (Caravaca de la Cruz). A grandes rasgos es de destacar la escasa humedad que poseía la muestra de material vegetal vivo fino de la Sierra de Sopalmo, en Jumilla, perteneciente a la Demarcación Forestal I (Noreste) frente al resto de muestras tomadas.

La muestra fue tomada el 08/08/2022, y tras realizar el análisis, acontecieron dos incendios por rayos, uno en Cerro Patoja el 13/08/2022 y otro en Sierra Larga el 27/08/2022, ambos en Jumilla, lo que confirma la escasa humedad que poseen las masas forestales en esta demarcación forestal en el mes de agosto y su predisposición para hacer viable una ignición provocada por una descarga eléctrica resultado de una tormenta.

Patrones de kiloamperaje

Dentro de los patrones de kiloamperaje se han realizado comparaciones con otras comunidades autónomas vecinas, como Castilla-La Mancha. Según estudios realizados en esta comunidad autónoma, analizando en el periodo 2012-2015 de los 166.379 rayos registrados, el 82% fueron de polaridad negativa, mientras que el 18% fueron de polaridad positiva (Calderón Cortes, 2021). Los porcentajes que se manejan en la Región de Murcia en lo que respecta a rayos positivos y negativos van a ser similares. Si bien es cierta la controversia existente entre algunos expertos respecto de la importancia de la polaridad respecto a la ignición dentro de las masas forestales. En este estudio y para la Región de Murcia, de los 31 incendios forestales declarados y originados por rayos desde el año 2020 hasta el 2022 de los que disponemos de valores de kiloamperaje, 25 de las igniciones en masa forestal fueron provocados por rayos negativos, lo que supone el 80,64% de los mismos, frente a 6 igniciones provocadas por rayos de polaridad positiva suponiendo estas el 19,35% del total (TABLA III).

Por otro lado, el poder localizar y conocer las características espaciales y temporales, así como de kiloamperaje de los rayos que han producido incendio forestal, ha sido posible gracias a la web “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINETview”, y que ha permitido determinar la intensidad media de los rayos que causaron incendio forestal a lo largo del periodo 2020-2022, siendo el kiloamperaje medio de -15,25 kA para los negativos y de 39,6 kA para los positivos. No obstante, como se ha comentado con anterioridad, se discrepa de la importancia de la intensidad en muchos trabajos, asignando una mayor importancia a la posibilidad de generar una corriente de larga duración

TABLA II - Porcentajes de humedad del material vegetal vivo fino por demarcaciones forestales en la Región de Murcia, durante la quincena del año más recurrente de incendios forestales con ignición inducida a rayos en cada una de ellas.

TABLE II - Percentages of humidity of fine living plant material by forest demarcation in the Region of Murcia, during the fortnight of the year with the most recurrent wildfires with lightning-induced ignition in each of them.

PATRONES DE HUMEDAD DEL MATERIAL VEGETAL VIVO POR DEMARCACIONES FORESTALES										
DEMARC.	MUNICIPIO	SIERRA	X	Y	FECHA	HORA	ESPECIE	PESO HÚMEDO	PESO DESECADO	% HUMEDAD
I	JUMILLA	S ^o SOPALMO	652563	4199095	08-08-2022	12:45	M. tenacissima	856 grs	792 grs	7,48%
II	CARAVACA	S ^o BUITRE	597412	4220607	22-08-2022	12:45	M. tenacissima	925 grs	708 grs	23,51%
III	MULA	S ^o LA SELVA	615868	4199095	10-08-2022	12:45	M. tenacissima	882 grs	758 grs	14,06%
IV	LORCA	S ^o ALMIREZ	593410	4186802	26-08-2022	12:45	M. tenacissima	907 grs	744 grs	17,97%

Fuente: Elaboración propia a partir de toma de muestras en campo / Source: Prepared by the authors based on field sampling.

TABLA III - Características de los rayos nube-tierra que han causado ignición y han desencadenado incendio forestal a lo largo del periodo 2020-2022.

TABELA III - Characteristics of cloud-to-ground lightning strikes that have caused ignition and triggered wildfires over the period 2020-2022.

CARACTERÍSTICAS DE LOS RAYOS NUBE-TIERRA QUE HAN CAUSADO IGNICIÓN Y HAN PROVOCADO INCENDIO FORESTAL EN EL PERIODO 2020 - 2022						
IMPACTO RAYO	TIPO IGNICIÓN	INCENDIO	KILOAMPERIOS	MUNICIPIO	X	Y
28/05/2020-12:49	DIRECTA	28-05-2020	68,8 kA	Mazarron	647157	4174645
04/06/2020-17:42	DIRECTA	04-06-2020	- 8,0 kA	Ricote	635161	4224468
08/07/2020-23:56	DIRECTA	08-07-2020	- 9,4 kA	Molina de Segura	656880	4235064
09/07/2020-0:01	DIRECTA	09-07-2020	- 8,8 kA	Abanilla	665623	4237369
09-07-2020 00:45	LATENTE	09-07-2020 12:25	- 7,0 kA	Caravaca de la Cruz	585358	4206300
09-07-2020 00:58	LATENTE	09-07-2020 14:17	- 8,7 kA	Caravaca de la Cruz	598243	4221804
09/07/2020-3:04	DIRECTA	09-07-2020	- 19,7 kA	La Union	688089	4161250
14/07/2020-11:24	DIRECTA	14-07-2020	- 32,1 kA	Caravaca de la Cruz	591634	4197179
14/07/2020-12:01	DIRECTA	14-07-2020	- 9,4 kA	Lorca	610896	4191164
14/07/2020-13:04	DIRECTA	14-07-2020	- 5,9 kA	Fortuna	657133	4235416
14/07/2020-14:56	DIRECTA	14-07-2020	- 12,1 kA	Mazarron	643600	4160698
14-07-2020 17:20	LATENTE	15-07-2020 16:01	6,4 kA	Moratalla - Letur	587610	4236700
14-07-2020 17:01	LATENTE	16-07-2020	25,6 kA	Moratalla	581175	4237928
14/07/2020-19:06	DIRECTA	14-07-2020	99,4 kA	Lorca	613035	4194580
01/08/2020-16:54	DIRECTA	01-08-2020	- 9,1 kA	Alhama de Murcia	630471	4193629
27/11/2020-10:00	DIRECTA	27-11-2020	- 18,9 kA	Cartagena	669474	4161718
03/04/2021-15:22	DIRECTA	03-04-2021	12,3 kA	Lorca	630862	4163180
05-06-2021 19:24	DIRECTA	05-06-2021	- 14,2 kA	Calasparra	614927	4230315
15-08-2021 15:45	DIRECTA	15-08-2021	- 11,6 kA	Lorca	588549	4177192
02-09-2021 10:04	DIRECTA	02-09-2021	- 17,2 kA	Mazarron	653702	4166959
16-04-2022 18:32	LATENTE	19-04-2022	- 33,5 kA	Jumilla	640409	4263065
02/05/2022-17:14	DIRECTA	02-05-2022	- 7,7 kA	Moratalla	612220	4235656
02/05/2022-17:27	DIRECTA	02-05-2022	- 10,0 kA	Calasparra	620297	4233479
21/06/2022-19:51	DIRECTA	21-06-2022	- 6,0 kA	Jumilla	652587	4270382
13/08/2022-0:31	DIRECTA	13-08-2022	- 25,0 kA	Jumilla	633500	4255777
13/08/2022-18:04	DIRECTA	13-08-2022	- 30,8 kA	Moratalla	590726	4230797
25/08/2022-2:23	DIRECTA	25-08-2022	- 6,4 kA	Jumilla	646697	4247216
25/08/2022-2:25	DIRECTA	25-08-2022	- 12,9 kA	Jumilla	650925	4252599
25/08/2022-2:40	DIRECTA	25-08-2022	- 50,1 kA	Yecla	663671	4260138
26-08-2022 22:09	LATENTE	27-08-2022 13:36	25,1 kA	Jumilla	641708	4247133
15-10-2022 19:40	LATENTE	16-10-2022 17:16	- 6,8 kA	Jumilla	636179	4256604

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la web “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINETview”
 Source: Prepared by the authors based on data obtained from the website “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINETview”.

o una Larga Corriente Continua “LCC” (*Long Continuing Current*) junto con la multiplicidad o un gran número de impactos, además de la polaridad. Esto es debido en parte a que se atribuye que 1 de cada 2 rayos de polaridad positiva cuenta con componente “LCC”, mientras que en el caso de los negativos es de 1 cada 4 (Flannigan & Wotton, 1991). Parece ser, por tanto, que los rayos de polaridad positiva serán el doble de efectivos en su capacidad para generar una ignición en una masa forestal frente a los de polaridad negativa.

También es de destacar que en la Región de Murcia a veces son frecuentes los rayos con multiplicidad de impactos, como los acontecidos en la Sierra del Serral, en Yecla, el 25/08/2022. Asimismo, también se confirma en la Región de Murcia que el porcentaje de rayos con kiloamperaje positivo en valor absoluto capaz de provocar un incendio forestal es superior al valor absoluto de los rayos de kiloamperaje negativo que son capaces de ocasionar un incendio forestal. Estudios anteriores ya encontraron evidencias de que

las causas de las igniciones por rayos son debidas a aquellas descargas eléctricas que poseen una corriente de larga duración o Corriente Continua Larga (LCC) (Fuquay *et al.*, 1967; Fuquay *et al.*, 1972). La duración de la corriente continua en los rayos varía significativamente (Uman, 1987). Sin embargo, hay otros autores que afirman que solamente los rayos que poseen una “LCC” (*Long Continuing Current*) son los únicos rayos que van a ser capaces de ocasionar incendios forestales (Latham y Williams, 2001). A modo de reseña, con relación a los usos del suelo dentro de las masas forestales, es de destacar la predisposición a los impactos de rayos de las zonas con un uso minero por encima de los demás usos (Prieto Sisniega, 2014). En la Región de Murcia esta situación es extrapolable a las canteras de áridos y de piedra ornamental, pues es un hecho que en el periodo de estudio en ellas y en sus inmediaciones existe una mayor predisposición y riesgo a padecer incendios forestales, como así ha ocurrido en algunas ocasiones en los alrededores de la cantera

situada en el Cerro González y en la cantera situada en el paraje de la Ceja del Reloj, en la Solana de la Sierra Sopalmo, municipio de Jumilla, o en las canteras del paraje de El Cano, en la Sierra del Almirez (Lorca).

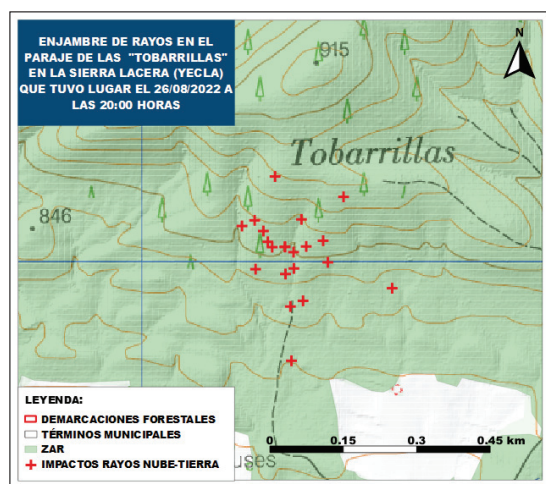


Fig. 15 - Los “Enjambres de Rayos” nube-tierra son muy frecuentes, especialmente en sierras con amplias superficies rocosas, con cantiles y peñascos abruptos aislados del resto de relieves, y generalmente desprovistos de vegetación. Ejemplo de “Enjambre de Rayos” en el paraje de Tobarrillas, en la Sierra Ladera, en el municipio de Yecla (Región de Murcia), que tuvo lugar el 26/08/2022 a las 20:00 horas; y en el que impactaron en un solo minuto 20 rayos dentro de una superficie de 6,75 ha (Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la web “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINET view”).

Fig. 15 - The “Lightning Swarms” cloud-ground are very frequent, especially in mountain ranges with large rocky surfaces, with cliffs and steep crags isolated from the rest of the landscape, and generally devoid of vegetation. Example of a “Lightning Swarm” in the Tobarrillas area, in the Sierra Ladera, in the municipality of Yecla (Region of Murcia), which took place on 26/08/2022 at 20:00 hours; and in which 20 lightning strikes occurred in a single minute within an area of 6.75 ha (Source: Prepared by the authors based on data obtained from the website “nowcastLIGHTNING.DETECTED.LINET view”).

También es de destacar que algunas veces con anterioridad a un incendio forestal inducido a una descarga eléctrica nube-tierra existe un suceso previo que hasta ahora no se había tenido en cuenta o se desconocía, fenómeno que acontece más frecuentemente de lo que creíamos y que hemos denominado como “Enjambre de Rayos”, tiene lugar cuando una gran tormenta eléctrica atraviesa determinadas zonas formadas por roquedos masivos, que conforman grandes peñascos, peñas con fuerte pendiente, desprovistas de vegetación en zonas de relieve elevado, que sobresalen con gran desnivel del resto del territorio que les circunda y tienen lugar en breve espacio de tiempo una gran multiplicidad de impactos nube-tierra en una reducida superficie forestal. Se define como “Enjambre de Rayos” el impacto de un conjunto de descargas eléctricas (≥ 3) dentro de una

superficie de una hectárea en un periodo de tiempo relativamente corto (≤ 2 minutos). La densidad de rayos que impactan en el suelo con relación a la superficie dentro del “Enjambre de Rayos” es aproximadamente de una media de tres descargas eléctricas por hectárea. El periodo de tiempo utilizado para definir su duración es igual o inferior a 2 minutos, aunque se han documentado algunos “Enjambres de Rayos” en el que durante un solo minuto han impactado 20 rayos tipo nube-tierra en una superficie de unas 6,75 hectáreas, como el acontecido en el paraje de Tobarrillas, en la Sierra Ladera (Yecla), el 26/07/2022 a las 20:00 horas (fig.15). Otro ejemplo lo constituye el gran número de descargas que tuvo lugar el 12/08/2022 a las 22:31 horas en Cerro Patoja (Jumilla), 6 impactos en 1,6 hectáreas en un solo minuto desencadenado también un incendio forestal.



Fot. 4 - Imagen aérea de la superficie calcinada en el incendio forestal de “Sierra Larga”, en Jumilla (Región de Murcia), que comenzó en el paraje de Los Cantaores el 27/08/2022 a las 13:36 horas, por un rayo latente que impactó el día anterior 26/08/2022 a las 22:09 horas, produciendo llama 15 horas después de alcanzar el suelo forestal (Fuente: UDIF - Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Photo 4 - Aerial image of the burnt area in the “Sierra Larga” wildfire, in Jumilla (Region of Murcia), which started in the Los Cantaores area on 27/08/2022 at 13:36 hours, due to. It was caused by a latent lightning strike the previous day, 26/08/2022, at 22:09 hours, producing flames 15 hours after reaching the forest floor (Source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

Patrones de edafología

Dentro de los patrones edáficos, destacan en primer lugar el gran número de incendios forestales por rayos que han acontecido dentro del suelo tipo Litosol íntegro, con un total de 69 siniestros, lo que supone el 30,13% de los incendios a lo largo del periodo analizado. Si bien es cierto que este tipo de patrón edáfico es con diferencia el más recurrente en este tipo de igniciones, hay que decir que la proporción sería aún mayor si a ellos uniéramos otros tipos de litosoles, sumando en total unos 139 siniestros, suponiendo en este caso el 60,7% del total. Destacan en segundo lugar los suelos conformados por los litosoles asociados al Xerosol cálcico, con un total de 35 incendios contabilizando el 15,28%, y en tercer lugar encontramos al Xerosol petrocálcico íntegro, con 26 sucesos computando

el 11,35%, siendo este suelo el no asociado a litosoles que más incendios por rayos ha recibido. En cuarto lugar, se encuentra el Regosol calcárico con 21 incidentes suponiendo el 9,17% del total. Los litosoles son los suelos predominantes en los relieves agrestes de la Región de Murcia, donde son más frecuentes los incendios forestales inducidos a rayos, caracterizándose de ser suelos poco profundos y desarrollados aun estando bajo una cubierta vegetal más o menos continua. Con esta información se confirma que, dadas las características de estos tipos de suelos de escasa profundidad, donde predomina el material lítico (roquedo), estos no aportan en un primer momento una excesiva cantidad de combustible (hojarasca o mantillo) a la ignición del rayo cuando este tiene lugar. En este sentido, los primeros momentos se alinean a nuestro favor facilitando y siendo decisivos para alertar y acometer su extinción, pudiéndose evitar en una proporción importante de ellos un gran incendio forestal.

Patrones de litología

Con relación a los patrones litológicos (fig. 16) es apreciable, en primer lugar, el número de incendios acontecidos dentro de la litología formada por las calizas, con un total de 59 siniestros y suponiendo el 25,76% de los mismos; en segundo lugar, se encuentran las dolomías, con un total de 53 incendios forestales que contabilizan el 23,14%. A mayor distancia encontramos las gravas, con un total de 29 incendios computando el 12,66%, y en cuarto lugar se sitúan los conglomerados con 21 sucesos y suponiendo el 9,17% del total. Sorprende que siendo las margas un material geológico que posee mucha mayor superficie en la Región de Murcia que gravas y conglomerados, acontezcan muchas menos igniciones por rayos, siendo factible que la razón se deba a que al tratarse de una material desde el punto de vista físico-químico y sedimentológico más blando y deleznable que gravas, conglomerados, calizas y dolomías, posea una

mayor capacidad para absorber y amortiguar la energía que los rayos proporcionan para hacer viable la ignición, su intensidad eléctrica, o la posibilidad de desprender pequeñas lascas incandescentes del basamento geológico como ocurre en otros materiales litológicos más duros como las cuarcitas. También puede ser debido a que las margas (Miocénicas) ocupan las cubetas terciarias del territorio regional con una menor cota altitudinal y esta sea la causa de que reciban menos impactos nube-tierra, además unido a que son suelos poco desarrollados y de escasa fertilidad, dando lugar a unas masas forestales limitadas en altura y en densidad conformando en definitiva un combustible discontinuo reactio a la viabilidad de una ignición inducida a un rayo. El resto de los incendios por rayos sobre las demás litologías son meramente representativos.

Conclusión

Para planificar y organizar la prevención de los incendios forestales de manera eficaz es necesario conocer cuáles son los factores que causan estos eventos. Este estudio presenta un esfuerzo por profundizar en el conocimiento de los factores que originan los incendios forestales por causas naturales en la Región de Murcia. Las conclusiones obtenidas indican que hay que considerar a los rayos como un importante agente de ignición en una gran parte de las áreas forestales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Por ello, los objetivos de este trabajo han sido el identificar y analizar toda una serie de patrones temporales y espaciales para determinar la casuística de los incendios forestales que tiene su origen en una ignición por rayo nube-tierra. También se ha determinado que la distribución de los incendios forestales originados por rayos no es aleatoria, sino que siguen unos determinados patrones de temporalidad horaria, quincenal y mensual, además de una tendencia al alza a lo largo del periodo, y que cada vez los incendios por rayos serán más grandes en lo que a superficie calcinada se refiere y más numerosos. Con este trabajo de investigación, además, se ha determinado que la distribución de incendios por rayos sigue una serie de patrones espaciales, motivados por la ubicación geográfica, altitud, orientación, pendiente, modelo de combustible, especies vegetales preponderantes, tipo de suelo (edafología), litología, condiciones meteorológicas, patrones bioclimáticos, humedad del material vegetal vivo fino e intensidad eléctrica de los rayos (kiloamperaje), etc. Los incendios forestales originados por rayos se han convertido en un fenómeno a tener muy en cuenta por las autoridades competentes en esta materia, como consecuencia de que las masas forestales han pasado a ser uno de los espacios más sensibles a las influencias del cambio climático antropogénico. El riesgo de simultaneidad de incendios forestales al que dan lugar las descargas eléctricas de las tormentas que ocurren en los meses más secos hacen que este fenómeno con origen natural sea cada vez

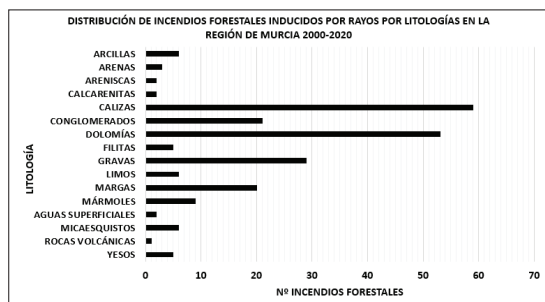


Fig. 16 - Distribución de incendios forestales inducidos por rayos por litologías en la Región de Murcia a lo largo del periodo 2000-2020 (Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la UDIF- Unidad de Defensa contra Incendios Forestales de la Región de Murcia).

Fig. 16 - Distribution of lightning-induced wildfires by lithology in the Region of Murcia over the period 2000-2020 (Data source: UDIF - Forest Fire Defense Unit).

más peligroso. En este sentido, toda la información que pueda ser obtenida, identificando patrones temporales y espaciales, debe de ser estudiada y utilizada con el objetivo de mejorar la gestión y la prevención, para evitar en la medida de lo posible que se produzcan grandes incendios forestales, dentro de un clima cambiante que se prevé que podría agravar este tipo de sucesos y conflictos ambientales asociados de una manera más recurrente en las próximas décadas.

Agradecimientos

El primer autor (Miguel Ángel López Sandoval) ofrece los siguientes agradecimientos: A la memoria de mi padre, a mi hijo Marco, a mi mujer y a toda mi familia, a Ramón García Marín director de mi tesis doctoral, a la empresa ORTHEM Servicios y Actuaciones Ambientales, S.A.U., perteneciente al GRUPO HOZONO GLOBAL, donde trabajo, y a todos los componentes de la Unidad de Defensa contra Incendios Forestales (UDIF) de la Región de Murcia; gariteros, brigadistas, técnicos y Agentes Medioambientales, que con el esfuerzo conjunto de todos, conseguimos en la medida de lo posible mitigar los daños que los incendios forestales ocasionan al medio natural de nuestra región.

Bibliografía

- Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior [Grass, shrub, timber, and slash, photographic examples, danger ratings]. *USDA Forest Service general technical report INT-Intermountain Forest and Range Experiment Station (USA)*.
- Beverly, J. L., & Wotton, B. M. (2007). Modelling the probability of sustained flaming: predictive value of fire weather index components compared with observations of site weather and fuel moisture conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 161-173.
- Blackmarr, W. H. (1972). Moisture content influences ignitability of slash pine litter. Res. Note SE-173. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 7.
- Broncano, M. J., & Retana, J. (2004). Topography and forest composition affecting the variability in fire severity and post-fire regeneration occurring after a large fire in the Mediterranean basin. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 209-216.
- Calderón Cortés, D., (2021). Desmontando el rayo en Incendios Forestales. *Revista Incendios y Riesgos Naturales*. Diciembre 2021/Núm. 5.
- Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, G. B., Zumbrennen, T., & Spinedi, F. (2006). Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. *Forest Ecology and Management*, 234(1), S68.
- Conesa García, C. (Ed.). (2007). *El medio físico de la Región de Murcia*. Murcia: Editum.
- Cooray, V., (2003). The Lightning Flash. *The Institution of Electrical Engineers*, 574 pp. London.
- Curt, T., Ganteaume, A., Alleaume, S., Borgniet, L., Chandiooux, O., Jappiot, M., & Martin, W. (2007, May). Vegetation flammability and ignition potential at road-forest interfaces (southern France). In *Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference* (pp. 14-18).
- Díaz-Avalos, C., Peterson, D. L., Alvarado, E., Ferguson, S. A., & Besag, J. E. (2001). Space time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(9), 1579-1593.
- Dissing, D., and D. L. Verbyla, (2003). Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation. *Can. J. For. Res.*, 33, 770-782.
- Ellis, P. F. (2000). *The aerodynamic and combustion characteristics of eucalypt bark: a firebrand study*.
- Ferreira, M. C., & Ferreira, G. S. (1987). Impacte de fogo nos escolitídeos associados com Pinheiro Bravo. *Floresta*, 4, 12-14.
- Flannigan, M. D., & Wotton, B. M. (1991). Lightning-ignited Forest fires in northwestern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(3), 277-287.
- Flannigan, M. D., Logan, K. A., Amiro, B. D., Skinner, W. R. y Stocks, B. J. (2005): Future Area Burned in Canada. *Climatic Change*, 72, 1, 1-16.
- Frandsen, W. H. (1987). The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smoldering forest duff. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(12), 1540-1544.
- Frandsen, W. H. (1997). Ignition probability of organic soils. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(9), 1471-1477.
- Fuquay, D. M., Baughman, R. G., Taylor, A. R., & Hawe, R. G. (1967). Characteristics of seven lightning discharges that caused forest fires. *Journal of Geophysical Research*, 72(24), 6371-6373.
- Fuquay, D. M., Taylor, A. R., Hawe, R. G., & Schmid Jr, C. W. (1972). Lightning discharges that caused forest fires. *Journal of Geophysical Research*, 77(12), 2156-2158.
- García Marín, R., & Conesa, C. (2006). Secuencias pluviométricas secas de larga duración en la cuenca del Guadalentín (Murcia-Almería). En: J. M. Cuadrat Prats, M. A. Saz Sánchez, S. M. Vicente Serrano, S. Lanjeri, M. de Luis Arrillaga y J. C. González-Hidalgo (Eds.). *Clima*,

- sociedad y medio ambiente*. Zaragoza: Asociación Española de Climatología, 1-12. URL: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/8844>
- García Marín, R., & García-Tornel, F. C. (2008). Frecuencia y evolución de rachas secas en la cuenca del Guadalentín (Sureste de España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, Vol. 48, 71-89.
- George, P. (2003). Diccionario Akal de geografía (Vol. 5). Ediciones Akal.
- González-Ochoa, A. I., de Las Heras, J., Torres, P., & Sánchez-Gómez, E. (2003). Mycorrhization of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinaster* Aiton seedlings in two commercial nurseries. *Annals of forest science*, 60(1), 43-48.
- Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Martínez, E., Madrigal, J., Lampin-Cabaret, C., & Fonturbel, M. T. (2002, November). Flammability of some fuel beds common in the South-European ecosystems. In *IV International Conference Forest Fire Research*.
- Hartford, R. A. (1993). Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture mineral content and organic bulk density. Graduate Student Theses, Dissertations, & Professional Papers. 7385. University of Montana. <https://scholarworks.umt.edu/etd/7385>
- Jappiot, M., Curt, T., Lampin, C., Borgniet, L., Vinet, O., Louis, S., & Estève, R. (2007, May). Characteristics and flammability of French Mediterranean dead litter fuels. In *Poster at the International Wildland Fire Conference, Seville, Spain*, 13-17.
- Johnson, E. A. (1992): Fire and vegetation dynamics: studies from the North American boreal forest. Cambridge, United Kingdom. *Cambridge University Press*.
- Komarek, E. V. (1967, November). The nature of lightning fires. In *Tall Timbers Fire Ecology Conference*, vol. 7, 5-41.
- Latham, D., & Williams, E. (2001). Lightning and forest fires. In *Forest Fires* (pp. 375-418). Academic press.
- Lawson, B. D., Frandsen, W. H., Hawkes, B. C., & Dalrymple, G. N. (1997). Probability of sustained smoldering ignition for some boreal forest duff types. Edmonton, Alberta, *Can For Serv. For Manage*. Note 63, 11.
- Lericos, T. P., H. E. Fuelberg, A. I. Watson, and R. L. Holle, (2002). Warm season lightning distributions over the Florida peninsula as related to synoptic patterns. *Wea. Forecasting*, 17, 83-99.
- Lin, C. C. (1999). Modeling probability of ignition in Taiwan red pine forests. *臺灣林業科學*, 14(3), 339-344.
- López, R. E., and R. L. Holle, (1986). Diurnal and spatial variability of lightning activity in northeastern Colorado and Central Florida during the summer. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1288-1312.
- Lozano, F. J., Suárez-Seoane, S., Kelly, M., & Luis, E. (2008). A multi-scale approach for modeling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 708-719.
- Manzello, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R., & Yang, J. C. (2006). On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire and Materials: An International Journal*, 30(1), 77-87.
- Marino, E., Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., & Fernández, C. (2010). Flammability descriptors of fine dead fuels resulting from two mechanical treatments in shrubland: a comparative laboratory study. *International Journal of Wildland Fire*, 19(3), 314-324.
- McAlpine, R. S., & Wakimoto, R. H. (1991). The acceleration of fire from point source to equilibrium spread. *Forest Science*, 37(5), 1314-1337.
- Mesón, M., & Montoya, M. (1993). *Selvicultura mediterránea*. Madrid: Mundiprensa.
- Minnich, R. A., & Bahre, C. J. (1995). Wildland fire and chaparral succession along the California Baja-California boundary. *International Journal of Wildland Fire*, 5(1), 13-24.
- Miyanishi, K., & Johnson, E. A. (2002). Process and patterns of duff consumption in the mixed wood boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(7), 1285-1295.
- Nash, C. H., & Johnson, E. A. (1996). Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(10), 1859-1874.
- Nieto, H., Aguado, I., Chuvieco, E., (2006). Estimation of lightning-caused fires occurrence probability in central Spain. *Proc 5th International conference on forest fire research*. Coimbra, Portugal, Nov 27-30, 15 p.
- Orville, R. E., G. R. Huffines, W. R. Burrows, R. L. Holle, and K. L. Cummins (2002). The North American Lightning Detection Network (NALDN)—First results: 1998-2000. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2098-2109.
- Otway, S. G., Bork, E. W., Anderson, K. R., & Alexander, M. E. (2007). Predicting sustained smoldering combustion in trembling aspen duff in Elk Island National Park, Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 16(6), 690-701.
- Pacheco, C. E., Aguado, I., Nieto, H., (2009). Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *Geofocus* 9, 232-249.
- Pausas, J. G. (2020). *Incendios forestales*. Los libros de la Catarata.

- Pérez-Gorostiaga, P., Vega J.A., Fonturbel, M. T., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Martínez, E., Lampin, C., Blanc, L., Colin, P. Y., (2002). Capability of ignition of some forest firebrands. In "Proceedings of the 4th International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety", November 2002, Luso-Coimbra, Portugal.
- Pineda Rüegg, N., Montaña Puig, J., & Van der Velde, O. A. (2012). Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. *Atmospheric research*, 135, 380-387.
- Plucinski, M. P. (2003). *The investigation of factors governing ignition and development of fires in heathland vegetation (PhD thesis)*. University of New South Wales.
- Plucinski, M. P., & Anderson, W. R. (2008). Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5), 628-637.
- Podur, J., Martell, D. L., & Csillag, F. (2003). Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998. *Ecological modelling*, 164(1), 1-20.
- Price, C., & Rind, D. (1994a). The impact of a 2x CO₂ climate on lightning-caused fires. *Journal of Climate*, 7 (10), 1484-1494.
- Price, C., & Rind, D. (1994b). Modeling global lightning distributions in a general circulation model. *Monthly Weather Review*, 122 (8), 1930-1939.
- Prieto Sisniga, D. (2014). *Análisis de las descargas eléctricas en el principado de Asturias*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo, 54 p.
- Pyne, S. J. (2011). *Fire: a brief history*. University of Washington Press.
- Rambal, S., & Hoff, C. (1998). Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change. In 'Large Forest Fires'. (Ed. JM Moreno) pp. 187-213.
- Reardon, J., Hungerford, R., & Ryan, K. (2007). Factors affecting sustained smouldering in organic soils from pocosin and pond pine woodland wetlands. *International Journal of Wildland Fire*, 16(1), 107-118.
- Rothermel, R. C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires (Vol. 143). *US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station*.
- Rothermel, R. C. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains (Vol. 438). *US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station*.
- Sánchez-Toribio, M. I., García-Marín, R., Conesa-García, C., & López-Bermúdez, F. (2010). Evaporative demand and water requirements of the principal crops of the Guadalentin valley (SE Spain) in drought periods. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, 66-75.
- Satoh, K., Yang, L. Z., & Yang, K. T. (2003). TED-aj03-551. Study of forest fire initiation due to lighted cigarette: measurement and observation of flaming probability of dried leaves. In *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference* (Vol. 2003, No. 6, p. 346). 日本機械学会.
- Sturman, A. P., & Tapper, N. J. (1996). The weather and climate of Australia and New Zealand. *Oxford University Press*. USA.
- Tanskanen, H., Granström, A., Venäläinen, A., & Puttonen, P. (2006). Moisture dynamics of moss-dominated surface fuel in relation to the structure of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3), 189-198.
- Uman, M. A. (1987). The lightning discharge. *Academic*, San Diego, California.
- Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian forest fire weather index system* (Vol. 35), Forestry Technical Report - Canadian Forestry Service.
- Vankat, J. L. (1985). General patterns of lightning ignitions in Sequoia National Park, California. In *JE Lotan, BM Kilgore, WC Fischer, and RW Mutch, technical coordinators. Proceedings of the symposium and workshop on wilderness fire. USDA General Technical Report INT-182, Ogden, Utah, USA*, 408-411.
- Vázquez, A., & Moreno, J. M. (1998). Patterns of lightning-, and people-caused fires in peninsular Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 8(2), 103-115.
- Vélez, R. (2009). *Los índices meteorológicos de peligro. En: La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Segunda Edición. McGraw-Hill / Interamericana de España, S. A. U. 151-161.
- Viegas, D. X., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of wildland fire*, 9(4), 235-246.