

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivos . . . . .	5
1.2. Hipótesis . . . . .	6
1.3. Revisión bibliográfica . . . . .	6
<b>Bibliografía</b>	<b>9</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El fuego es un factor natural clave en los ecosistemas terrestres.<sup>1</sup> Tan solo necesita de tres elementos básico que se encuentran en abundancia en la superficie de la Tierra: oxígeno, combustible y calor, por lo que no sorprende que su presencia en este planeta se remonte muy atrás en el tiempo. Hay pruebas de la existencia de fuego hace 400 millones de años y desde hace 350 millones de años se producen incendios en la Tierra de forma frecuente. Para tener con qué comparar esta cifra, las hipótesis más aceptadas indican que los primeros Homo Sapiens datan de hace unos 200 mil años (FUENTE)

El fuego ha condicionado la evolución y la dispersión de plantas, el desarrollo de los biomas, la formación de suelos y los ciclos hidrológicos y erosivos. Se trata, por tanto, de uno de los procesos platenarios clave. La presencia del fuego en los ecosistemas terrestres ha dado lugar a numerosas adaptaciones en los seres vivos. En el caso de los ecosistemas mediterráneos, donde los incendios son frecuentes, la vegetación ha desarrollado adaptaciones que le permiten adaptarse al fuego. Un buen ejemplo de esta adaptación al fuego lo encontramos en el pino carrasco (*Pinus halepensis*), cuyas piñas que cuelgan de las ramas de la copa solo se abren al calor de las llamas.

El control del fuego fue clave para el desarrollo de la humanidad. Cocinar alimentos, abrir zonas de cultivos, facilitar el traslado de la población, quemar restos de cosechas o eliminar plagas son solo algunos de los usos que se le ha dado al fuego desde que los primeros homínidos lo descubrieron hace 1,5 millones de años. Sin embargo, la relación del hombre con el fuego parece haber cambiado radicalmente en los últimos años.

La industrialización de las sociedades modernas, la sustitución del uso de biomasa por combustibles fósiles y el éxodo rural junto con el abandono de la agricultura han provocado el cese de la explotación de los montes, generando grandes acumulaciones de biomasa que actúa como combustible para los incendios forestales. De esta forma, el fuego ha pasado de ser una herramienta para el hombre, como ha sido a lo largo de la historia, a convertirse en un gran problema ambiental.

A todo esto hay que sumar los efectos del cambio climático, que a través del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, ha provocado que se alargue la estación de incendios y ha aumentado las situaciones de riesgo alto [8].

En España, los incendios forestales figuran en el Plan Estratégico Estatal del Patrimonio

---

<sup>1</sup>El contenido de los cuatro primeros párrafos de esta introducción está extraído principalmente de Mataix Solera y Cerdà [7]

---

Natural y de la Biodiversidad a 2030 como una de las principales presiones y amenazas para el patrimonio natural y la biodiversidad en España, considerándose “el principal elemento de degradación de los ecosistemas forestales, con importantes repercusiones sobre bienes e incluso vidas humanas”.

En Andalucía este problema toma una dimensión especial al tratarse de la segunda comunidad de España con más terreno forestal (cuenta con 4.325.378 ha de suelo forestal que suponen el 49.37 % de su superficie) y contar además con el *hotspot* de biodiversidad de Sierra Nevada, uno de los enclaves con mayor diversidad del continente.

En 2022, 15.786,64 ha fueron afectadas por el fuego en Andalucía, prácticamente el doble de la media anual de los 10 años anteriores, 8873,68 ha. Ese mismo año, el 91.91 % de las actuaciones forestales<sup>2</sup> con causa conocida fueron de origen antrópico. De estos, el 48.20 % fueron debidos a negligencias, el 38.40 % fueron intencionados y el 13.40 % fueron accidentales. Tan solo el 5.25 % de las actuaciones forestales que ocurrieron en Andalucía en 2022 fueron debida a causas naturales [1]. Estas cifras ponen de manifiesto la importancia de considerar el factor humano en el estudio de los incendios forestales.

En la siguiente cita, extraída de Moreno et al. [8], los autores enfatizan la necesidad de considerar el factor humano en la predicción de incendios forestales, e indican la existencia de factores que influyen en que unas determinadas zonas tengan un mayor riesgo de verse afectas por incendios forestales que otras, entre los que mencionan el tipo y la configuración de la vegetación:

*A pesar de la importancia de la meteorología en los incendios, la capacidad predictiva de la ocurrencia de incendios [...] en base a variables meteorológicas [...] suele ser baja. [...] Esto es debido a que la mayor parte de los incendios en España es de de origen humano, lo que dificulta su predictibilidad. Así, las igniciones no ocurren al azar, ni en el espacio ni en el tiempo. [...] El territorio no se quema de manera aleatoria, siendo normal que unas zonas ardan más que otras. [...] Unos tipos de vegetación suelen arder más frecuentemente que otros. [...] La probabilidad de que un incendio se propague se ve favorecida por la configuración espacial de las manchas de vegetación que conforman el paisaje.*

Los incendios forestales son un proceso sumamente complejo en el que se interrelacionan una gran cantidad de factores como la fuente de ignición, la composición del combustible, las condiciones meteorológicas o la orografía del terreno, además de la ya mencionada acción humana. Desde el estudio de los procesos de combustión que ocurren a escala molecular al estudio de la propagación de los incendios forestales, el estudio de los mismos puede abordarse desde numerosos puntos de vista y con distintos enfoques que van desde la ecología a la física, pasando por la estadística. Pero cuando se trata de construir los modelos a gran escala necesarios para llevar a cabo la gestión de los incendios forestales, las limitaciones computacionales, la cantidad y calidad de los datos requeridos y la interacción de una enorme cantidad de factores hacen que la modelización físico-matemática no sea, en muchos, casos un enfoque factible. Es por ello, que los modelos empíricos y estadísticos han tomado cada vez más peso en el estudio de los incendios forestales, aunque su utilidad depende en muchos casos de la calidad y cantidad de los datos disponibles, así como de la capacidad los modelos de representar relaciones no lineales presentes en los datos (Jain

---

<sup>2</sup>Según se indica en la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF), se usa el término actuaciones forestales para englobar a conatos (de extensión inferior a 1 ha) e incendios forestales (de extensión superior a 1 ha)

et al. [4]).

Understanding and better predicting wildfires is therefore crucial in several important areas of wildfire management, including emergency response, ecosystem management, land-use planning, and climate adaptation to name a few.

El auge experimentado por la inteligencia artificial en las últimas décadas como consecuencia del desarrollo

El auge de la inteligencia artificial de las últimas décadas promovido por el desarrollo tecnológico. Por ello, no es de extrañar que desde la década de los 90 se exploren formas de construir mo

hotspot de biodiversidad

A corto plazo, la influencia del fuego en los ecosistemas terrestres es la eliminación y modificación de la cubierta forestal, que sirve de combustible a las llamas. Sin embargo, a largo plazo, su influencia

Los incendios forestales son un factor natural de los ecosistemas terrestres.

El fuego ha dado forma a los ecosistemas terrestres, acelerando los procesos de erosión, acelerando las dinámicas geomorfológicas y, en definitiva, esculpiendo las formas terrestres. La destrucción de vastas áreas de bosque, la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad

, además de poner en riesgo infraestructuras y vidas humanas.

Andalucía es la segunda comunidad de España con más terreno forestal, con 4.325.378 ha de suelo forestal que suponen el 49.37 % de su superficie.

En 2022, 15.786,64 hectáreas fueron afectadas por el fuego en Andalucía, prácticamente el doble de la media anual de los 10 años anteriores, 8873,68 hectáreas [Memoria Plan INFOCA 2022].

En el Plan Estratégico Estatal del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad a 2030 [Cita] “identifica las principales presiones y amenazas, entre las cuales destaca el aumento de la superficie forestal afectada por incendios forestales en 2022”.

## 1.1. Objetivos

El objetivo de esta investigación es construir modelos de *Machine Learning* que permitan predecir incendios forestales en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Para abordar dicho objetivo, se realizarán las siguientes tareas:

1. Construir un conjunto de datos que permita la realización de análisis estadísticos y la posterior construcción de modelos de *Machine Learning* (ML) para la predicción de incendios forestales en Andalucía a partir de un estudio previo del problema.
2. Modelizar el riesgo de incendio forestal usando distintos algoritmos de ML y comparar sus resultados
3. Analizar el desempeño de los modelos en la realidad estudiando potenciales casos de interés.

## 1.2. Hipótesis

## 1.3. Revisión bibliográfica

Cortez y Morais [2]: En esta investigación se evalúa el rendimiento de distintos modelos de Machine Learning, como Máquinas de Soporte Vectorial, Árboles de Decisión, Regresión Lineal Múltiple, Naive Bayes, Bosques Aleatorios y Redes Neuronales, para predecir el área quemada por los incendios forestales en el Parque Natural de Montesinho, en el norte de Portugal, a partir de información meteorológica. Los mejores resultados se obtienen para el modelo de SVM considerando 4 variables explicativas: temperatura, humedad relativa, precipitaciones y viento.

Jain et al. [4]: El artículo revisa las aplicaciones del Machine Learning (ML) en la ciencia y gestión de incendios forestales, destacando su uso en seis dominios clave: caracterización de combustibles, detección y mapeo de incendios; clima y cambio climático; ocurrencia, susceptibilidad y riesgo de incendios; predicción del comportamiento del fuego; efectos del fuego; y gestión de incendios. Se identifican 300 publicaciones hasta finales de 2019, mostrando el uso frecuente de algoritmos de ML como random forests, MaxEnt, redes neuronales artificiales, árboles de decisión, máquinas de vectores de soporte y algoritmos genéticos. La revisión enfatiza las ventajas y limitaciones de estos métodos y subraya la necesidad de combinar la experiencia en la ciencia del fuego con técnicas avanzadas de ML para poder construir modelos realistas y útiles.

Vilar del Hoyo et al. [11]: Se aplica regresión logística en una cuadrícula de  $1 \times 1$  km en la Comunidad Autónoma de Madrid, utilizando datos socioeconómicos como variables predictoras para representar los factores antropogénicos relacionados con el riesgo de incendio. También se evalúa otro enfoque basado en la predicción de la densidad de puntos de ignición en una cuadrícula de  $10 \times 10$  km, utilizando funciones Kernel. La ocurrencia histórica de incendios de 2000 a 2005 se utiliza como variable de respuesta. El rendimiento de los modelos se evalúa con los incendios ocurridos en 2006 y 2007, obteniendo un AUC de 0.70 y 0.67 para ambos modelos, respectivamente.

Liz-López et al. [5]: En este artículo se presenta el nuevo Modelo de Evaluación de Incendios Forestales (WAM, por sus siglas en inglés) que utiliza deep learning para anticipar el impacto de los incendios a partir de información meteorológica satelital y el NDVI en Castilla y León y Andalucía. Las variables respuesta del modelo son el área quemada, el tiempo de control y extinción, y la cantidad de recursos humanos, aéreos y pesados necesarios para la extinción del incendio. Emplea una red convolucional residual que realiza regresiones sobre variables atmosféricas e índice de verdor. El WAM se preentrena con 100,000 ejemplos de datos sin etiquetar y se ajusta con un pequeño conjunto de 445 muestras etiquetadas.

Gutiérrez-Hernández et al. [3] En este trabajo analiza la superficie calcinada por los incendios forestales ocurridos entre 1975 y 2013 en la Comunidad Autónoma de Andalucía en función de 15 variables explicativas: altitud, insolación, pendiente, precipitación invernal, precipitación estival, temperatura estival, velocidad del viento, frecuencia del viento, superficie protegida, superficie de monte público, superficie de usos forestales, distancia a viario, distancia a zonas pobladas, saldo demográfico y saldo ganadero. Se aplica un modelo de Regresión Lineal Múltiple y un Modelo de Regresión Geográficamente Ponderada.

Los mejores resultados se obtienen en el segundo modelo, puesto que permite considerar la estructura de correlaciones espaciales presentes en los datos.

Martínez-Fernández et al. [6] En este artículo se identifican los factores humanos asociados con un mayor riesgo de incendio forestal en España y se analiza la distribución espacial de la aparición de incendios forestales en el país tomando como unidad de estudio el municipio. Se consideran 108 variables, de las cuales se seleccionan 29 tras un primer estudio exploratorio, las cuales se usan para entrenar un modelo de regresión logística para estimar la probabilidad de una alta o baja ocurrencia de incendios. Finalmente, tan solo resultan significativas 13 de las variables consideradas.

Stojanova et al. [10] Sayad et al. [9]





# Bibliografía

- [1] (2023). «Datos Estadísticos Andalucía del 01/01/2022 al 31/12/2022 Plan INFOCA, Centro Operativo Regional». *Informe técnico*, Consejería de Sostenibilidad, Medioambiente y Economía Azul, Junta de Andalucía.  
<https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/55229821/memoria-infoca-Andalucia-2022.pdf/b95604c3-53d7-7564-bbb3-6c8a4f8c332a?t=1713950214344>.
- [2] CORTEZ, PAULO y MORAIS, ANÍBAL DE JESUS RAIMUNDO (2007). «A data mining approach to predict forest fires using meteorological data». <https://hdl.handle.net/1822/8039>.
- [3] GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, OLIVER; SENCIALES-GONZÁLEZ, J. M. y GARCÍA, LUIS V. (2015). «Los incendios forestales en Andalucía: investigación exploratoria y modelos explicativos».
- [4] JAIN, PIYUSH; COOGAN, SEAN C.P.; SUBRAMANIAN, SRIRAM GANAPATHI; CROWLEY, MARK; TAYLOR, STEVE y FLANNIGAN, MIKE D. (2020). «A review of machine learning applications in wildfire science and management». *Environmental Reviews*, **28**(4), pp. 478–505. doi: 10.1139/er-2020-0019.  
<https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>.
- [5] LIZ-LÓPEZ, HELENA; HUERTAS-TATO, JAVIER; PÉREZ-ARACIL, JORGE; CASANOVA-MATEO, CARLOS; SANZ-JUSTO, JULIA y CAMACHO, DAVID (2024). «Spain on fire: A novel wildfire risk assessment model based on image satellite processing and atmospheric information». *Knowledge-Based Systems*, **283**, p. 111198. ISSN 0950-7051. doi: 10.1016/j.knosys.2023.111198.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705123009486>.
- [6] MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, JESÚS; VEGA-GARCÍA, CRISTINA y CHUVIECO, EMILIO (2009). «Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain». doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.005.
- [7] MATAIX SOLERA, JORGE y CERDÀ, ARTEMI (2009). «Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos». En: Cátedra Divulgación de la Ciencia Universitat de València (Ed.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España: el estado de la cuestión visto por los científicos españoles*, pp. 25–54. Publicacions de la Universitat de València. ISBN 978-84-370-7653-9.
- [8] MORENO, J. M.; URBIETA, I.R.; BEDIA, J.; GUTIÉRREZ, J.M. y VALLEJO, V.R.. «Los incendios forestales en España ante el cambio climático». <https://www.miteco.gob.es/content/dam/>

miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap34-losincendiosforestalesenespanaantealcambioclimatico\_tcm30-70236.pdf.

- [9] SAYAD, YOUNES OULAD; MOUSANNIF, HAJAR y AL MOATASSIME, HASSAN (2019). «Predictive modeling of wildfires: A new dataset and machine learning approach». *Fire Safety Journal*, **104**, pp. 130–146. ISSN 0379-7112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.006>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711218303941>.
- [10] STOJANOVA, DANIELA; KOBLER, ANDREJ; OGRINC, PETER; ŽENKO, BERNARD y DŽEROSKI, SAŠO (2012). «Estimating the risk of fire outbreaks in the natural environment». *Data mining and knowledge discovery*, **24**, pp. 411–442.
- [11] VILAR DEL HOYO, L.; ISABEL, MARTÍN; M.P. y MARTÍNEZ VEGA, F.J. (2011). «Logistic regression models for human-caused wildfire risk estimation: analysing the effect of the spatial accuracy in fire occurrence data». *European Journal of Forest Research*, **130**, pp. 983–996. doi: 10.1007/s10342-011-0488-2.