

TRABAJO FIN DE MÁSTER

VISUALIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE TRAYECTORIAS DE COMPORTAMIENTO POTENCIAL DEL FUEGO EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y GESTIÓN FORESTAL

Autor: Sergio Merchán García

Director académico: Marcos Rodrigues Mimblero
Director en prácticas: Miquel Febrer Martínez

Máster Universitario en
Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección

Noviembre de 2023



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

En la actualidad, existe una gran preocupación por los incendios forestales y su creciente impacto debido al cambio climático. El papel de la gestión forestal en la mitigación del riesgo de incendio, entendido como el diseño de tratamientos silvícolas o actuaciones específicas como quemas prescritas, es esencial. Para comprender la capacidad de la gestión forestal en la mitigación del riesgo (reducción del peligro de incendio y/o de sus impactos negativos) es crucial analizar los posibles escenarios de gestión (por ejemplo, promoción del uso de biomasa, fomento del stock de carbono o adaptación al cambio climático) en distintos contextos de evolución climática (basado en los Shared Socioeconomic Pathways). Es además de vital importancia considerar de manera implícita el efecto del clima en la dinámica de las comunidades forestales, ya que su evolución y necesidad gestión están también supeditadas a las condiciones que se puedan dar en el futuro.

En el presente Trabajo Fin de Máster, se ha diseñado una estrategia para la disseminación de los resultados de FIREPATHS "Trayectorias del peligro de incendio en escenarios de cambio climático y gestión". Para ello, se ha diseñado e implementado un modelo de datos, elaborando una base de datos a partir del mismo. La estrategia de estructuración de datos permite el desarrollo de aplicaciones web mapping así como la comparación de los escenarios evaluados en el proyecto.

Específicamente, se ha trabajado con indicadores de trayectorias de peligro meteorológico de incendios (basado en componentes del Canadian Fire Weather Index) y comportamiento del fuego (métricas de potencial de propagación del fuego y probabilidad de fuego de copa), lo que permite comprender el efecto del cambio climático en el potencial del fuego para decidir la estrategia de gestión más adecuada.

Palabras Clave: incendios forestales, riesgo, mitigación, gestión forestal, escenarios climáticos, web mapping, aplicaciones de código abierto.

Abstract

There is currently great concern about forest fires and their increasing impact owing to climate change. The role of forest management in fire risk mitigation, understood as the design of silvicultural treatments or specific actions such as prescribed burning, is essential. To understand the capacity of forest management in risk mitigation (reduction of fire hazard and/or its negative impacts) it is crucial to analyze possible management scenarios (e.g., promotion of use of biomass, fostering of carbon stock or adaptation to climate change) in different contexts of climate evolution (based on the Shared Socioeconomic Pathways). It is also of vital importance to implicitly consider the effect of climate on the dynamics of forest communities, since their evolution and management needs are also subject to future climate conditions.

In this Master Thesis, a strategy has been designed for the dissemination of the results of the project FIREPATHS "Fire hazard trajectories in climate change and management scenarios". For this purpose, a data model has been developed and implemented, and a database has been created from it. The data structuring strategy allows the development of web mapping applications as well as the comparison of the scenarios evaluated in the project.

Specifically, we have worked with indicators of trajectories of meteorological wildfire danger (based on components of the Canadian Fire Weather Index) and fire behavior (metrics of fire spread potential and crown fire probability), which allows us to understand the effect of climate change on fire potential in order to decide the most appropriate management strategy.

Key Words: forest fires, risk, mitigation, forest management, climate scenarios, web mapping, open-source applications.

Índice

| | | |
|--------|--|---------|
| 1. | Introducción | pág. 1 |
| 1.1. | Contexto de la investigación..... | pág. 1 |
| 1.1.1. | Difusión de la información geográfica | pág. 1 |
| 1.1.2. | La gestión forestal en la mitigación del riesgo de incendio | pág. 1 |
| 1.2. | Estado de la cuestión y justificación del trabajo | pág. 2 |
| 1.3. | Contexto del trabajo | pág. 3 |
| 2. | Objetivos | pág. 4 |
| 3. | Área de estudio | pág. 5 |
| 4. | Metodología..... | pág. 5 |
| 4.1. | Datos y variables de entrada..... | pág. 6 |
| 4.1.1. | Parcelas | pág. 6 |
| 4.1.2. | Variables climáticas | pág. 6 |
| 4.1.3. | Variables de peligro meteorológico | pág. 7 |
| 4.1.4. | Variables de comportamiento del fuego | pág. 8 |
| 4.2. | Escenarios | pág. 9 |
| 4.2.1. | Escenarios climáticos | pág. 9 |
| 4.2.2. | Escenarios de gestión forestal | pág. 9 |
| 4.3. | Cálculo de tendencias temporales | pág. 11 |
| 4.4. | Diseño e implementación del modelo de datos | pág. 12 |
| 4.5. | Creación de la base de datos..... | pág. 12 |
| 4.6. | Metadatos | pág. 13 |
| 5. | Resultados | pág. 14 |
| 5.1. | Modelo de datos | pág. 14 |
| 5.2. | Tendencias en el peligro y comportamiento del fuego..... | pág. 16 |
| 5.3. | Situación preliminar del visor cartográfico..... | pág. 17 |
| 6. | Discusión | pág. 20 |
| 6.1. | Evolución del peligro meteorológico y del comportamiento del fuego..... | pág. 20 |
| 6.2. | Implementación de visores de información espacial | pág. 20 |
| 7. | Conclusiones | pág. 21 |
| | Bibliografía | pág. 21 |
| | Anexos..... | pág. 25 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto de la investigación

1.1.1. Difusión de la información geográfica.

En la actualidad, existe un auge en el uso de las herramientas espaciales para el análisis de fenómenos variados (Goodchild, 2019). El análisis espacial puede definirse como aquel subconjunto de técnicas analíticas cuyos resultados dependen del marco, o cambiarán si el marco cambia, o si los objetos se repositionan dentro de él. Han surgido paquetes SIG especializados dirigidos específicamente al análisis espacial (por ejemplo, Idrisi; Bailey y Gatrell, 1995). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han considerado la clave para implantar métodos de análisis espacial, hacerlos más accesibles a un abanico más amplio de usuarios y a su vez, ser utilizados ampliamente para tomar decisiones eficaces y apoyar la investigación científica. Los SIG han hecho que métodos de análisis, que antes estaban reservados a artículos de revistas especializadas, sean fáciles y sencillos de utilizar (Goodchild et al., 1999).

El fenómeno de “democratización” de la información geográfica en el que estamos inmersos como sociedad, requiere llevar la comunicación a diversos receptores del mensaje subyacente, desde un público altamente especializado a una audiencia más generalista, pasando por interlocutores como gestores o políticos (Pombo, 2019). Los visores cartográficos son una de las herramientas que más utilizan para la difusión de información geográfica. Su objetivo es el de ser un vehículo de difusión de la información (con grados diversos de complejidad) con un lenguaje técnico fundamentado en la cartografía clásica, que permita transmitir el mensaje contenido en la información al público. El diseño de un visor eficaz requiere de unos cimientos sólidos, fundamentados en una arquitectura robusta que combina tecnología para la gestión, organización, manipulación y representación de la información. Esta combinación de funcionalidades pasa habitualmente por el diseño de un Sistema de Información Geográfica a través de bases de datos espaciales, en combinación con servicios, estándares de datos espaciales (y sus metadatos) y tecnología web que sostenga la aplicación de visualización enlazada a datos y metadatos.

Uno de los mayores avances en la difusión y generalización de las bases de datos espaciales es la existencia de software libre para la producción, edición y visualización de la misma. Un ejemplo de que esto es posible es este propio Trabajo Fin de Máster el cual se ha realizado exclusivamente con este tipo de software, gestión de base de datos con *PostgreSQL* o la librería de *web mapping Open Layers*, por mencionar algunos ejemplos.

1.1.2. La gestión forestal en la mitigación del riesgo de incendio.

Uno de los ámbitos de gran multitud de información geográfica y análisis espacial son los incendios forestales y, más concretamente, la evaluación del riesgo de incendio (Chuvieco et al., 2023). Los incendios forestales son una de las principales perturbaciones que afectan a los ecosistemas forestales a nivel mundial, y especialmente en ambientes Mediterráneos (Miezite et al., 2022; Bowman et al., 2009, San-Miguel-Ayanz et al., 2012). La vertiente occidental de Europa se enfrenta a un escenario de cambio climático marcado por un aumento de las temperaturas, patrones de precipitación variables y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos. El impacto del fuego en los bosques puede ser tanto beneficiosos como perjudiciales.

No obstante, el peligro de incendio parece estar aumentando por el calentamiento climático, lo que pronostica unas condiciones más favorables para la incidencia del fuego (Moreno, 2007); Williams et al., 2019). En 2017, el área quemada de los países del Mediterráneo fue significativamente superior al ser comparados con la media de años anteriores; Portugal aumentó un 535%, Francia un 160%, Italia un 105% y España un 95% (Dupuy et al., 2020). Más recientemente, en el año 2022, Europa volvió a experimentar una temporada particularmente extrema (Rodrigues et al., 2023). Existen además proyecciones a futuro que sugieren cambios importantes en los regímenes de incendio (conjunto de

características de los incendios en un periodo y región determinados: tamaño, frecuencia, intensidad, estacionalidad, entre otros), exacerbando la situación actual (Galizia et al., 2023).

La necesidad de abordar la prevención y mitigación del riesgo de incendios es urgente. Las repercusiones de un incendio forestal van más allá de la pérdida de recursos naturales, ya que impactan la biodiversidad, la calidad del aire, la salud humana, la economía y la resiliencia de las comunidades locales. En este contexto, la gestión forestal se promulga como una de las herramientas para avanzar en la reducción del riesgo, orientada al control del combustible en su disponibilidad y estructura. Quemas prescritas o prescripciones y tratamientos silvícolas (aclareos, cortas de regeneración) son algunas de las principales opciones, cuyo diseño y aplicación dependen de los objetivos a alcanzar (en términos de gestión y aprovechamiento de los sistemas forestales), del tipo de comunidad y de la dinámica futura de las condiciones climáticas.

Hasta la fecha, la mayor parte de los estudios de la dinámica del riesgo de incendio en la región mediterránea se han centrado en la predicción de las condiciones de peligro utilizando indicadores meteorológicos (Rodrigues et al., 2020) sin considerar ni las dinámicas de las comunidades forestales ni los cambios en la disponibilidad de combustible y su estructura. Por ejemplo, el contenido de humedad en el combustible, definido como la cantidad de agua por unidad de peso seco de combustible, tiene un papel crucial en la ignición del fuego y su comportamiento, siendo uno de los elementos a los que se ha prestado una especial atención (Resco de Dios et al., 2015), además de los mencionados indicadores de peligro meteorológico, pero la interacción de estos elementos en un contexto climático, sumado a diversas alternativas de gestión forestal puede conducir a situaciones distintas (Miezić et al., 2022).

1.2. Estado de la cuestión y justificación del trabajo

El diseño de estrategias para la mitigación del riesgo de incendio requiere el uso de herramientas para monitorizar cuando y donde es más probable que ocurran los incendios, o donde y cuando tendrán unos efectos más negativos. Es en este contexto en el que las tecnologías de la información geográfica han jugado (y juegan) un papel más relevante (Chuvienco et al., 2014), mediante la utilización de las nuevas tecnologías y las herramientas disponibles para evaluar el riesgo en sí mismo, pero también para concienciar a la sociedad sobre los posibles impactos (Chuvienco et al., 2023). Para abordar este segundo aspecto, la concienciación, se ha recurrido a diversas estrategias como la creación base de datos con los valores históricos de las variables de riesgo o la visualización de la misma mediante visores cartográficos, para su mejor divulgación y facilidad a la hora de hacer un análisis.

Existen iniciativas que se dirigen específicamente a informar sobre la situación de riesgo/peligro en el corto plazo, generalmente a través de aplicaciones que posibilitan el seguimiento a corto plazo o histórico del peligro de incendio o la incidencia del fuego mediante informes y estadísticas. No obstante, para guiar de manera adecuada una estrategia de mitigación y/o adaptación se requiere una perspectiva a mayor plazo. En el caso de Europa, el ejemplo más representativo es el *European Forest Fire Information System* (EFFIS; <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>; Figura 1). Esta plataforma proporciona información diversa relativa a la ocurrencia del fuego, incluyendo información en tiempo real sobre incendios activos (reportando información procedente de sensores MODIS y VIIRS) o predicciones a corto plazo de índices de peligro como el *Canadian Fire Weather Index* (FWI; Van Wagner, 1987).

Otras experiencias destacables, en este caso en España, es el visor puesto en marcha (aunque no operativo actualmente) en el marco del proyecto FIREGLOBE (Figura 2). De manera similar al visor EFFIS, este segundo visor proporciona información sobre la situación en el corto plazo (diaria), si bien en este caso el resultado no se circunscribe únicamente al peligro o incidencia del fuego, ya que se proporciona información sobre los posibles efectos del fuego a través de una estimación de la vulnerabilidad de los elementos potencialmente expuestos.

Sin embargo, pese a que este tipo de aproximaciones son eficaces para trasladar el peligro inmediato, para implementar estrategias de gestión a largo plazo es necesario incorporar la dinámica temporal en periodos más largos, por ejemplo, incluyendo los efectos del cambio climático. Esto debe hacerse, no solo en indicadores relacionados con el peligro (por ejemplo, el efecto en la humedad de los combustibles) sino que hay que tener en cuenta la posible influencia de un clima cambiante en la evolución de

las comunidades forestales, para evaluar el papel de las alternativas de gestión. Este es el objetivo último del proyecto FIREPATHS y, por tanto, el marco de trabajo del presente TFM.

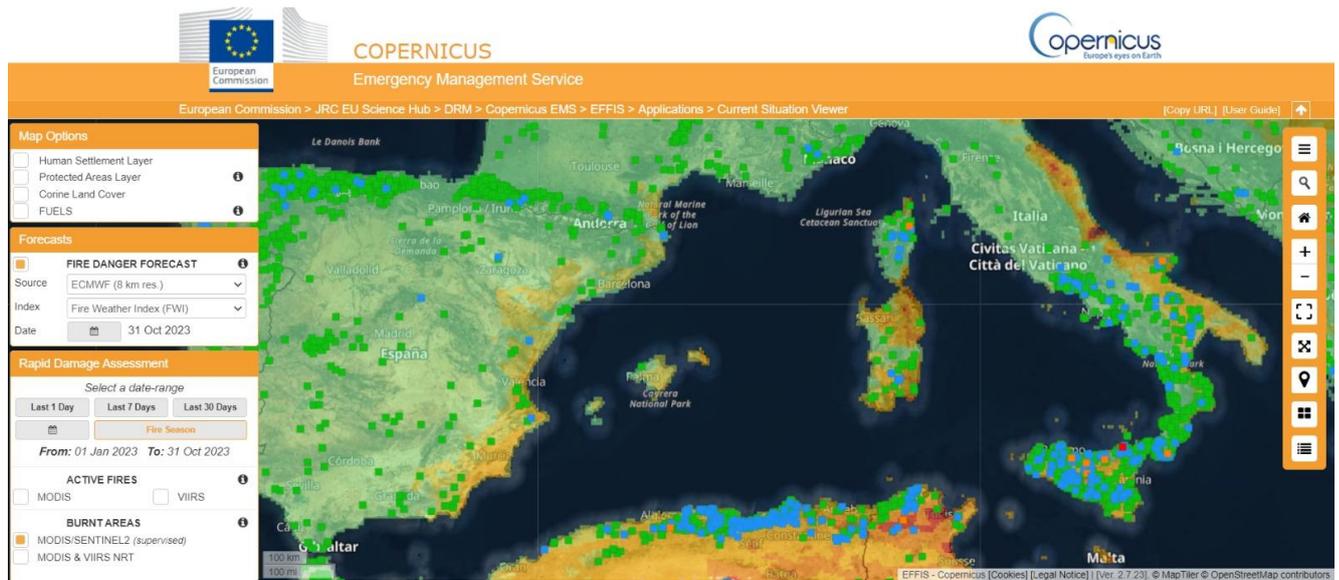


Figura 1. Ejemplo Visor EFFIS del servicio de gestión de emergencias del programa Copernicus. Fuente: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>.

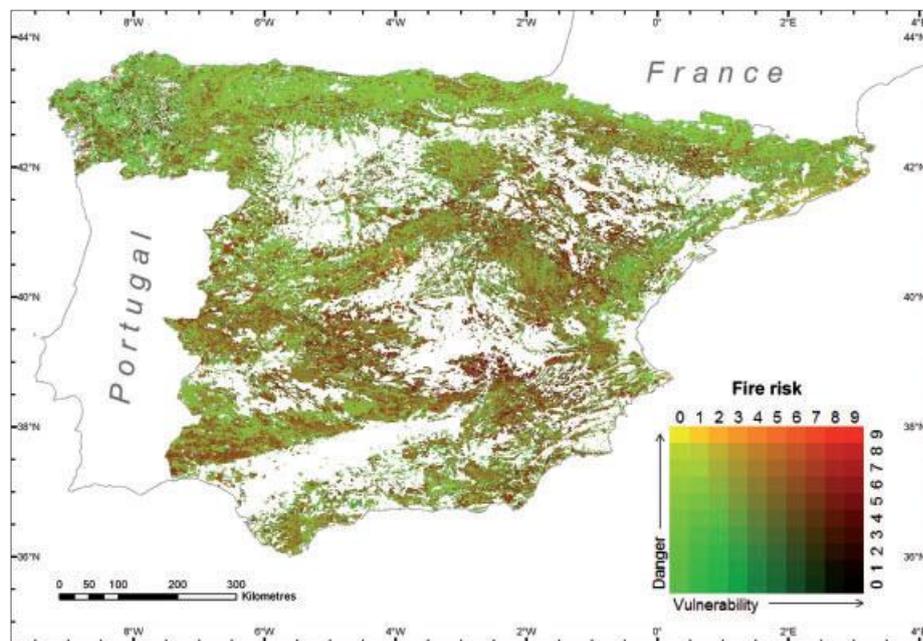


Figura 2. Ejemplo de representación visual del riesgo de incendio en el proyecto FIREGLOBE. Fuente: Chuvieco et al. (2014).

1.3. Desarrollo del trabajo

El contexto en el que se enmarca este trabajo tiene una gran importancia en el desarrollo del mismo y la toma de decisiones. La característica que más ha condicionado la elaboración del mismo ha sido, la realización de un contrato de prácticas en Geoinnova S.L. en el marco del proyecto de investigación, donde se establecieron ciertas guías a seguir para la ejecución de diversos procesos como, por ejemplo, el *software* utilizado. En ocasiones, se trataba de software en el que no contaba con experiencia

previa, así como el empleo de scripts en lenguajes de programación recientemente presentados en el marco del máster. Las prácticas se desarrollaron en un total de 256 horas (Figura3). A las que hay que sumar las necesarias para asimilar los conceptos necesarios para la elaboración de los scripts, entre los que fueron necesarios el aprendizaje a partir de cursos sobre lenguajes de programación (tanto SQL como Python y R) proporcionados por Geoinnova S.L., el manejo de los nuevos softwares, bibliografía y redacción de la memoria. El hecho de que el inicio de la parte académica se hiciera en el trascurso final del proyecto en vez, de una forma más homogénea a lo largo del tiempo fue incitado por los tiempos de publicación de los datos del proyecto del cual se nutre el presente TFM. Además, hay que comentar que en periodo después de finalizar las prácticas, se ha mantenido el contacto con el grupo que se encarga actualmente del proyecto para diferentes dudas sobre la estructura de los datos o para la elaboración del visor, esta colaboración con Geoinnova S.L. se mantendrá hasta que sea necesaria o se acabe el proyecto.

| Tareas | Prácticas en empresa | | | Elaboración de la memoria | | |
|-----------------------|----------------------|-------|--------|---------------------------|---------|-----------|
| | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre |
| Revisión bibliografía | 9 | | | 15 | 10 | 2 |
| Formación específica | 45 | 20 | 15 | | | |
| Desarrollo BBDD | 20 | 30 | 58 | 6 | 6 | |
| Creación de servicios | | | 25 | 3 | 3 | |
| Metadatado | | | 15 | | | 3 |
| Apoyo visor | | 6 | 13 | | | |
| Análisis | | | 88 | 94 | 40 | 7 |
| Redacción | | | | 87 | 100 | 20 |

Figura 3. Cronograma del proyecto de TFM. El sombreado en color verde indica cualitativamente el número de horas invertido en cada tarea.

2. OBJETIVOS

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se enmarca dentro del proyecto FIREPATHS “Trayectorias de peligro de incendio bajo escenarios de cambio climático y de gestión” (PID2020-116556RA-I00). El proyecto tiene como objetivo central avanzar en la comprensión de los efectos del cambio climático en la dinámica de la vegetación en el sistema clima-vegetación-fuego. Para ello utiliza un marco metodológico interdisciplinar en el que se integrarán datos de inventario forestal, escenarios climáticos y de gestión, modelos de dinámica forestal, de comportamiento del fuego y de ocupación del territorio para evaluar el impacto del cambio climático en el peligro de incendios forestales y la efectividad de las estrategias de gestión. El objetivo último es explorar las trayectorias más probables en la evolución del peligro de incendio (entendido como una medida de la amenaza relativa en función de la probabilidad de ocurrencia de incendios y el estado de los combustibles) teniendo en cuenta la interacción entre el clima, vegetación y fuego para mejorar la toma de decisiones en la gestión forestal y la mitigación del riesgo de incendio. Dentro de este marco, este TFM aborda los siguientes objetivos:

O1 - Desarrollar e implementar un modelo de datos para sostener una plataforma que permita la visualización e interpretación de los resultados del proyecto.

O2 - Caracterizar las trayectorias de comportamiento potencial del fuego en escenarios de cambio climático y gestión forestal en el periodo 2017-2100.

Se persiguen, por tanto, dos objetivos, uno de corte temático (O2), derivado del postproceso de datos generados en el proyecto FIREPATHS; y otro de carácter tecnológico (O1), encaminado a la diseminación de resultados de la investigación en general y de las trayectorias caracterizadas en el O2 en

particular. Todo ello requiere de una serie de objetivos específicos que marcan las etapas de desarrollo del TFM.:

- Creación de una base de datos espacial y un modelo de datos para organizar la información.
- Diseño de una serie de estrategias de visualización y agregación de los resultados mediante técnicas estadísticas y de visualización.
- Interpretación de las trayectorias de evolución del comportamiento del fuego en los escenarios disponibles.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende una selección de grandes incendios¹ ocurridos en el verano del 1994 (Figura 4) en cuatro comunidades autónomas situadas en el extremo oriental de la Península Ibérica: Aragón, Cataluña, Valencia y Castilla la Mancha (provincia de Albacete). Estos incendios son: Montmajor (Barcelona, 43.774,4 ha.), Moratalla (Albacete, 28.352,8 ha.), Requena (Alicante, 38.750,1 ha.), Uncastillo (Zaragoza, 10.120,4 ha.), Villarluengo (Teruel, 29.118,8 ha.) y Yeste (Albacete, 12.669,3 ha.).

La selección de estos incendios responde a su situación geográfica, que los diferencia en términos ambientales, ya sea por su situación topográfica, climatología o comunidad forestal. Para todos estos incendios se dispone de datos recogidos en campañas de campo realizadas durante los años 2017 y 2018 procedentes del proyecto SERGISAT (CGL2014-57013-C2-2-R). Se establecieron y documentaron 202 parcelas. Por lo que hace a la situación topográfica, se encuentran en distintas combinaciones en cuanto a pendiente y orientación. En concreto se muestrearon zonas de solana y umbría en pendientes superiores/inferiores al 15%. Por lo que refiere a la climatología se observa un gradiente climático desde la costa mediterránea hasta zonas de montaña media. Los seis incendios seleccionados se sitúan en una variedad de condiciones climáticas que se identifican a los códigos Bsk (Montmajor) Csa (Yeste, Requena y Moratalla) y Cfb (Villarluengo y Uncastillo) de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018). Cabe destacar que, se muestrearon parcelas pertenecientes a comunidades de *Pinus halepensis* y *Pinus nigra*, con algunos casos de *Quercus ilex*.

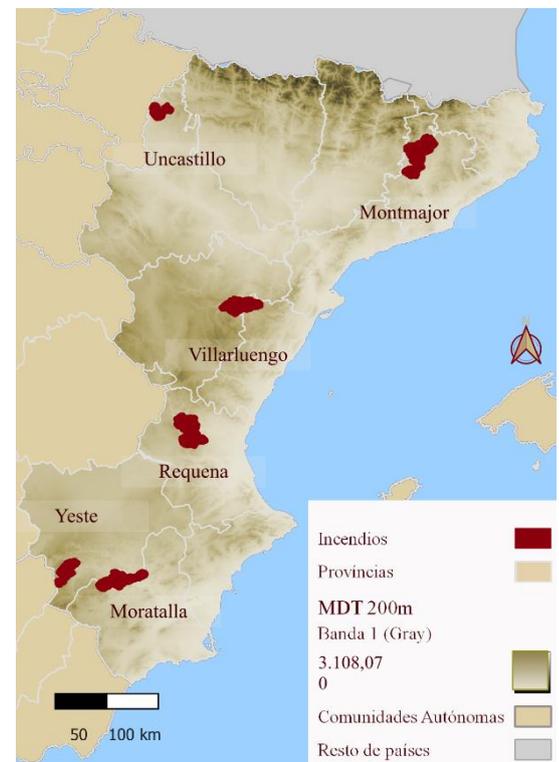


Figura 4. Mapa de situación. Fuente: elaboración propia.

4. METODOLOGÍA

Este trabajo se enmarca en la creación de una aplicación web *mapping* para visualizar e interpretar los resultados del proyecto FIREPATHS. Se han tomado como punto de partida una serie de informaciones generadas en el proyecto que tienen que ver con el comportamiento del fuego (forma de propagación del fuego) y el peligro meteorológico de incendio (FWI). Posteriormente, se ha organizado esa información y se ha trabajado de manera que se puede integrar en una base de datos, que, a su vez, alimente un servicio de geodatos y una aplicación web *mapping* con consultas y la visualización de algunas trayectorias mediante índices de tendencia.

¹ Se consideran grandes incendios aquellos que superen las 500 hectáreas de superficie quemada.

4.1. Datos y variables de entrada

En este apartado se presenta la información y detalles necesarios para comprender la naturaleza y sentido de la información que se va a incorporar en el visor de datos. Se trata fundamentalmente de información a dos escalas de agregación, incendio y parcela. A escala de incendio (ver descripción del área de estudio) se ha generado la información climática y la referente al peligro meteorológico de incendio. A escala de parcelas se ha llevado a cabo la caracterización del comportamiento del fuego combinando los escenarios climáticos a escala de incendio con las estrategias de gestión forestal y la dinámica de la vegetación.

4.1.1. Parcelas de campo

La información relativa a las parcelas muestreadas en campo (Tabla 1) contiene datos sobre, su código identificativo, el incendio al que pertenecen, su geolocalización exacta, la comunidad forestal dominante, la pendiente dominantes divididas en alta y baja pendiente (por debajo o por encima del 15%), las orientaciones norte y sur (entre 90° y 270° grados azimutales) y por último la severidad (evaluada mediante el índice GeoCBI, (De Santis & Chuvieco, 2009) de la misma que va en una escala de 0-3 siendo el 0 no quemado y el 3 de severidad alta.

Tabla 1. Resumen de parcelas muestreadas para la evaluación del comportamiento del fuego.

| Severidad (CBI) | Orientación | Pendiente | Número de parcelas | Número de parcelas |
|------------------------------|-------------|-----------|--------------------|--------------------|
| No quemado | Umbría | <15% | 21 | 72 |
| | | >15% | 16 | |
| | Solana | <15% | 19 | |
| | | >15% | 16 | |
| Low (CBI 0.5 to 2.00) | Umbría | <15% | 5 | 19 |
| | | >15% | 4 | |
| | Solana | <15% | 4 | |
| | | >15% | 6 | |
| Medium (CBI >2.0 to 2.75) | Umbría | <15% | 3 | 20 |
| | | >15% | 5 | |
| | Solana | <15% | 5 | |
| | | >15% | 7 | |
| High (CBI >2.75) | Umbría | <15% | 24 | 92 |
| | | >15% | 23 | |
| | Solana | <15% | 23 | |
| | | >15% | 22 | |
| | | | 203 | |

4.1.2. Variables climáticas

Se han recopilado diversas variables climáticas con una resolución temporal diaria, necesaria para la simulación de la dinámica de la vegetación y la obtención de indicadores de peligro meteorológico (FWI) y relacionados con el contenido de humedad del combustible vivo (DC) y muerto (déficit de presión de vapor o VPD por sus siglas en inglés). El periodo de toma de datos utilizando una serie que se inicia en 2017 y finaliza en 2100. Las proyecciones climáticas se han realizado a partir del modelo climático Access-CM2 (<https://research.csiro.au/access/about/cm2/>) obtenido del *Copernicus Climate Service* (C3S), implementando la corrección del sesgo frente a la serie histórica obtenida para cada incendio de la red de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología y de la red de estaciones del "Servei Meteorològic de Catalunya", obtenidos mediante las API de AEMET y MeteoCat

usando el paquete de R *meteospain* versión 0.1.3 (Granda, 2023). Se han obtenido datos de temperatura mínima y máxima, WS, precipitación (suma), radiación, humedad relativa mínima y máxima (100), ya que no es posible calcularla a posteriori.

4.1.3. Variables de peligro meteorológico

Las variables de peligro meteorológico trabajadas en este estudio provienen del cálculo de del *Canadian Fire Weather Index* (FWI; Van Wagner, 1987). Se han obtenido del proyecto FIREPATHS los valores diarios de todos los componentes del FWI, siendo posteriormente agregados a escala anual mediante diversos agregados (media, mediana, percentiles 5 y 95, mínimo y máximo). Su cálculo se realizó mediante el paquete de R *cffdrs* versión 1.8.5 (Wotton, 2009). A continuación, se detallan los índices y componentes del FWI Figura 5:

- El FFMC (*Fine Fuel Moisture Code*): es un índice que representa el contenido de humedad presentes en los combustibles finos, como hojas, hierba seca y ramas pequeñas, en un área forestal. Este es calculado a partir de datos meteorológicos, como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. Un FFMC bajo indica que los combustibles finos están secos y son propensos a encenderse rápidamente.
- El DMC (*Duff Moisture Code*): es un índice que evalúa la humedad en la capa de mantillo, que consiste en hojas y material orgánico en descomposición situado en el suelo forestal. La humedad del mantillo es importante, ya que afecta la velocidad a la que un incendio puede propagarse a través del suelo. Un DMC alto indica que el mantillo está seco y aumenta el riesgo de propagación del fuego.
- El ISI (*Initial Spread Index*): como su propio nombre indica, es un índice que mide la velocidad potencial de propagación de un incendio forestal en sus etapas iniciales. Para calcularse tiene en cuenta el FFMC y el viento. Un ISI alto indica que un incendio puede propagarse rápidamente en las condiciones calculadas.
- El BUI (*Buildup Index*) es un índice que combina el DMC y el DC para evaluar la acumulación de sequedad en el suelo y la vegetación. Proporciona una estimación del riesgo general de incendios forestales a largo plazo, ya que refleja la sequedad acumulada en el suelo y la vegetación a lo largo del tiempo.
- El FWI (*Fire Weather Index*) es un índice compuesto que se deriva de la combinación de varios de los índices anteriores, incluyendo el FFMC, el DMC y el DC, junto con otros factores como la velocidad del viento. Proporciona una medida completa del riesgo de incendios forestales en un área específica en función de las condiciones meteorológicas y la humedad de los combustibles.
- El DSR (*Daily Severity Rating*) es un índice que representa el grado de severidad de las condiciones de incendio en un día específico. Se calcula a partir de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y el FWI. Un DSR alto indica condiciones de incendio más severas y, por lo tanto, un mayor riesgo de incendios forestales.

De todas estas, se seleccionaron dos, el FFMC y DC, ya que, son las que se relacionan más estrechamente con la humedad del combustible (Wotton, 2009) y el potencial de propagación (Parisien et al., 2019).

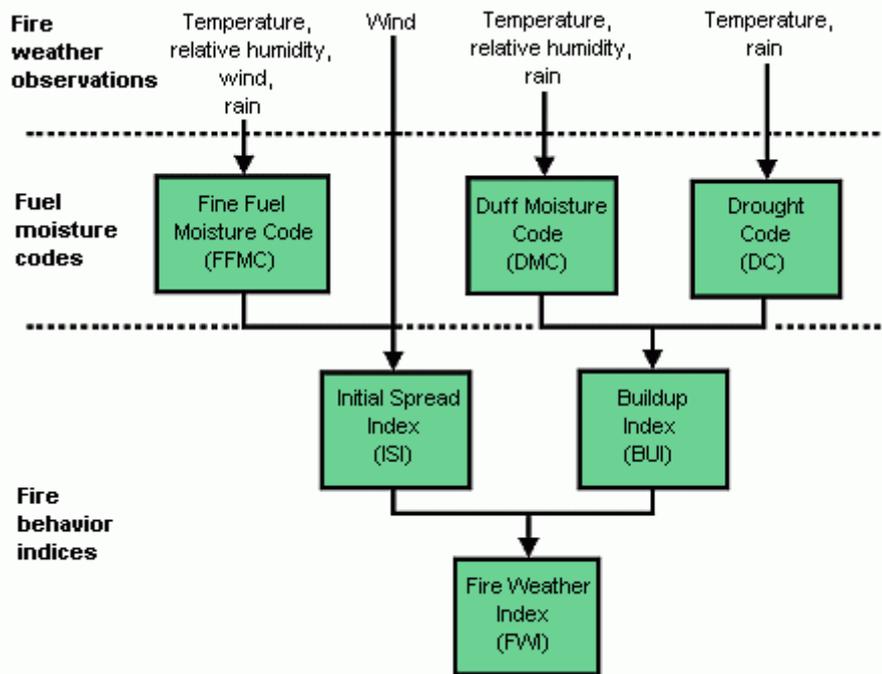


Figura 5. Esquema del FWI. Fuente: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>

4.1.4. Variables de comportamiento del fuego

La valoración del comportamiento del fuego es la parte más compleja abordada en el proyecto FIREPATHS dado que esta involucra la simulación de la dinámica de la vegetación a escala de parcela para evaluar el estado a futuro de la estructura y disponibilidad de los combustibles, y la estimación del comportamiento del fuego propiamente dicho teniendo en cuenta la vegetación y los combustibles. En ambos casos, dinámica de la vegetación y comportamiento del fuego, el factor climático modula la evolución, acompañados además de los posibles itinerarios silvícolas. Esta tarea se está abordando² actualmente en el contexto del proyecto, utilizando para ello el modelo *medfate* versión 2.9.3 (De Cáceres et al., 2023), que proporciona las funcionalidades necesarias para simular tanto la dinámica de vegetación como el comportamiento del fuego.

La información relativa al comportamiento del fuego es el resultado principal a evaluar en este TFM. Se han elegido tres variables procedentes del *Fuel Characteristic Classification System* versión 3.0 (FCCS; (Prichard et al., 2013)). El FCCS proporciona una gran variedad de valores relacionados con el comportamiento del fuego (ej., velocidad de propagación, longitud de llama, intensidad, energía emitida, probabilidad de fuego de copa, etc) de los que se han seleccionado 3 para su posterior análisis. Éstas son el ROS (velocidad de propagación del fuego en superficie, m/min), el IC (índice de potencial de fuego de copa, 0-9) y el CROWN (velocidad de propagación del fuego en copa, m/min). Que para facilitar su comprensión en los resultados serán definidos a continuación.

- El ROS (*Surface rate of spread*): es un término utilizado en el contexto de incendios forestales y se refiere a la velocidad (m/min) a la que se propaga un incendio. Representa la velocidad en la que el frente de un incendio avanza en un área determinada, normalmente se mide en unidades de longitud

² En el momento en que se está redactando el presente Trabajo Fin de Máster se dispone tan solo de la muestra definitiva de dinámica de vegetación y comportamiento del fuego para los 4 escenarios climáticos en ausencia de gestión forestal.

por unidad de tiempo (por ejemplo, metros por segundo o kilómetros por hora). Un ROS alto indica que el incendio se está propagando rápidamente.

- El IC (*Crown initiation potential*): se trata de un índice adimensional expresado en una escala de 0 a 9, representando una probabilidad incremental de que el fuego llegue a la copa.
- El CROWN (*Crown fire rate of spread*): un incendio de la corona se produce cuando las llamas alcanzan las ramas y las hojas superiores de los árboles, lo que puede hacer que el incendio sea especialmente peligroso y difícil de controlar, ya que se propaga rápidamente a través de la vegetación en altura.

4.2. Descripción de escenarios

4.2.1. Escenarios climáticos

El proyecto tiene un total de 4 escenarios climáticos: SSP 126, SSP 245, SSP 370, SSP 585. Estos escenarios vienen dados de los *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), los cuales son escenarios de proyecciones de cambio climático que alcanzan hasta el 2100. Son utilizados para elaborar políticas climáticas a través de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Riahi et al., 2017; Rogelj et al., 2018). Los escenarios escogidos en este trabajo son variables de esas proyecciones principales. Es decir, el SSP 126 se extrae del SSP 1 o el SSP 585 del SSP 5. Estas son las características de cada escenario:

- SSP 1: Sostenibilidad (Tomar el camino verde). Escenario que se encuentra impulsado por un compromiso mayor, con el logro de los objetivos de desarrollo, la desigualdad se reduce tanto entre los países como dentro de ellos. El consumo se reduce, existiendo un menor crecimiento de productos y un menor consumo de recursos y energía (van Vuuren et al., 2017).
- SSP 2: En medio del camino. En este escenario, los sistemas medioambientales se degradan, aunque se producen algunas mejoras y, en general, disminuye la intensidad del uso de recursos y energía. El crecimiento de la población mundial es moderado y se estabiliza en la segunda mitad del siglo. La desigualdad de ingresos persiste, así como los retos para reducir la vulnerabilidad a los cambios medioambientales (Fricko et al., 2017).
- SSP 3: Rivalidad regional (A Rocky Road). Se ralentiza el desarrollo económico, el consumo de materiales es intensivo y las desigualdades empeoran con el tiempo. El crecimiento demográfico es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo. Existe una fuerte degradación del medio ambiente en algunas regiones (Fujimori et al., 2017).
- SSP 5: Desarrollo basado en combustibles fósiles (Tomar la autopista). En este escenario, los mercados mundiales están cada vez más integrados. Al mismo tiempo, el impulso del desarrollo económico y social va unido a la explotación de abundantes recursos de combustibles fósiles y a la adopción de estilos de vida intensivos en recursos y energía en todo el mundo. Todos estos factores conducen a un rápido crecimiento de la economía mundial, mientras que la población mundial disminuye en el siglo XXI. Los problemas medioambientales locales, como la contaminación atmosférica, se gestionan con éxito. Se confía en la capacidad de gestionar eficazmente los sistemas sociales y ecológicos (Riahi et al., 2017).

4.2.2. Escenarios de gestión forestal

En el trabajo se trabajan seis posibles de gestión de las áreas de estudio. Siguiendo la propuesta de (Morán-Ordóñez et al., 2020) los escenarios de gestión se han diseñado tomando como referencia cinco narrativas plausibles a nivel europeo con posibles implicaciones para el futuro del sector forestal en el área de estudio. Estas narrativas se han traducido en escenarios realistas de gestión (a nivel de parcela

forestal) que se aplicarán en las simulaciones de dinámica de la vegetación. Los escenarios propuestos consisten en:

- Promoción de la energía a partir de biomasa. En este escenario se prevé un futuro en el que la producción forestal contribuya a los objetivos de la UE de aumentar la producción de energía renovable, para lograr la sustitución gradual de los recursos no renovables mediante la extracción de biomasa. Los objetivos de este escenario están motivados por los compromisos de la UE en el marco del acuerdo de París, cuya intención es mantener el aumento de la temperatura mundial dentro de los 2 °C por encima de los niveles preindustriales (Artículo 2; Naciones Unidas, 2015).
- Promoción del almacenamiento de carbono (Carbono). En este escenario, el principal objetivo de la silvicultura a nivel de la UE es la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono en los bosques. Por ello, se considera que se promueve la producción de productos madereros de largo ciclo de vida (por ejemplo, madera aserrada o paneles en casas y muebles), también se llevan a cabo iniciativas de captura de carbono a través de los fondos de la UE. Los planes de gestión detallan turnos más largos de lo habitual.
- Reducción de la vulnerabilidad de los bosques (Adaptación). En este escenario, el principal objetivo de la silvicultura a nivel de la UE es reducir la vulnerabilidad de los bosques frente a los impactos previstos del cambio climático. En el caso de los bosques mediterráneos, los principales impactos a los que hay que hacer frente son el aumento de la frecuencia e intensidad de los períodos de sequía y las olas de calor. El plan de gestión propone claras tempranas e intensas, que dan lugar a una mejora del vigor de los árboles, una mayor resistencia a los fenómenos de sequía y un mayor contenido de agua en el suelo y provisión de agua azul (Hogeboom et al., 2018; Ameztegui et al., 2017)
- Mitigación del riesgo de incendio (Incendio). Se aplican itinerarios silvícolas preventivos, con tratamientos encaminados a la modificación del modelo de combustible mediante combinaciones de claras, podas y desbroces con técnicas mecánicas, o quemas prescritas, dirigidas a reducir la continuidad horizontal (aproximadamente en un 50%) y vertical del combustible.
- *Business-as-usual* (BAU). En este escenario, y en contraste con los anteriores, no existe una política forestal fuerte de la UE que guíe la gestión de los bosques de los Estados miembros en una dirección determinada. Las políticas actuales se aplican en las próximas décadas.
- No gestión. En este escenario, como su propio nombre indica, no existe una gestión de los bosques a ningún nivel. Esto sirve para ver los efectos de las políticas actuales silvícolas en las comunidades forestales de estudio.

Estos escenarios se han parametrizado de acuerdo a las necesidades del paquete *medfate* (Wang et al., 2017), usado para la simulación de la dinámica de la vegetación y el comportamiento del fuego (Tabla 2). Se han diseñado de manera independiente para las comunidades de *Pinus nigra* y *Pinus halepensis*. Se basan en umbrales del Hart-Beking index o coeficiente de espaciamiento (Assmann, 1970). Los valores adecuados desde el punto de vista de la ordenación forestal se situán entre 17 y 25, siendo usados para guiar los escenarios de gestión de peor (HB = 17) a mejor (HB = 25) estructura. Los valores referentes a las actuaciones silvícolas se basan en la ORGEST (*Orientacions de Gestió Forestal Sostenible de Catalunya*; https://cpf.gencat.cat/ca/cpf_03_linies_actuacio/cpf_transferencia_coneixement/cpf_orientacions_gestio_forestal_sostenible_catalunya/):

- *Business-as-usual* (BAU). Escenario de gestión que incluye los tratamientos “habituales”. En comunidades de *Pinus nigra* se llevarían a cabo aclareos por lo alto, sin cortas de regeneración (gestión irregular según se define en *medfate*). En comunidades de *Pinus halepensis* se llevarían a cabo quemas o labores para reducir la cobertura de matorral y cortas de regeneración (gestión regular).
- *Stock* de carbono (*carbon*). Este escenario se dirige a la promoción de productos madereros de alta calidad. Esto requiere plazos más largos de intervención (mínimo 20) en los que se permite que los árboles alcancen mayores DBH (60-50 en *nigra* y *halepensis* respectivamente). Se realizan aclareos

por lo bajo cada al menos 20 años. La reducción del matorral se establece en relación con los posibles daños durante las intervenciones, no debido a una gestión específica para su reducción.

- Adaptación a la sequía. Se persigue reducir el impacto de la sequía en las masas forestales. En este escenario el objetivo es mantener un índice de Hart-Becking “ideal” (HB=25) mediante aclareos por lo bajo y cortas de regeneración.
- Mitigación del peligro de incendio. Se persigue reducir el comportamiento del fuego. De nuevo, el objetivo es mantener un índice de Hart-Becking “ideal” (HB=25) mediante aclareos por lo bajo y cortas de regeneración, incluyendo además actuaciones sobre el matorral más allá de los daños producidos por las propias intervenciones. Los aclareos en este caso son “sistemáticos”, lo que quiere decir que el 50% se lleva a cabo con la misma proporción en todas las clases diamétricas y el 50% restante por lo bajo. La idea es reducir la continuidad (vertical y horizontal) del dosel.

Tabla 2. Resumen de tratamientos en los escenarios de gestión según los parámetros requerido por el paquete *medfate*. PN, *Pinus nigra*; PH, *Pinus halepensis*; HB index, Hart-Becking index o coeficiente de espaciamiento; DBH mínimo, diámetro a la altura del pecho requerido para iniciar cortas de regeneración.³

| | | BAU | | Carbono | | Adaptación | | Incendios | |
|-------------------------|---------------------|------|--------|-----------|--------|------------|--------|-----------|--------|
| Actuación | Parámetros | PN | PH | PN | PH | PN | PH | PN | PH |
| Aclareos | Tipo de aclareo | alto | bajo | bajo | bajo | bajo | bajo | alto | alto |
| | Umbral (HB index) | 17 | 17 | 22 | 22 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | Años entre aclareos | 15 | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Porcentaje aclareo | 25 | 10 | 30 | 25 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Acciones sobre matorral | Cobertura máxima | 75 | 50 | 65 | 65 | 65 | 65 | 40 | 30 |
| Cortas de regeneración | DBH mínimo | - | 35 | 60 | 50 | 40 | 35 | 50 | 45 |
| | Años entre cortas | - | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | Intensidad de corta | - | 60/100 | 40/60/100 | 60/100 | 40/60/100 | 60/100 | 40/60/100 | 60/100 |

4.3. Cálculo de tendencias temporales

La tendencia es un concepto en estadística y análisis de datos que se refiere a la dirección y la magnitud de los cambios sistemáticos o patrones observados en una serie temporal de datos. Estudiar y comprender la tendencia es crucial para la detección de cambios significativos, la predicción, la planificación y la identificación de factores causales. En el caso que nos ocupa, se consideró necesario poder proporcionar algún tipo de indicador sintético de la dinámica temporal del peligro meteorológico (FFMC y DC) y del comportamiento del fuego (ROS, IC y CROWN). En cuanto a la elaboración de diferentes índices de tendencias, se eligió la de sen’s slope a partir del paquete de R *trend* (Pohlert, 2023)(Ecuación 1). Los resultados de este índice, pueden ser representados de manera alfanumérica (mediante coeficientes de tendencia) o de manera gráfica (mediante los paneles que luego pueden ser implementados en el visor). Cabe resaltar, que se realizó la elaboración del estilo de la proyección de los resultados de la tendencia en forma de gráfico a partir de un script en JSON y los datos resultantes del proceso descrito anteriormente. A partir de ese script se realizaron los demás gráficos que, posteriormente, se incorporaron en el visor.

$$d_k = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde mediana d_k es igual a bSen, for $(1 \leq i < j \leq n)$, d es la pendiente, x denota la variable, n es el número de datos e i, j son índices.

³ El escenario de promoción de la biomasa no se ha parametrizado en el momento en que se realiza el presente TFM.

4.4. Diseño e implementación del modelo de datos

La creación de un modelo de datos sólido es esencial para la gestión efectiva de la información. En esta etapa, se ha llevado a cabo el diseño conceptual del modelo de datos, identificando las entidades, relaciones y atributos clave. En el presente TFM se ha desarrollado e implementado un modelo de datos para organizar la información y resultados obtenidos en el proyecto FIREPATHS. Esto conlleva organizar la información (sección 4.1) en forma de tablas relacionales (información disponible o a generarse en el futuro) para cada uno de los escenarios climáticos (sección 4.2.1) y de gestión (sección 4.2.2). Se ha utilizado herramientas de modelado de datos, como DBeaver para representar la estructura y la semántica de los datos.

Existen un total de 10 tablas relacionales (Figura 7). Seis de estas tablas corresponden a dominios, necesarios para implementar la búsqueda y la carga de los procesos que se soliciten en la base de datos desde el visor. Todas estas han sido insertadas como clave foránea en la tabla de “valores_variables” y dos de ellas en “índices_tendencia”. Para más información sobre los diferentes dominios y su significado, se mostrará en la segunda sección de los anexos las diferentes tablas al detalle.

Es importante destacar que esta estructura debe dar soporte al resto de aplicaciones que se utilizarán para la creación del visor cartográfico (por ejemplo, *Geoserver*), así como permitir las consultas necesarias para la representación visual y la generación de formularios e informes.

4.5. Creación de la base de datos

Se realizaron las tareas preliminares (homogeneización de formatos de datos de entrada, configuración de servicios de base de datos y del servidor de geodatos) necesarias para configurar una infraestructura de datos que permita la integración de *PostgreSQL* (<https://www.postgresql.org/>) con *GeoServer* (<https://geoserver.org/>) y la API de visualización *OpenLayers* (<https://openlayers.org/>) y que facilite el acceso y consumo de servicios de visualización. Una vez realizada, se hizo una carga masiva de información y la óptima configuración de la base de datos *PostgreSQL* con extensión espacial *PostGIS* (<https://postgis.net/>). En un principio, se facilitaron datos obtenidos de trabajo de campo y resultados del proyecto. Un total de 25 tablas en archivo de texto delimitado, 24 de los mismos referentes a las variables meteorológicas y 1 (en el cual se agrupaban las 24 combinaciones posibles de incendio y escenario) con las variables de peligro meteorológico de incendio (FWI).

En primer lugar, se añadió la cabecera del campo “date” a todos los archivos, ya que no la llevaban en un principio y eso acarrearía problemas en un futuro. También, se transformó el formato de los datos de un .txt a .csv con el método para la separación de valores siendo el espacio. A continuación, se subieron los archivos a una base de datos alojada de manera local en *pgAdmin4*, usando *QGIS*.

Después de haber subido los 25 archivos, se construyó un script para generar las diferentes variables deseadas, entre las cuales se encontraba hacer la media, mediana y desviación estándar de todas las variables (a posterior, se añadieron el percentil 5, el percentil 95 para todas las variables y la suma en el caso de la precipitación). Para calcular estas se decidió agrupar los datos que originalmente estaban de manera diaria a anual, ya que de esta manera se agilizaría los posteriores procesos y procesados por el visor, además de facilitar el análisis posterior de los resultados obtenidos.

Una vez creado el script para calcular las variables en SQL, se ejecutó para cada una de las combinaciones posibles, dando como resultado 48 scripts con las medidas calculadas. A partir de la experiencia de ese proceso tan manual y tedioso, se optó por automatizar su creación a partir de la creación de un script en Python que nos diera como resultado la consulta en SQL que se ejecuta en *PostgreSQL*. Con esto, se procedió a hacer un *INSERT INTO* de las tablas resultantes de FWI y variables meteorológicas en cada combinación posible. Una vez obtenida esas 24 tablas resultantes del *INSERT INTO*, se hizo un *UNION ALL* con todas ellas para obtener una única tabla con todas las combinaciones con sus variables. Finalmente, se creyó conveniente pivotar la tabla resultante para tenerla en formato

largo, lo que permitirá que las futuras consultas y procesos que soliciten a esta tabla se ejecutarán con una mayor velocidad y con menor peso computacional.

Tras ser agrupadas todas las variables en una tabla, se comprobó que existía se habían creado elementos duplicados de todos los elementos de esta, es decir, existía una duplicidad total dentro de la tabla de “valores_variables”. Antes de realizar ningún cambio, se creó una copia de seguridad de la base de datos (BBDD), para poder volver a este punto en caso de que la modificación de los registros no fuese satisfactoria. Para identificar los elementos duplicados se hizo una consulta en el que se contabilizaran aquellos campos que eran idénticos entre ellos. Posteriormente, al observar que realmente existía esa duplicidad, se le añadió un campo que hacía de serial. Lo que permitió eliminar de forma efectiva los duplicados. Una vez obtenida la tabla, tal y como en un principio se deseaba, se realizó de nuevo la copia de seguridad de la BBDD. Más tarde, se creó una base de datos en el *pgAdmin4* del *Docker* y restauramos la copia de seguridad que se ha realizado del servidor local.

Una vez conseguidos todos los valores que se han solicitado calcular, se hizo una conexión entre la BBDD y el *Geoserver*. Se cargaron de tablas espaciales, creación de vistas parametrizadas y generación de estilos en formato SLD. La información espacial será metadatada acorde a la normativa del Núcleo Español de Metadatos. Estas vistas parametrizadas o *endpoints* se han utilizado para la gestión y muestra de los datos en el visor. El visor está creado a partir de *OpenLayers*, esto está siendo desarrollado por un equipo de Geoinnova S.L. teniendo en cuenta la estructura del modelo de datos existente y las diferentes tareas ya realizadas a lo largo de la confección de este trabajo, como la creación de los gráficos de flujos de tendencia.

4.6. Metadatos

Los metadatos desempeñan un papel fundamental en la gestión de datos. Se procederá a la creación de metadatos que describan la estructura y el contenido de la base de datos, así como la semántica de los datos. Esto incluirá descripciones detalladas de tablas, campos, relaciones y cualquier otra información relevante para los usuarios y administradores de la base de datos.

Existen multitud de pautas para la elaboración de los metadatos, para este proyecto, se han seguido las pautas del Núcleo Español de Metadatos (NEM) Figura 6. El NEM está constituido principalmente por el perfil “ISO 19115:2005- *Core Metadata for Geographic Datasets*”, que define un conjunto básico de 22 elementos, teniendo en cuenta las distintas recomendaciones europeas y estándares tan establecidos como es el *Dublin Core* (Maganto et al., s. f.).

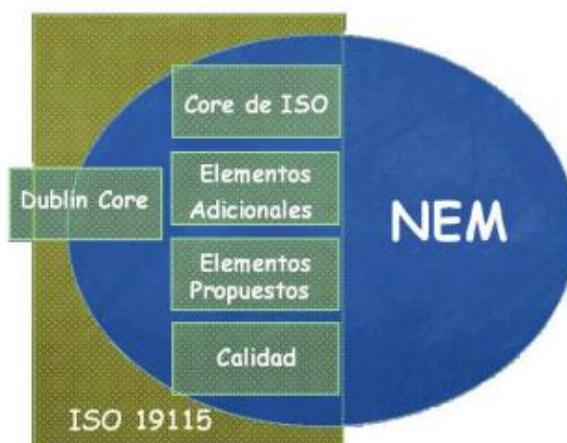


Figura 6. Elementos que contiene el Núcleo Español de Metadatos. Fuente: Maganto et al. (s. f.).

5. RESULTADOS

5.1. Modelo de datos

La Figura 7 muestra el modelo conceptual del modelo de datos diseñado. Éste consta de diez tablas, seis que actúan a modo de dominio y tres que organizan los resultados del proyecto. Los dominios constan de una serie de identificadores (claves primarias) que permiten establecer las relaciones (claves externas) con las tablas de resultados. La tabla “valores_variables” almacena los resultados procedentes de las diversas agregaciones estadísticas (medias, medianas, percentiles y desviación estándar) de las variables meteorológicas originales (temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, precipitación, radiación solar) y de peligro meteorológico obtenidas a nivel de incendio, la tabla “fire_behavior” organiza las métricas de comportamiento del fuego generadas a escala de parcelas.

La finalidad del modelo de datos, además de sostener la implementación del visor, es la de posibilitar la consulta y extracción de datos. La Tabla 3 muestra un ejemplo de extracción relativo a las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación). Antes de comenzar a detallar de forma detallada los resultados, se ha de mencionar que a grandes rasgos podemos separar los incendios en dos grupos ya que, se observa una graduación entre los incendios con mayor influencia Mediterráneos (Moratalla, Requena y Yeste), y los demás (Montmajor, Uncastillo y Villarlengo), que tienen una continentalidad más marcada. La temperatura es la variable que más aumenta en todos los incendios, en cuanto aumenta el escenario, también lo hace la temperatura con este. Independientemente de si nos referimos a temperatura mínima (percentil 5) o la temperatura máxima (percentil 95), esta aumenta progresivamente en los diferentes escenarios (representados por los datos previstos entre 2090 y 2100) si se compara con el escenario histórico (representado por los datos entre 2015 y 2020). Otro comportamiento que destacar es que la cantidad de precipitación disminuye a medida que se agrava el escenario climático, a excepción del escenario SSP 245 en el que se visualiza un aumento de los milímetros de precipitación recibida, superando incluso al dato histórico en gran parte de los incendios a excepción de Moratalla y Yeste. Los valores de precipitación, excepción de Uncastillo, se reducen en más de 100 mm al año. Esto produce que, por ejemplo, en un periodo de tiempo de tan solo setenta años, en el caso más negativo (SSP 585), el terreno de Requena a tan solo 278,7 mm, dejándolo por debajo del histórico de Moratalla 292,41mm de precipitación.

Tabla 3. Ejemplo de extracción de datos de la tabla de variables meteorológicas. Comparación de los datos históricos (2015-2020) y la última década del periodo de estudio (2090-2100). El sombreado gris indica cualitativamente los valores de las variables, mayor intensidad corresponde a mayor valor.

| | | Escenario Climático | | | | |
|--|--------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Incendio | Histórico | SSP 126 | SSP 245 | SSP 370 | SSP 585 |
| Temperatura mínima (percentil 05) en grados Celsius | Montmajor | 2,78 | 3,82 | 4,18 | 6,12 | 6,18 |
| | Moratalla | 8,13 | 8,67 | 9,95 | 11,14 | 11,57 |
| | Requena | 0,25 | 0,33 | 0,84 | 2,17 | 2,48 |
| | Uncastillo | 0,06 | 0,02 | 0,88 | 2,00 | 2,55 |
| | Villarluengo | -0,07 | 0,07 | 0,51 | 1,60 | 1,82 |
| | Yeste | 1,64 | 1,56 | 2,82 | 4,33 | 4,46 |
| Temperatura máxima (percentil 95) en grados Celsius | Montmajor | 32,78 | 35,47 | 36,60 | 38,66 | 40,56 |
| | Moratalla | 33,96 | 35,94 | 36,80 | 38,33 | 40,01 |
| | Requena | 36,66 | 38,80 | 39,93 | 42,19 | 44,26 |
| | Uncastillo | 32,60 | 34,94 | 36,21 | 38,88 | 40,96 |
| | Villarluengo | 34,45 | 36,83 | 38,09 | 40,47 | 42,74 |
| | Yeste | 37,37 | 39,51 | 40,43 | 42,48 | 44,73 |
| Humedad Relativa mínima (percentil 05) en porcentaje | Montmajor | 44,67 | 44,43 | 45,20 | 44,43 | 44,24 |
| | Moratalla | 52,22 | 51,72 | 53,60 | 52,62 | 52,24 |
| | Requena | 35,81 | 35,37 | 36,45 | 36,19 | 35,76 |
| | Uncastillo | 38,25 | 37,99 | 39,09 | 38,32 | 37,75 |
| | Villarluengo | 37,41 | 37,26 | 37,79 | 37,81 | 37,41 |
| | Yeste | 36,91 | 36,89 | 38,01 | 37,88 | 37,86 |
| Velocidad del viento (percentil 95) en m/seg | Montmajor | 3,23 | 3,22 | 3,24 | 3,16 | 3,22 |
| | Moratalla | 5,91 | 5,63 | 5,43 | 5,51 | 5,61 |
| | Requena | 5,00 | 5,00 | 4,68 | 4,80 | 4,98 |
| | Uncastillo | 2,89 | 2,86 | 2,88 | 3,02 | 3,00 |
| | Villarluengo | 3,80 | 3,76 | 3,66 | 3,67 | 3,84 |
| | Yeste | 3,79 | 3,77 | 3,69 | 3,78 | 3,85 |
| Precipitación (suma anual) en mm | Montmajor | 575,43 | 558,54 | 548,13 | 457,62 | 465,71 |
| | Moratalla | 292,41 | 271,28 | 299,81 | 199,88 | 182,16 |
| | Requena | 408,45 | 367,81 | 414,21 | 327,33 | 278,69 |
| | Uncastillo | 648,99 | 667,08 | 672,79 | 570,88 | 561,71 |
| | Villarluengo | 543,79 | 524,61 | 549,20 | 466,83 | 439,30 |
| | Yeste | 340,64 | 306,98 | 333,78 | 245,60 | 227,45 |

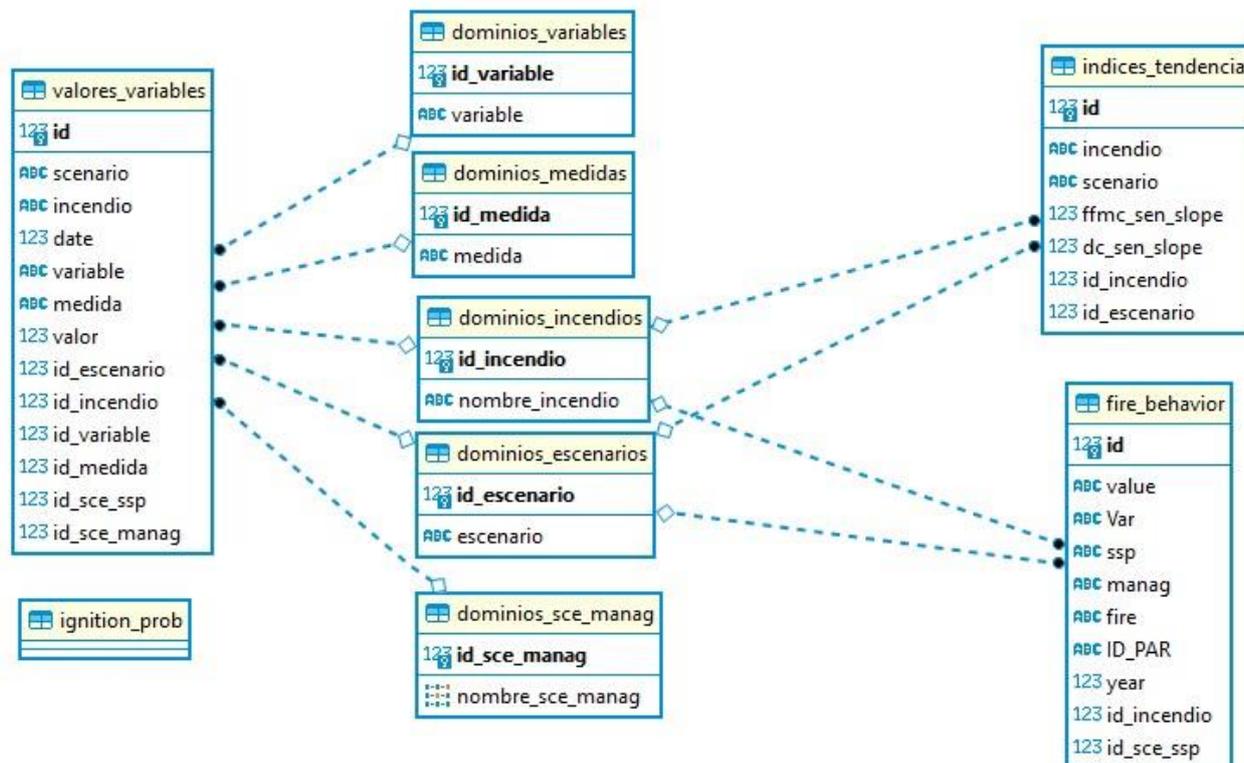


Figura 7. Modelo de datos confeccionado. Las líneas discontinuas muestran las relaciones entre tablas. Punto blanco, clave primaria; punto negro, claves externas. Fuente: elaboración propia con *DBeaver*.

5.2. Tendencias en el peligro y comportamiento del fuego

Existen de manera generalizada tendencias positivas, probablemente resultado del aumento de temperatura que interviene en el cálculo del FFMFC y el DC (ver Tabla 4). La magnitud de las tendencias se incrementa hacia los escenarios con una mayor emisión de gases invernadero como son el SSP 370 y SSP 585 lo que nos llevaría a una situación de alerta progresiva. No obstante, cabe destacar que el escenario SSP 126 es el único en el que no se dan situaciones estables (tendencia no significativa) en FFMFC (incendios de Moratalla y Requena) y sobre todo en DC, donde todos los incendios mostrarían trayectorias estables salvo el de Yeste. En el caso de Uncastillo la estabilidad en términos de DC se extiende también al escenario SSP 245.

A partir de esta sección se añade un nuevo grupo de variables que tienen en cuenta la vegetación, además de las normalmente trabajadas variables climáticas⁴. La Figura 8 muestra la distribución de los coeficientes de pendiente de Sen por incendio y escenario climático en las métricas de comportamiento del fuego a nivel de parcela. Se observa una tendencia generalizada al descenso de la actividad potencial del fuego de copa, tanto su inicio (IC) como su velocidad de propagación (CROWN) en todos los incendios, más acusada cuando mayor es el escenario de calentamiento. También se observan diferencias en el valor de las dos variables que corresponden a la velocidad de propagación (*Crown-Fire.ROS_crown* y *SurfaceFire.ROS*) entre los incendios de Montmajor, Uncastillo y Villarluengo. Sin embargo, un mayor calentamiento nos lleva también a una mayor velocidad de propagación del fuego de superficie (ROS). En cuanto a tendencias significativas, podemos apuntar que en escenarios climáticos como el SSP 126 no existen prácticamente tendencias significativas y las que hay son negativas. Algo parecido ocurre en el SSP 245, aunque con mayor número de tendencia significativa, ya que es un escenario con trayectorias más marcadas. Por otro lado, tanto el escenario SSP 370 como el SSP 585

⁴ Actualmente, solo se han podido calcular los valores referentes al escenario de no gestión. Una vez se obtengan los datos necesarios, se podrán realizar para los demás escenarios de gestión para así tener una idea más completa del efecto de la gestión forestal en la mitigación de posibles incendios.

nos lleva a tendencias más acusadas independientemente de que sean positivas o negativas. En la Tabla 5, se presenta el número de parcelas con tendencia significativa en cada escenario e incendio. Como se puede ver en el escenario SSP 126 las tres variables muestran tendencias principalmente no significativas, a excepción del caso de Moratalla.

No obstante, pese a la existencia de tendencias negativas, los datos brutos representados para el periodo de estudio (Figura 9) nos muestran que este, pese a sugerirse disminuciones como en el caso de Moratalla o Requena, las tasas de propagación siguen siendo muy elevadas, superando los 30 m/min. En el caso de la propagación en superficie, sí que se aprecian aumentos de mayor magnitud, por ejemplo, en el caso del incendio de Yeste, que aumentaría su velocidad en algo más de 1 m/min en el SSP 370 y SSP 585

Tabla 4. Resumen de tendencias en los indicadores de peligro meteorológico mediante la pendiente de Sen. Las celdas con sombreado gris indican tendencias significativas ($p < 0,05$).

| FFMC | Montmajor | Moratalla | Requena | Uncastillo | Villarluengo | Yeste |
|---------|-----------|-----------|---------|------------|--------------|-------|
| SSP 126 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,008 | 0,006 | 0,003 |
| SSP 245 | 0,010 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,008 | 0,005 |
| SSP 370 | 0,017 | 0,011 | 0,014 | 0,020 | 0,018 | 0,011 |
| SSP 585 | 0,022 | 0,014 | 0,020 | 0,025 | 0,023 | 0,015 |
| DC | Montmajor | Moratalla | Requena | Uncastillo | Villarluengo | Yeste |
| SSP 126 | 1,370 | 2,180 | 0,880 | 1,060 | 0,977 | 1,930 |
| SSP 245 | 2,430 | 3,340 | 3,010 | 1,150 | 1,740 | 2,610 |
| SSP 370 | 4,720 | 4,550 | 4,480 | 3,780 | 4,200 | 4,320 |
| SSP 585 | 5,560 | 6,640 | 5,630 | 5,170 | 5,380 | 4,920 |

5.3. Situación preliminar del visor cartográfico

El resultado de los procesos realizados en este trabajo nutre al visor que es la herramienta de análisis y el producto final de este proyecto. En cuanto a la distribución de la misma Figura 10, responde al modelo de datos que se organizó en un principio. Los gráficos responden, como se ha mencionado con anterioridad, a un diseño y confección de elaboración propia. Además, cabe decir que estos gráficos se tratan de imágenes fijas y no se calculan al vuelo con cada consulta, esta fue una decisión que se tomó teniendo en cuenta que la capa original tiene 50 millones de registros y una vez reducida, seguimos teniendo más de 138 mil registros lo que dificultaría el objetivo de respetar el estándar de tiempo de publicación en el visor.

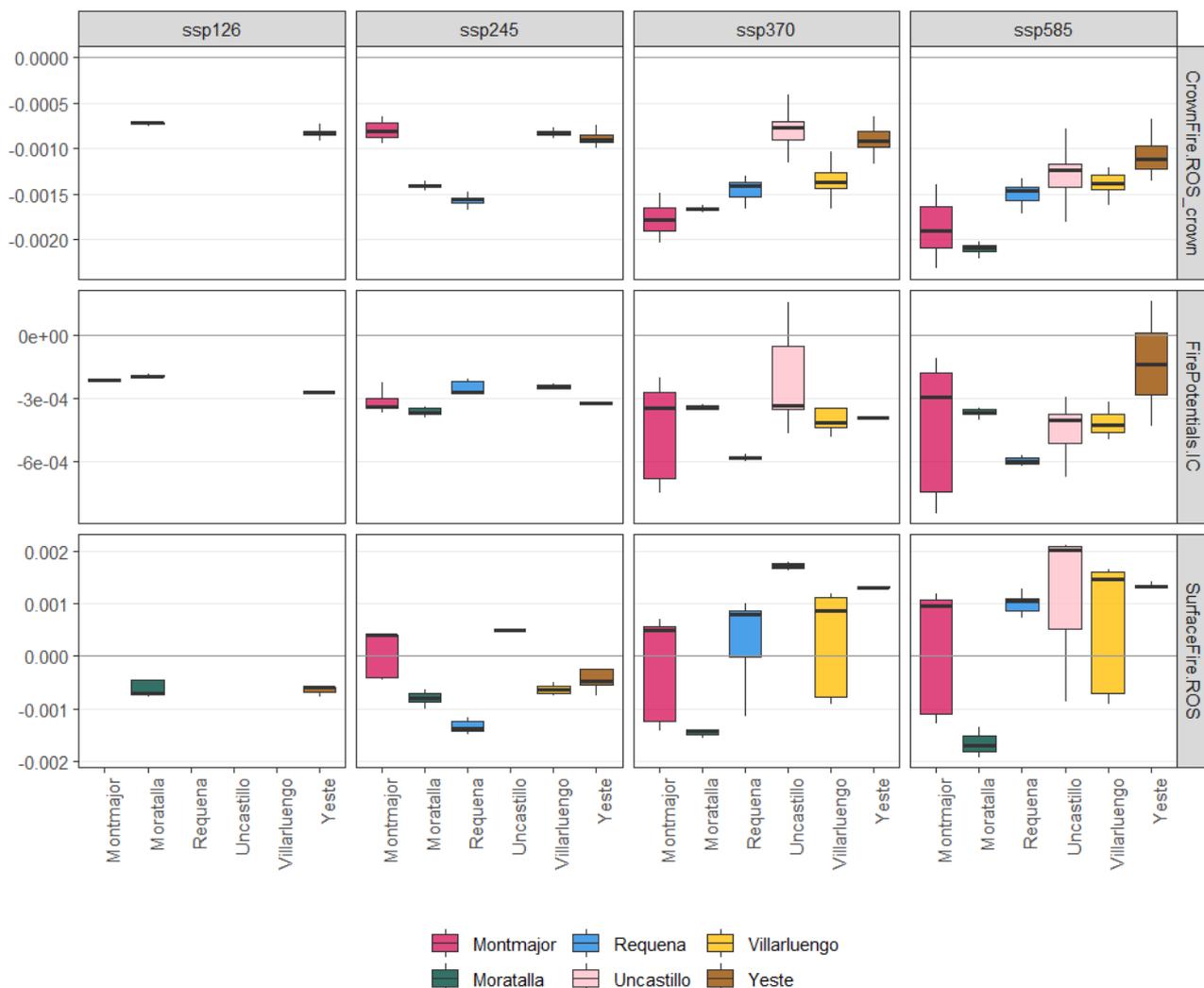


Figura 8. Distribución de los coeficientes de pendiente de Sen por incendio y escenario climático en las métricas de comportamiento del fuego en las parcelas muestreadas. Se muestran únicamente coeficientes significativos ($p < 0,05$).

Tabla 5. Proporción de parcelas con tendencia significativa en las variables de comportamiento del fuego. N, número total de parcelas; NS, parcelas significativas ($p < 0,05$).

| | Escenario | SSP 126 | | SSP 245 | | SSP 370 | | SSP 585 | |
|---------------------|--------------|---------|----|---------|----|---------|----|---------|----|
| | | N | NS | N | NS | N | NS | N | NS |
| CrownFire.ROS_crown | Incendio | | | | | | | | |
| | Montmajor | 28 | 0 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| | Moratalla | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| | Requena | 29 | 0 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| | Uncastillo | 19 | 0 | 19 | 0 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| | Villarluengo | 24 | 0 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Yeste | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | |
| FirePotentials.IC | Montmajor | 28 | 2 | 29 | 12 | 29 | 22 | 29 | 21 |
| | Moratalla | 14 | 8 | 14 | 9 | 14 | 10 | 14 | 10 |
| | Requena | 29 | 0 | 36 | 12 | 36 | 2 | 36 | 2 |
| | Uncastillo | 19 | 0 | 19 | 0 | 19 | 11 | 19 | 9 |
| | Villarluengo | 24 | 0 | 24 | 3 | 24 | 4 | 24 | 3 |
| | Yeste | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 1 | 11 | 2 |
| SurfaceFire.ROS | Montmajor | 39 | 0 | 42 | 30 | 42 | 38 | 42 | 41 |
| | Moratalla | 22 | 5 | 22 | 22 | 22 | 3 | 22 | 3 |
| | Requena | 46 | 0 | 56 | 16 | 56 | 51 | 56 | 53 |
| | Uncastillo | 27 | 0 | 27 | 12 | 27 | 14 | 27 | 19 |
| | Villarluengo | 35 | 0 | 35 | 16 | 35 | 31 | 35 | 30 |
| | Yeste | 19 | 3 | 19 | 4 | 19 | 17 | 19 | 19 |

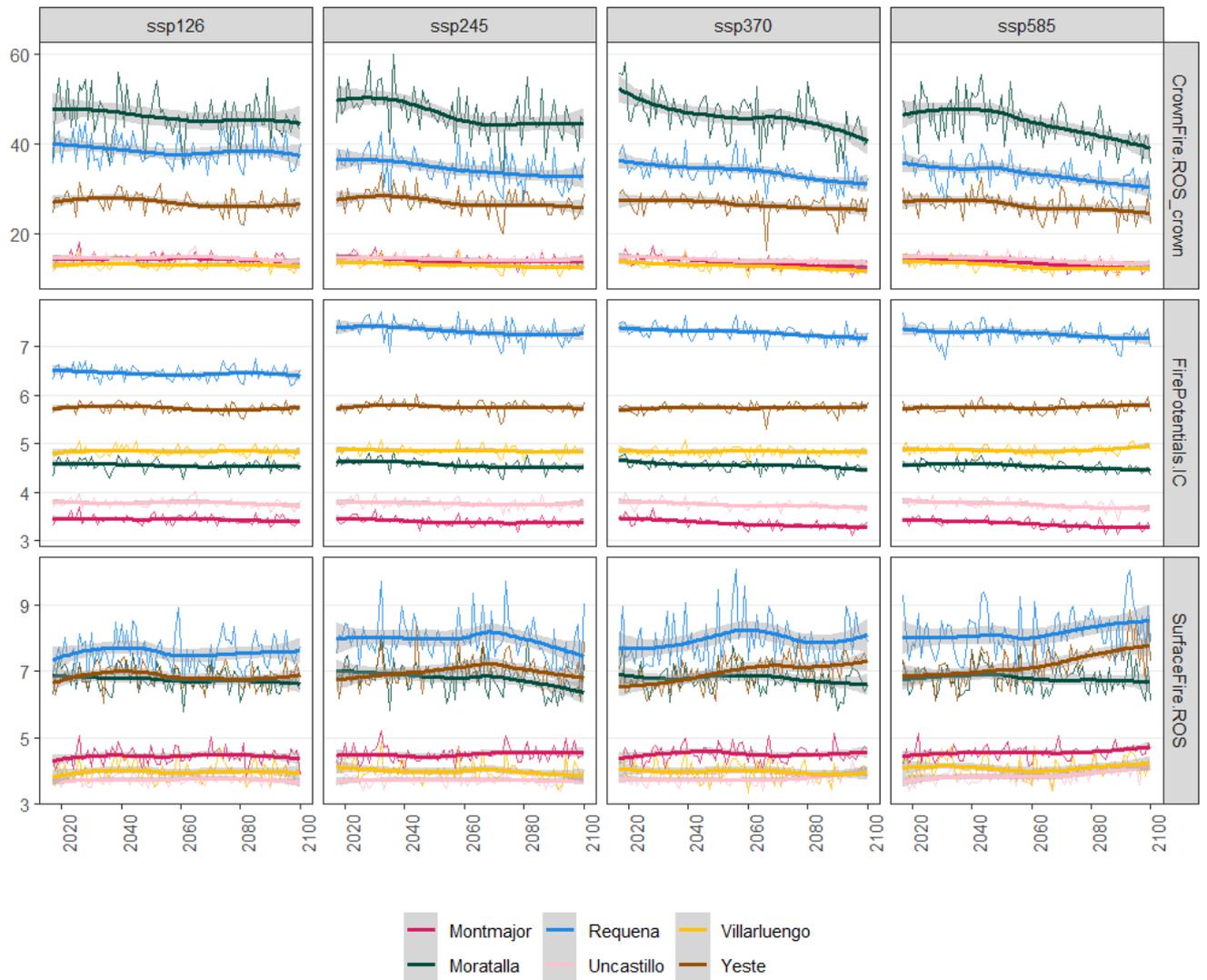


Figura 9. Trayectorias de valores promedio por incendio y escenario climático de las métricas de comportamiento del fuego. Las líneas continuas muestran el valor del promedio de todas las parcelas y el área con transparencia el intervalo de confianza (95%).

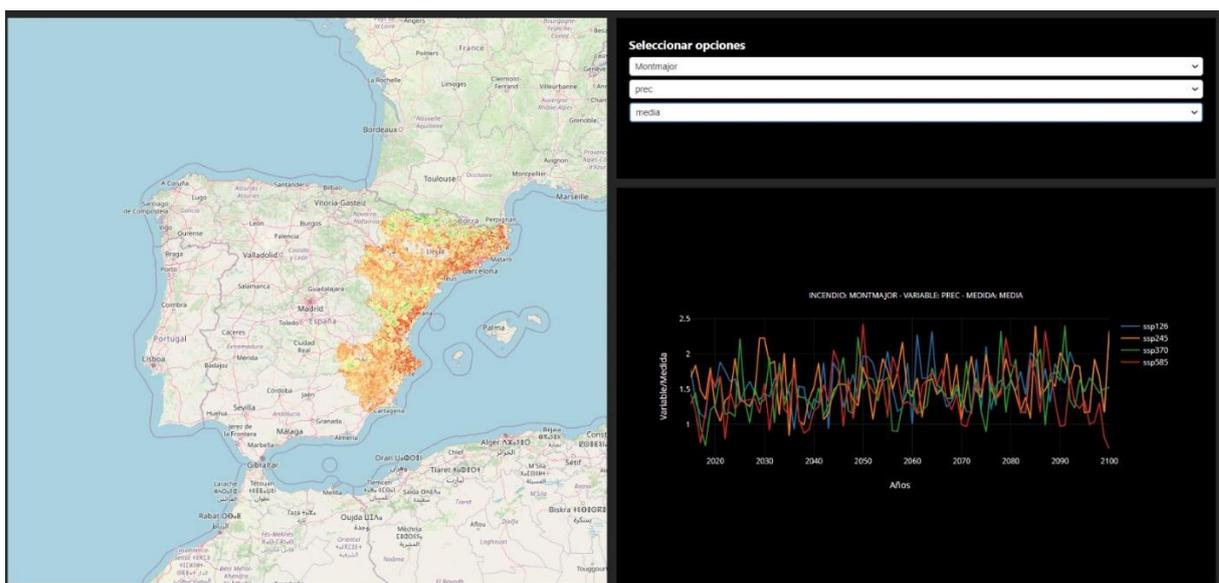


Figura 10. Captura de la versión en desarrollo del visor del proyecto. Izquierda, prototipo de mapa web basado en la API *OpenLayers*; derecha, ejemplo formulario y gráfico de evolución temporal.

6. DISCUSIÓN

El presente TFM presenta la elaboración de un modelo de datos para la organización de la información del proyecto FIREPATHS, orientado al análisis del papel de la gestión forestal para la mitigación del riesgo de incendio en escenarios de cambio. Este trabajo combina el uso de técnicas de organización y visualización de datos en entornos *web mapping* con procedimientos de tratamiento y representación de datos. El TFM se ha desarrollado en modalidad de prácticas en empresa (GeoInnova S.L.), por lo que se orienta más hacia la parte del proceso técnico de implementación (Ver Anexo 2), aportando también un análisis preliminar sobre los datos de que se dispone.

6.1. Evolución del peligro meteorológico y del comportamiento del fuego.

Lo esperable es un aumento generalizado del peligro como efecto del calentamiento global (Turco et al., 2018), algo que los resultados alcanzados corroboran. Se han encontrado tendencias positivas y significativas en FFMC y DC en los escenarios con mayor calentamiento, SSP 370, SSP 585 y en menor medida SSP 245 (Tabla 4). El aumento de estos dos componentes del FWI, indican, por tanto, mayor peligro de incendio, vinculado con el menor contenido de humedad de los combustibles finos muertos (FFMC; Wotton, 2009) y con la sequía estacional (DC) que influye a su vez en el contenido de humedad del combustible vivo leñoso (Viegas et al., 2001). Desde un punto de vista puramente climático esto indicaría una situación de alerta creciente bajo casi todos los escenarios, salvo el SSP 126, el más “optimista” de los analizados.

No obstante, la interacción clima y vegetación modula la presencia de combustible y, por tanto, el peligro de incendio. Es decir, que la propia vegetación en sus procesos de germinación, desarrollo y senescencia condiciona el tipo y disponibilidad de combustible. Un escenario de calentamiento acompañado de reducción de aporte hídrico puede conllevar un menor o más lento desarrollo de la vegetación, incluso mayor mortalidad en comunidades no adaptadas a estas condiciones (Nolan et al., 2021). En este sentido, los resultados obtenidos en relación con el potencial de fuego de copa nos presentan una tendencia negativa en los dos indicadores analizados (IC, CROWN). Al estar trabajando con modelos climáticos acoplados a modelos de la dinámica de la vegetación, parece que cuando el balance hídrico empeora (más temperatura y menor precipitación (Tabla 3), el arbolado tendría dificultades para su desarrollo que influiría en la menor disponibilidad de combustible vivo, compensado la disminución de contenido de humedad en términos de comportamiento del fuego. Esto puede llevar a producir una menor densidad de combustible en las copas, lo que reduciría la expansión de fuego más peligrosa que es la de copas. Aun así, existe una correlación que cuantos más gases de efecto invernadero emite el escenario climático, más aumenta la probabilidad de fuego en superficie (el modo de propagación más habitual). En este caso, el aumento de temperatura (relacionado con el fuerte incremento en FFMC) puede acarrear ese aumento en la tasa de propagación.

6.2. Implementación de visores de información espacial

Por lo que hace a la representación visual de los datos resultantes en el visor, comentar que es una herramienta de análisis que servirá para poder acercar los datos que en un principio son bastante técnicos a un público más general de una forma interactiva y sencilla. El visor a día de hoy aún se encuentra en desarrollo, por lo que se añadirán funcionalidades que lo harán incluso más completo, como por ejemplo los escenarios de gestión. Pese a ello, el diseño implementado permite ya un esbozo de interpretación de las trayectorias de peligro y comportamiento. En futuros trabajos, se incorporarán los datos de los demás escenarios de gestión para poder hacer una comparación más eficaz. También sería interesante explorar nuevas variables (longitud de llama o energía liberada durante la combustión) que puedan llegar a ser significativas y añadirlas al estudio para poder tener perspectiva más completa para tomar una decisión fundamentada.

A modo de valoración personal cabe decir que al no tener los datos desde un principio y depender de entregas indeterminadas en el tiempo, los primeros datos se recibieron después del primer mes de

prácticas, estos contenían unas pautas mínimas, contaban con una estructuración en varios casos con problemas de formato y se iban modificando a medida que se iban trabajando en ellos, por lo que, en más de una ocasión, se ha realizado una tarea que al día siguiente se ha tenido que repetir ya que, los datos proporcionados no eran los adecuados o la propia finalidad de estos se reformulaba, por lo que era necesario el cálculo de otras variables. En un principio se tuvo que realizar el modelo de datos sin tener de forma clara el contenido del mismo, tanto en cuanto a formatos como en objetivos de los mismos. Decir que, la idea inicial era tener hecha las tendencias en los seis escenarios de gestión para poder comparar las estrategias. Pero eso, no ha sido posible, ya que, no se han recibido los datos de los demás escenarios a día de la entrega de la memoria. Se ha de decir también, que tanto el tutor de prácticas Miquel Febrer como el tutor de TFM Marcos Rodrigues se implicaron en el trabajo y estuvieron disponibles para cualquier tipo de duda que surgiera a medida que se avanzaba en el proyecto. Por último, comentar que, aun finalizada esta memoria, se seguirá trabajando en el proyecto y se podrá contactar con el autor de este TFM o con el equipo del mismo para dudas sobre el mismo.

7. CONCLUSIONES

Los visores son herramientas que nos facilitan la toma de decisiones, ya que nos permiten analizar los datos de una manera visual y accesible. La combinación de modelos de datos estructurados de forma adecuada es indispensable para implementar herramientas eficientes para la gestión y diseminación de información. En el presente TFM esto se ha abordado mediante la tradicional combinación de BBDD espaciales, con servidores de geodatos (y metadatos) y visores cartográficos. Pero esta implementación ha estado fuertemente condicionada por el pretratamiento de los datos (por ejemplo, paso de estructura de tablas en formato *wide a long*).

La temática abordada se centra en el efecto del cambio climático y la gestión forestal en el riesgo de incendio. En este contexto se perseguían dos objetivos: O1 - Desarrollar e implementar un modelo de datos para sostener una plataforma que permita la visualización e interpretación de los resultados del proyecto; O2 - Caracterizar las trayectorias de comportamiento potencial del fuego en escenarios de cambio climático y gestión forestal en el periodo 2017-2100.

El O1 se ha conseguido abordar en su totalidad. Si bien todavía no se dispone de la totalidad de la información, el modelo de datos diseñado permite su incorporación, habiendo establecido una serie de dominios de datos y segmentación en tablas temáticas que organizan los tres tipos de información a presentar en el visor: peligro meteorológico a nivel de incendio, comportamiento potencial del fuego en parcelas de campo y tendencias asociadas en ambos casos. En cuanto al O2, interpretación preliminar de los datos disponibles., los resultados sugieren que escenarios climáticos con mayor calentamiento (principalmente SSP 370 y SSP 585) conllevan mayor peligro de incendio. Pero el añadir la dinámica de la vegetación nos permite tener en cuenta efectos sobre el combustible que indican un empeoramiento del comportamiento del fuego en superficie, pero con una leve mejora del potencial de fuego de copa.

BIBLIOGRAFÍA:

- Assmann, E. (1970). Studies in the Organic Production, Structure, Increment and Yield of Forest Stands. The Principles of Forest Yield Study. <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780080066585/the-principles-of-forest-yield-study>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., ... Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth System. Science, 324(5926), 481-484. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1163886>

- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., De La Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., & Martínez-Vega, F. J. (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 606-619. <https://doi.org/10.1071/WF12052>
- Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., Oom, D., Velea, R., Mouillot, F., Molina, J. R., Miranda, A. I., Lopes, D., Salis, M., Bugaric, M., Sofiev, M., Kadantsev, E., Gitas, I. Z., Stavrakoudis, D., Eftychidis, G., ... Viegas, D. (2023). Towards an Integrated Approach to Wildfire Risk Assessment: When, Where, What and How May the Landscapes Burn. *Fire* 2023, Vol. 6, Page 215, 6(5), 215. <https://doi.org/10.3390/FIRE6050215>
- De Cáceres, M., Molowny-Horas, R., Cabon, A., Martínez-Vilalta, J., Mencuccini, M., García-Valdés, R., Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Martin-Stpaul, N., Morin, X., D'adamo, F., Batllori, E., & Améztegui, A. (2023). MEDFATE 2.9.3: a trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development*, 16(11), 3165-3201. <https://doi.org/10.5194/GMD-16-3165-2023>
- De Santis, A., & Chuvieco, E. (2009). GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 554-562. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2008.10.011>
- Dupuy, J. luc, Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science* 2020 77:2, 77(2), 1-24. <https://doi.org/10.1007/S13595-020-00933-5>
- Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D. L., Obersteiner, M., Pachauri, S., ... Riahi, K. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251-267. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.06.004>
- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., & Kainuma, M. (2017). SSP 3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268-283. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.06.009>
- Galizia, L. F., Barbero, R., Rodrigues, M., Ruffault, J., Pimont, F., & Curt, T. (2023). Global Warming Reshapes European Pyroregions. *Earth's Future*, 11(5), e2022EF003182. <https://doi.org/10.1029/2022EF003182>
- Goodchild, M. F. (2019). Geography and geographic information science: An evolving relationship. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 63(4), 530-539. <https://doi.org/10.1111/CAG.12554>
- Granda, V. (2023). Access to Spanish Meteorological Stations Services [R package meteospain version 0.1.3]. <https://CRAN.R-project.org/package=meteospain>
- Hogeboom, R. J., Knook, L., & Hoekstra, A. Y. (2018). The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources*, 113, 285-294. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2018.01.028>
- Maganto, S., Pascual, R., Federico, A., Power, A., & Romero, L. (s. f.). El Núcleo Español de Metadatos, perfil mínimo de metadatos recomendados para España.

- Miezīte, L. E., Ameztegui, A., De Cáceres, M., Coll, L., Morán-Ordóñez, A., Vega-García, C., & Rodrigues, M. (2022). Trajectories of wildfire behavior under climate change. Can forest management mitigate the increasing hazard? *Journal of Environmental Management*, 322, 116134. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116134>
- Moreno, J. M. (2007). *Cambio Global e Incendios Forestales: Una Visión desde España*. Conferencia Internacional Sobre Incendios Forestal.
- Nolan, R. H., Collins, L., Leigh, A., Ooi, M. K. J., Curran, T. J., Fairman, T. A., Resco de Dios, V., & Bradstock, R. (2021). Limits to post-fire vegetation recovery under climate change. *Plant, Cell & Environment*, 44(11), 3471-3489. <https://doi.org/10.1111/PCE.14176>
- Parisien, M. A., Dawe, D. A., Miller, C., Stockdale, C. A., & Armitage, O. B. (2019). Applications of simulation-based burn probability modelling: A review. *International Journal of Wildland Fire*, 28: 913-926., 28(12), 913. <https://doi.org/10.1071/WF19069>
- Pohlert, T. (2023). Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/trend.pdf>
- Pombo, D. G. (2019). Conocimiento, acceso, derechos y democratización de los datos: Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). *Huellas*, 23(1), 71-85. <https://doi.org/10.19137/huellas-2019-2305>
- Prichard, S. J., Sandberg, D. V., Ottmar, R. D., Eberhardt, E., Andreu, A., Eagle, P., & Swedin, Kjell. (2013). Fuel Characteristic Classification System version 3.0: technical documentation. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-887. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 79 p., 887. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-887>
- Resco de Dios, V., Fellows, A. W., Nolan, R. H., Boer, M. M., Bradstock, R. A., Domingo, F., & Goulden, M. L. (2015). A semi-mechanistic model for predicting the moisture content of fine litter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 64-73. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2015.01.002>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>
- Rodrigues, M., Cunill Camprubí, À., Balaguer-Romano, R., Coco Megía, C. J., Castañares, F., Ruffault, J., Fernandes, P. M., & Resco de Dios, V. (2023). Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of The Total Environment*, 859, 160320. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160320>
- Rodrigues, M., Jiménez-Ruano, A., & de la Riva, J. (2020). Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 1: Drivers of change. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/J.SCI-TOTENV.2019.135841>
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., ... Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change* 2018 8:4, 8(4), 325-332. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>
- San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Liberta, G., Giovando, C., Boca, R., Sedano, F., Kempeneers, P., McInerney, D., Withmore, C., de Oliveira, S. S., Rodrigues, M., Durrant, T., Corti, P., Oehler, F., Vilar, L., & Amatulli, G. (2012). *Comprehensive Monitoring*

- of Wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). En J. Tiefenbacher (Ed.), *Approaches to Managing Disaster*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/28441>
- Turco, M., Rosa-Cánovas, J. J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J. P., Llasat, M. C., & Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. *Nature Communications* 2018 9:1, 9(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z>
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., Doelman, J. C., van den Berg, M., Harmsen, M., de Boer, H. S., Bouwman, L. F., Daioglou, V., Edelenbosch, O. Y., Girod, B., Kram, T., Lassal-etta, L., Lucas, P. L., van Meijl, H., Müller, C., van Ruijven, B. J., van der Sluis, S., & Tabeau, A. (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, 42, 237-250. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.008>
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System (Vol. 35). Canadian Forestry Service.
- Viegas, D. X., Piñol, J., Viegas, M. T., & Ogaya, R. (2001). Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal of Wildland Fire*, 10(2), 223-240. <https://doi.org/10.1071/WF01022>
- Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M. A., Anderson, K., Moore, B., & Flannigan, M. D. (2017). cffdrs: an R package for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. *Ecological Processes*, 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/S13717-017-0070-Z/FIGURES/6>
- Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., & Lettenmaier, D. P. (2019). Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California. *Earth's Future*, 7(8), 892-910. <https://doi.org/10.1029/2019EF001210>
- Wotton, B. M. (2009). Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 16(2), 107-131. <https://doi.org/10.1007/S10651-007-0084-2/METRICS>

ANEXOS:

1. ANEXO LISTA LENGUAJES Y PROGRAMAS UTILIZADOS:

Lista de lenguajes de programación utilizados

- Python
- SQL
- R
- JavaScript
- Html

Programas utilizados

- QGIS
- OSGeo4W Shell
- R Studio
- R
- Window Shell
- PGAdmin4
- VisualStudioCode
- Geoserver
- D.Beaver
- Docker Desktop
- Mendeley

2. ANEXO SCRIPTS:

2.1. Script en SQL para la eliminación de duplicados

- Primer paso: Contar que cantidad de veces se repite un valor con el mismo escenario, id del incendio, variable, fecha y valor.

```
SELECT escenario, id_inc, variable, medida, date, valor, COUNT(*) as cantidad
FROM tabla_variables_pivotada
GROUP BY escenario, id_inc, variable, medida, date, valor
HAVING COUNT(*) > 1;
```

- Segundo Paso: Añadir un id con una llave primaria.

```
ALTER TABLE mi_tabla ADD COLUMN id SERIAL PRIMARY KEY;
```

- Tercer Paso: Eliminar aquellas entradas que tengan repetidos todos los valores de las variables.

```
DELETE FROM tabla_variables_pivotada a WHERE EXISTS (SELECT 1
FROM tabla_variables_pivotada b WHERE a.date = b.date
AND a.valor = b.valor AND a.medida = b.medida AND a.id_inc = b.id_inc
AND a.variable = b.variable AND a.scenario = b.scenario AND a.id > b.id );
```

2.2. Consultas de los Endpoints SQL

- Valores:

```
SELECT json_build_object(date, valor) as jsonn FROM tabla_variables_pivotada
WHERE id_escenario = '%id_escenario%' and id_incendio = '%id_incendio%' and id_variable =
'%id_variable%' and id_medida = '%id_medida%'
ORDER BY date
```

- Tendencias:

```
SELECT json_agg(json_build_object( '%nombre_columna%',%nombre_columna%)) AS data_trend
FROM tabla_tendencia
WHERE id_escenario = '%id_escenario%' AND id_incendio = '%id_incendio%'
```

2.3. Tablas de dominios y scripts en SQL

Se deben crear cuatro tablas (incendios, escenarios, variables y medidas) de dominios que relacionen con un identificador único de tipo “*integer*” (te había dicho serial, pero así lo puedes modificar a tu gusto) los distintos valores. Además, este campo identificador debe ser llave primaria. Por ejemplo:

- Id_incendio (integer) = 1 Nombre__incendio (text) = Montmajor
- Id_incendio (integer) = 2 Nombre__incendio (text) = Moratalla

Esto para crear las tablas de “incendios,escenarios”, variables y medidas. Una vez creada se hace lo siguiente:

En la tabla pivotada debemos utilizar estos dominios, de tal forma que las columnas escenario, incendio (id_inc, renombrada para no confundir), variable y medida deben sustituirse por: id_escenario, id_incendio, id_variable e id_medida. Para hacer la sustitución se debe aplicar una SQL de actualización desde los valores de la relación, explicada más adelante.

Esta es la tabla de incendios:



The screenshot shows a database management tool interface with a table named 'dominios_incendio'. The table has two columns: 'id_incendio' (integer, primary key) and 'nombre_incendio' (text). The data rows are:

| id_incendio | nombre_incendio |
|-------------|-----------------|
| 1 | Montmajor |
| 2 | Moratalla |

Figura A1. Captura de pantalla. Tabla “dominios_incendio”

Esta es la tabla “tabla_variables_pivotada”:

| scenariotext | incendios text | date numeric | variable text | medida text | valor double precision |
|--------------|----------------|--------------|---------------|-------------|------------------------|
| ssp370 | Montmajor | 2100 | prec | std | 5.792852573116171 |
| ssp585 | Montmajor | 2033 | maxtemp | med | 20.030908203125 |
| ssp585 | Montmajor | 2032 | maxtemp | med | 17.1911865234375 |
| ssp585 | Montmajor | 2031 | maxtemp | med | 18.18837890625 |
| ssp585 | Montmajor | 2030 | maxtemp | med | 18.307275390625 |
| ssp585 | Montmajor | 2029 | maxtemp | med | 17.470849609375 |
| ssp585 | Montmajor | 2028 | maxtemp | med | 17.965478515625 |
| ssp585 | Montmajor | 2027 | maxtemp | med | 18.531396484375 |
| ssp585 | Montmajor | 2026 | maxtemp | med | 17.43740234375 |
| ssp585 | Montmajor | 2025 | maxtemp | med | 16.922998046875 |
| ssp585 | Montmajor | 2024 | maxtemp | med | 16.8001953125 |
| ssp585 | Montmajor | 2023 | maxtemp | med | 15.8919921875 |

Figura A2. Captura de pantalla. Parte de ejemplo de la tabla “tabla_variables_pivotada”

Posteriormente, se actualiza cada tabla con esta consulta:

```
UPDATE tabla_variables_pivotada AS a
SET id_incendio = b.id_incendio
FROM incendios AS b
WHERE a.incendios = b.nombre_incendio;
```

Lo que nos da el resultado siguiente:

| | scenariotext | incendios text | date numeric | variable text | medida text | valor double precision | id_incendio integer |
|----|--------------|----------------|--------------|---------------|-------------|------------------------|---------------------|
| 1 | ssp370 | Montmajor | 2100 | prec | std | 5.792852573116171 | 1 |
| 2 | ssp585 | Montmajor | 2033 | maxtemp | med | 20.030908203125 | 1 |
| 3 | ssp585 | Montmajor | 2032 | maxtemp | med | 17.1911865234375 | 1 |
| 4 | ssp585 | Montmajor | 2031 | maxtemp | med | 18.18837890625 | 1 |
| 5 | ssp585 | Montmajor | 2030 | maxtemp | med | 18.307275390625 | 1 |
| 6 | ssp585 | Montmajor | 2029 | maxtemp | med | 17.470849609375 | 1 |
| 7 | ssp585 | Montmajor | 2028 | maxtemp | med | 17.965478515625 | 1 |
| 8 | ssp585 | Montmajor | 2027 | maxtemp | med | 18.531396484375 | 1 |
| 9 | ssp585 | Montmajor | 2026 | maxtemp | med | 17.43740234375 | 1 |
| 10 | ssp585 | Montmajor | 2025 | maxtemp | med | 16.922998046875 | 1 |
| 11 | ssp585 | Montmajor | 2024 | maxtemp | med | 16.8001953125 | 1 |
| 12 | ssp585 | Montmajor | 2023 | maxtemp | med | 15.8919921875 | 1 |

Figura A3. Captura de pantalla. Columna “id_incendio” añadida en la tabla “tabla_variables_pivotada”

Después, se aplica a las cuatro nuevas columnas de “id_incendio”, “id_escenario”, “id_variable” e “id_medida”. Añadimos las columnas de identificadores, que se tendrá que realizar también para la tabla de tendencia y tablas generales.

2.4. Script de tendencias en R

```
# install.packages("Kendall")
# install.packages("RPostgreSQL")
# install.packages("DBI")
# install.packages("RPostgres")
# install.packages("dplyr")

#cargar las bibliotecas
library(Kendall)
library(RPostgreSQL)
library(DBI)
library(RPostgres)
library(dplyr)

# Establecer los detalles de la conexión con bd del docker
con <- dbConnect(RPostgres::Postgres(), dbname = "postgis_34_incendios",
  host = "localhost", port = 5433,
  user = "postgres", password = "postgres")

query1 <- "SELECT DISTINCT scenario, id_inc, variable FROM tabla_variables_pivotada WHERE variable IN
('ffmc','dc')"
fire_data1 <- dbGetQuery(con, query1)
print(fire_data1)

# Crear una tabla vacía para almacenar los resultados agregados
results_table <- data.frame(
  id_inc = character(),
  scenario = character(),
  ffmc_sen_slope = numeric(),
  dc_sen_slope = numeric(),
  stringsAsFactors = FALSE
)

for (n in 1:nrow(fire_data1)) {
  sce <- fire_data1$scenario[n]
  id_inc <- fire_data1$id_inc[n]
  t_variable <- fire_data1$variable[n]

  # Construir la consulta SQL con comillas simples para tratar los valores como texto
  query2 <- paste("SELECT valor FROM tabla_variables_pivotada WHERE scenario = '", sce, "' AND id_inc = '",
id_inc, "' AND variable = '", t_variable, "' AND medida = 'media'", sep="")
  print(query2)

  fire_data2 <- dbGetQuery(con, query2)
  fire_data2 <- as.numeric(fire_data2$valor) # Hacer numérico porque me lo pide luego el sen's slope
  print(fire_data2)

#Tendencia
fire_values <- c(fire_data2)
frequency <- 1
fire_ts <- ts(fire_values, frequency = frequency, start = 2015)
```

```

sen_test <- trend::sens.slope(fire_ts)

# Extraer el valor numérico de la pendiente de Sen del objeto 'htest'
sen_slope <- sen_test$estimate

print(sen_slope)

# Verificar si ya existe una fila para esta combinación de id_inc y escenario
row_index <- which(results_table$id_inc == id_inc & results_table$scenario == sce)

# Actualizar los valores correspondientes en la fila existente o agregar una nueva fila
if (length(row_index) > 0) {
  if (t_variable == "ffmc") {
    results_table[row_index, "ffmc_sen_slope"] <- sen_slope
  } else if (t_variable == "dc") {
    results_table[row_index, "dc_sen_slope"] <- sen_slope
  }
} else {
  results_table <- rbind(results_table, data.frame(
    id_inc = id_inc,
    scenario = sce,
    ffmc_sen_slope = ifelse(t_variable == "ffmc", sen_slope, NA),
    dc_sen_slope = ifelse(t_variable == "dc", sen_slope, NA),
    stringsAsFactors = FALSE
  ))
}

# Ordenar la tabla por id_inc y escenario en orden creciente
results_table <- arrange(results_table, id_inc, scenario)

# Imprimir la tabla con los resultados ordenados
print(results_table)

```

2.5. Script JS de la creación del gráfico de tendencia

```

var ssp126 = {
  x:[2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2031,2032
,2033,2034,2035,2036,2037,2038,2039,2040,2041,2042,2043,2044,2045,
  2046,2047,2048,2049,2050,2051,2052,2053,2054,2055,2056,2057,2058,2059,2060,2061,2062,2063,2
064,2065,2066,2067,2068,2069,2070,2071,2072,2073,2074,2075,2076,2077,
  2078,2079,2080,2081,2082,2083,2084,2085,2086,2087,2088,2089,2090,2091,2092,2093,2094,2095,2
096,2097,2098,2099,2100],
  y: [73.08231889785102, 71.21400495380325, 76.8838324279128, 70.97487015722407,
70.06432897479569, 70.86754952003395, 74.65717159896398, 71.98857455450087, 69.32802333495992,
71.45402116654013, 72.98949988963936, 70.62268109583391, 72.44316777604888, 69.55088687399642,
73.36387942822572, 68.25472168713485, 70.1694982802651, 71.12579553564149,
73.72280539802689, 73.20584355135198, 74.26918990484991, 74.2989239734862, 72.76261127541713,
74.07006964010762, 73.56791010449106, 70.34472386498602, 76.25946267262712, 69.66619798952,
71.76.02224053406319, 74.26642862288229, 73.42530351417561, 72.46586968529328, 75.35956779326837,
75.27118366548976, 73.61740276913565, 74.22664947025424, 68.73296830569839, 71.39506394865043,

```

```
70.78046701552587, 68.04064697575755, 78.96552285977333, 71.32170371786066, 76.38013959205774,
75.61036110566343, 72.07043442695733, 68.7435136723179, 75.43215720771131, 74.02084831810953,
71.8516135757334, 68.68749019760982, 70.403252924201, 75.38675324892377, 72.25667145749019,
73.20345465665741, 76.97346871585619, 70.25243593922936, 71.11730122478235, 77.63900537526409,
72.51311861565273, 75.6103575899594, 72.38093878220921, 77.28287693481913, 76.88342979591316,
74.38510708299243, 79.63067839607339, 77.43843090126553, 76.54395288394161, 71.08115441147343,
72.54811225351135, 73.44426658800289, 72.79357565407963, 73.16614013149284, 74.92398161269851,
72.67547199368427, 74.15229402081997, 78.07881948471694, 72.89020609473387, 72.08232875508016,
74.06228731480014, 69.17601620953825, 71.85178238667493, 71.06782565849328, 77.54515370371037,
75.9406904855826, 75.44839761365357, 70.6592942211774],
```

```
  line: { color: "rgb(255,0,0)" },
  mode: "lines",
  type: "scatter",
  name: "ssp126"
```

```
};
```

```
var ssp245 = {
```

```
  x:
  [2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2031,2032,2033,203
  4,2035,2036,2037,2038,2039,2040,2041,2042,2043,2044,2045,
  2046,2047,2048,2049,2050,2051,2052,2053,2054,2055,2056,2057,2058,2059,2060,2061,2062,2063,2
  064,2065,2066,2067,2068,2069,2070,2071,2072,2073,2074,2075,2076,2077,
  2078,2079,2080,2081,2082,2083,2084,2085,2086,2087,2088,2089,2090,2091,2092,2093,2094,2095,2
  096,2097,2098,2099,2100],
```

```
  y: [74.7242795927099, 81.3893012344072, 78.0227346980924, 79.6908037114262,
79.723308802262, 81.2734039003394, 77.0901801743171, 79.9543920343555, 78.8820911002689,
78.39493320022555, 73.9861023338984, 79.0953615547997, 78.8101664748196, 80.01371082452054,
79.8467630119783, 72.8053253598135, 80.6741418306606, 78.94007836876759, 82.1733428957826,
78.1124638042636, 78.7101214755981, 75.63280984356095, 79.9501610352067, 79.4536212412337,
80.6423264186905, 77.87797014300679, 80.951214244375, 79.4920954410281, 78.561508597969,
81.80426456500194, 81.6445265697155, 78.1457477711645, 79.9424909803629, 80.0649872069384,
82.3438935730905, 81.3352708298948, 81.3247655781871, 79.6747349845358, 82.3999762804629,
82.3274726872679, 82.6289208168844, 79.98304733422235, 80.4609949252041, 76.5865938702124,
78.4262463745632, 80.9078837814311, 77.7422353879289, 80.962708925625, 83.1164136828321,
80.57416254858215, 79.9939455150752, 81.8354074348795, 81.6610399690173, 81.61865055259756,
81.4040366375734, 82.6957114621272, 79.6542652885163, 83.39700034460945, 83.2268345380428,
79.9588520381835, 80.7543049748048, 82.66957481610895, 82.0069844461838, 83.2609793158787,
78.3334875752317, 84.70986507075196, 75.6320258798412, 80.9517721016519, 80.3884010617662,
78.90808723839605, 79.5052658163398, 74.2438766547744, 81.9080013821465, 82.69945012895535,
79.1079222979964, 82.018523332754, 79.4019449108756, 82.59720470798814, 81.6092007822353,
83.9951679743703, 83.8472514863895, 81.1299256745315, 83.2868100351197, 83.1045605686758,
80.4317845794437, 81.0086257816301
```

```
  ],
```

```
  line: { color: "rgb(153,153,0)" },
  mode: "lines",
  type: "scatter",
  name: "ssp245",
};
```

```
var ssp370 = {
```

```
  x:
  [2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2031,2032,2033,203
  4,2035,2036,2037,2038,2039,2040,2041,2042,2043,2044,2045,
  2046,2047,2048,2049,2050,2051,2052,2053,2054,2055,2056,2057,2058,2059,2060,2061,2062,2063,2
  064,2065,2066,2067,2068,2069,2070,2071,2072,2073,2074,2075,2076,2077,
```

2078,2079,2080,2081,2082,2083,2084,2085,2086,2087,2088,2089,2090,2091,2092,2093,2094,2095,2096,2097,2098,2099,2100],

```
    y: [80.5074452161818, 81.35803322025629, 76.7924202253764, 78.6568005858193,
77.2995159627385, 80.70942861212754, 82.0241019202005, 81.1779537722833, 75.4882139470798,
82.4817618104646, 81.3666870397191, 76.4432387678304, 81.5338166782125, 69.0694187332644,
81.0901233044576, 80.7197849038481, 77.7874588453684, 80.56858569654389, 79.530283524255,
80.6181774676388, 78.5064229839065, 80.4065342328345, 81.3325422685943, 77.8963888510085,
79.3395449444003, 83.4387290736976, 81.9930406368782, 77.2364508374489, 81.9040271223009,
75.4387019918822, 81.0058147333225, 78.2122952783964, 80.9798252389305, 81.9028852312925,
79.7864389107021, 78.53633015199, 81.5221839321953, 83.19194489545785, 83.5303473763789,
82.7726854806604, 80.0264409883214, 78.67277316257736, 83.0308886667566, 82.4918743451602,
82.6023591738141, 81.0382548860677, 77.6685466668366, 80.2838086605077, 79.7098849986138,
81.56116238939215, 81.2510315014977, 81.6464541409602, 83.3048742859596, 82.8839588525868,
82.44141657818, 80.7302477836791, 78.774109103196, 83.5389934534648, 83.3589309216367,
83.2664934123109, 83.1521345545626, 83.28355245736441, 81.5341427020061, 80.8432382791904,
81.0937931853606, 80.5836793336489, 83.6464343202899, 80.6014944634186, 81.6899934456181,
81.30019365755365, 82.3282450002987, 82.4640721728878, 81.8921731757837, 78.72580705894654,
82.9133096444289, 84.8575308404235, 82.5199815663622, 82.00880321605835, 80.8361825660178,
83.8150475804934, 85.9935050925717, 83.88376294701021, 83.7774942735364, 83.7837364456909,
84.6929642516786, 82.4218253832636 ],
    line: { color: "rgb(72,61,139)"},
    mode: "lines",
    name: "ssp370",
    type: "scatter"
};
```

```
var ssp585 = {
```

```
    x:
[2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2031,2032,2033,2034,2035,2036,2037,2038,2039,2040,2041,2042,2043,2044,2045,
2046,2047,2048,2049,2050,2051,2052,2053,2054,2055,2056,2057,2058,2059,2060,2061,2062,2063,2064,2065,2066,2067,2068,2069,2070,2071,2072,2073,2074,2075,2076,2077,
2078,2079,2080,2081,2082,2083,2084,2085,2086,2087,2088,2089,2090,2091,2092,2093,2094,2095,2096,2097,2098,2099,2100],
```

```
    y: [73.2168625337691, 80.1666108828577, 80.4102638342987, 78.343946803365,
79.8124499439319, 78.452079515256, 77.9061538569082, 82.4909380254731, 70.9000063730098,
81.4542885154597, 79.8000458775594, 78.3856733166815, 79.6643782179145, 80.01028367196551,
80.3502547512006, 81.8040728319764, 82.2199100682741, 82.9970445061924, 81.8612992904369,
83.0746210472954, 82.1767591038881, 78.88809549368875, 80.8115601412662, 79.4231542602507,
80.8597613831015, 79.18187106420234, 83.4882629877381, 81.0637483980465, 82.7734356709947,
81.45073988408811, 77.8570204504037, 81.345981490093, 80.5854618625066, 83.84216902329555,
77.4176632862941, 82.1308744796557, 82.5337202983631, 80.5326344330809, 74.7801786555975,
80.4800724191249, 82.260138122639, 79.87476156199446, 83.4330062474347, 78.8246668446304,
78.4767307511531, 80.71098594152215, 83.5792768330323, 82.6491830017656, 84.1515028642051,
84.45628918577165, 84.508380631928, 82.5462036592789, 80.4735742406195, 83.1020075846364,
84.0691115004972, 79.0796516821417, 81.2764968534107, 84.09414113688075, 83.306665435195,
82.7981779044549, 83.8032142678513, 82.49804279588915, 82.5069147332535, 82.8618587782775,
83.8771080522062, 81.3489436298639, 85.2461876057349, 82.9474639931777, 83.6446983421375,
81.89164687244809, 84.2234493219638, 84.5623043254889, 84.0202089631963, 85.19877714604326,
85.0788180419644, 83.7366981697968, 84.8454538216301, 84.1504321682612, 83.0095624164262,
83.2989870805222, 82.2811831209892, 82.34321537065671, 85.4185791197204, 84.4238298102541,
84.1087327870012, 84.2585677544633
],
    line: { color: "rgb(72,192,203)"},
    mode: "lines",
    name: "ssp585",
    type: "scatter"
};
```

```

};

var data = [ ssp126,ssp245,ssp370,ssp585];
var layout = {
  title: "FFCM_media_Montmajor",
  paper_bgcolor: "rgb(255,255,255)",
  plot_bgcolor: "rgb(229,229,229)",
  xaxis: {
    gridcolor: "rgb(255,255,255)",
    range: [2015, 2100],
    showgrid: true,
    showline: false,
    showticklabels: true,
    tickcolor: "rgb(127,127,127)",
    ticks: "outside",
    zeroline: false
  },
  yaxis: {
    gridcolor: "rgb(255,255,255)",
    showgrid: true,
    showline: false,
    showticklabels: true,
    tickcolor: "rgb(127,127,127)",
    ticks: "outside",
    zeroline: false
  }
};
Plotly.newPlot('myDiv', data, layout);

```

2.6. SCRIPT en Python para la carga de archivos en PgAdmin 4

```

import os
nombre_archivo = 'meteo_ssp585_Yeste_acces.txt'
carpeta = 'D:/SM_TFM/Datos/Meteo/Diario/'

name = os.path.splitext(nombre_archivo)[0]

path = f'file:/// {carpeta} {nombre_archivo} ?type=csv&delimiter=%20&maxFields=10000&detectTypes=yes&geomType=none&subsetIndex=no&watchFile=no'
iface.addVectorLayer(path, name, "delimitedtext")

processing.run("qgis:importintopostgis",
  {'INPUT':f'delimitedtext://{path}',
  'DATABASE':'Incendios_TFM',
  'SCHEMA':'public',
  'TABLENAME':name,
  'PRIMARY_KEY':"",
  'GEOMETRY_COLUMN':'geom',
  'ENCODING':'UTF-8',
  'OVERWRITE':True,
  'CREATEINDEX':True,
  'LOWERCASE_NAMES':True,
  'DROP_STRING_LENGTH':False,
  'FORCE_SINGLEPART':False})

```

2.7. Script en R de la creación de los gráficos de la sección 5.2

```
install.packages("dplyr")
install.packages("tidyverse")
install.packages("trend")
library(dplyr)
library(tidyverse)
library(trend)
library(ggplot2)

# Especifica la ruta al archivo CSV
archivo_csv <- "C:/Users/mynot/Downloads/fire_behavior_no_manag.csv"

# Lee el archivo CSV en un objeto de datos
no_manag <- read.csv(archivo_csv)

t <- no_manag %>%
  filter(value != 'Inf',value>0) %>%
  na.omit()%>%
  group_by(Var,manag,ssp,fire,ID_PAR) %>%
  arrange(year) %>%
  mutate(value=value/max(value)) %>%
  summarise(Sen = sens.slope(value)$estimate,
            P=sens.slope(value)$p.value)

t %>%
  filter(P<0.05) %>%
  ggplot(aes(y=Sen,x=fire,fill=fire)) +
  geom_boxplot(outlier.shape = NA,alpha=0.8,color='gray20') +
  # scale_y_continuous(limits = c(-0.2,0.1)) + geom_hline(yintercept = 0,lty=1, color='gray60') +
  facet_grid(Var~ssp,scales = 'free_y') + scale_fill_manual(name="",values =
c('#D81B60','#004D40','#1E88E5','pink','#FFC107','#994F00')) +
  # ggthemes::theme_pander() +
  theme_bw() +
  labs(y='Pendeinte de Sen',x='') + theme(legend.position = 'bottom',
    axis.text.x = element_text(angle = 90,hjust = 1), panel.grid.minor = element_blank(),
    panel.grid.major.x = element_blank())

N <- t %>%
  group_by(Var,manag,ssp,fire) %>%
  # mutate(N=n()) %>%
  # filter(P<0.05) %>%
  summarise(Sen=mean(Sen),N=n())

NS <- t %>%
  group_by(Var,manag,ssp,fire) %>%
  # mutate(N=n()) %>%
  filter(P<0.05) %>%
  summarise(NS=n() )

N %>%
  left_join(NS) %>% View()
```

```

no_manag %>%
  filter(value != 'Inf') %>%
  group_by(Var, manag, ssp, year, fire) %>%
  summarise(value = median(value, na.rm = TRUE)) %>%
  ggplot() +
  geom_line(aes(x = year, y = value, color = fire), alpha = 0.8) +
  geom_smooth(aes(x = year, y = value, color = fire), method = 'loess', se = TRUE) +
  facet_grid(Var ~ ssp, scales = 'free_y') +
  scale_fill_manual(name = "", values = c('#D81B60', '#004D40', '#1E88E5', 'pink', '#FFC107', '#994F00',
alpha = 0.5)) +
  scale_color_manual(name = "", values = c('#D81B60', '#004D40', '#1E88E5', 'pink', '#FFC107',
'#994F00')) +
  theme_bw() +
  labs(y = 'Pendiente de Sen', x = "") +
  theme(legend.position = 'bottom',
        axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 0),
        panel.grid.minor = element_blank(),
        panel.grid.major.x = element_blank())

```