



MINISTERIO
DEL
INTERIOR



CUGC
CENTRO UNIVERSITARIO
DE LA GUARDIA CIVIL

Máster oficial universitario
en
PROTECCIÓN INTEGRAL DEL MEDIO AMBIENTE

Trabajo Fin de Máster

Propuesta de un índice meteorológico enriquecido de peligro de
incendio forestal en España y su evolución bajo escenarios de
cambio climático

Marcelino Núñez Corchero

24-abril-2025

PROPUESTA DE UN ÍNDICE METEOROLÓGICO ENRIQUECIDO DE PELIGRO DE INCENDIO FORESTAL EN ESPAÑA Y SU EVOLUCIÓN BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

MARCELINO NÚÑEZ CORCHERO¹

Delegado Territorial de la Agencia Estatal de Meteorología en Extremadura

INTRODUCCIÓN: Objetivo, Problema de estudio e hipótesis.

CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI2

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI2P

SUMARIO

Se propone un nuevo índice de peligro de incendio forestal, FWI2, adaptando el esquema del índice clásico FWI para incorporar la humedad del suelo, clave en la ignición y propagación de incendios. Los datos provienen de diversas fuentes: medidas de estaciones automáticas, salidas del modelo AEMET del índice de peligro, proyecciones climáticas, humedad del suelo por satélite y composición del suelo (SoilGrids). El nuevo índice reformula el primer escalón de subíndices del sistema canadiense. Así, incorpora datos de humedad de la capa superficial medida desde satélite para la estimación del nuevo subíndice FFMC2 y propone un esquema con una única capa profunda para el cálculo del índice de acumulación de combustible. FWI2 se compara bien con el índice original FWI, ofreciendo robustez en aspectos clave. Su evolución temporal para las proyecciones climáticas del periodo 2011-2040 indica una tendencia significativa del índice que es mayor para los valores más altos.

PALABRAS CLAVE

Índice de peligro de incendio forestal, Fire Weather Index, humedad del suelo, proyecciones regionalizadas de cambio climático.

KEY WORDS

Forest Fire Danger Index, Fire Weather Index, soil moisture, regionalized climate change projections.

¹ Los puntos de vista expresados por el autor no comprometen a la Institución donde desempeña sus funciones.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
Objetivo	5
Problema de estudio e hipótesis.....	5
Soluciones planteadas al problema de estudio	6
CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS	9
1.1.- Datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)	9
1.2.- Datos de humedad del suelo obtenidos de satélite	15
1.3.- Datos procedentes de proyecciones climáticas regionalizadas.....	20
1.4.- Estimación de la temperatura a las 12 UTC a partir de la temperatura máxima.	22
1.5.- Estimación del viento medio a las 12 UTC a partir de la racha máxima	23
1.6.- Estimación de la capacidad máxima de humedad del suelo (DSM_max)	27
1.7.-Definición de la rejilla estándar de trabajo.....	29
CAPÍTULO II METODOLOGÍA.....	33
2.1.- El índice FFMCI	34
2.2.- El índice DSMI.....	35
2.3.- El índice ISI	36
2.4. El índice BUI.....	36
2.5 El índice FWI	37
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI	39
3.1.- Descripción de las variables de entrada de FWI distintas a las de FWI.....	39
En relación con la variable Humedad:.....	39
3.2. Descripción de los subíndices de FWI en comparación con los de FWI.....	40
Subíndice de la humedad de los combustibles finos muertos:	40
Subíndice de la humedad de los combustibles muertos en la capa más profunda del suelo:	42
Subíndice de la propagación Inicial del incendio:	43
Subíndice de acumulación, BUI	44
Índice final, FWI.....	45
3.3.- Resumen gráfico de la evolución diaria y anual del valor del índice final, para el dominio	

de la península Ibérica.	47
3.4.- Correlación entre las series FWI y FWI2	50
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI2P	53
4.1.- Descripción de las variables de entrada de FWI2p	53
4.2.- Correlación entre las series del FWI2p y el tiempo	55
CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
TABLAS DE FIGURAS	62

INTRODUCCIÓN

Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es analizar el índice de peligro de incendios forestales Fire Weather Index (FWI), particularmente sus limitaciones metodológicas en cuanto a la ausencia de variables clave como la humedad del combustible vivo y la propuesta de un índice que sí recoja esta variable, que es un factor determinante en la propagación del fuego.

La humedad de los combustibles vivos, es decir, la humedad que tienen las plantas en sus troncos y en sus hojas, es una variable clave para predecir la posible ignición de un incendio forestal y la intensidad de este en caso de producirse. A pesar de ello, el tradicional índice FWI no emplea esta variable, sino la humedad del aire. Al referirse a la masa de aire, esta variable está afectada no sólo por la humedad superficial del suelo, sino por otros factores, lo que hace que, en condiciones de fuerte advección, puede no ser representativa de las condiciones del suelo. Esta ausencia de participación de la humedad del combustible vivo en la estimación del peligro de incendio es una característica común a la gran mayoría de índices de peligro actuales, lo cual limita la fiabilidad de dichos índices.

Teniendo en cuenta esta limitación, este trabajo tiene como principal objetivo la propuesta preliminar de un nuevo índice de peligro de incendio, que se denominará FWI2, adaptando la formulación del índice FWI para incorporar información de la humedad del suelo como variable de entrada, con el fin de enriquecer su capacidad predictiva. Esta humedad del suelo representa mejor la humedad del combustible vivo que la humedad del aire y no es tan variable como la humedad del aire.

Como segundo objetivo, este trabajo pretende estudiar la evolución temporal de este nuevo índice modificado en proyecciones climáticas futuras (2025-2040). Para estas proyecciones se consideran distintos escenarios representativos del cambio climático, con el fin de comprobar la influencia de éste en la evolución del peligro de incendio.

Problema de estudio e hipótesis

La estimación diaria del peligro meteorológico de incendio forestal que realiza la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (AEMET, s.f.-a) se fundamenta en un enfoque adaptado del sistema canadiense, (Van Wagner, C. E., 1987), ampliamente reconocido en el ámbito internacional y que tiene como índice principal el Fire Weather Index (FWI). Este índice de peligro de incendio forestal de AEMET presenta actualmente algunas limitaciones, siendo las más relevantes las siguientes:

- Existen años o temporadas en las que este índice presenta una clara saturación, con un elevado número de días con índice de peligro de incendio “Muy alto” o “Extremo”.
- Se trata de un índice exclusivamente meteorológico, es decir formulado únicamente con datos de variables meteorológicas, por lo que no recoge completamente el peligro de incendio real, al no incluir explícitamente variables como los usos de suelo forestal o la humedad del combustible.

Por otro lado, resulta necesario estudiar la evolución futura del riesgo de incendio en el escenario actual de cambio climático, en el que se está produciendo un aumento de la frecuencia de casos extremos en algunas de las variables meteorológicas que influyen en el peligro de incendio, como son las temperaturas y las precipitaciones.

Soluciones planteadas al problema de estudio

La hipótesis principal de este trabajo de fin de máster es que el índice de peligro de incendios forestales (FWI) podría mejorarse con la inclusión de información sobre la humedad de los combustibles vivos (HCV), es decir la humedad que tienen las plantas en sus troncos y en sus hojas. Esta variable es clave para predecir la posible ignición de un incendio forestal y la intensidad de éste si llega a desarrollarse.

El problema que presenta la humedad de los combustibles vivos es que no hay actualmente un método operativo a escala sinóptica de medida y estimación, a pesar de los numerosos esfuerzos que se están haciendo en todo el mundo (FireURisk, s.f.), en particular en España, donde hay locales pero exitosos experimentos de medida y estimación de la esta HCV llevados a cabo por los servicios de prevención de incendios de Castilla la Mancha y de la Generalitat Valenciana (Aguilar Albán, JH., 2018). Este aspecto es actualmente el foco de la mayoría de los proyectos de investigación mundiales sobre el peligro de incendio forestal.

Si bien no se dispone de estimaciones operativas de la HCV, sí puede estimarse la humedad del suelo, la cual representa mejor la HCV que la humedad del aire al estar relacionada de forma más directa con el combustible y no ser tan variable como la humedad del aire. Además, la humedad del suelo representaría también la humedad de los combustibles muertos, tal y como se considera en el modelo clásico canadiense. En esta variable entran en juego el uso del suelo forestal y la composición del suelo, entre otros factores.

Teniendo en cuenta este marco, en este TFM se plantean dos soluciones al problema de estudio:

- La formulación de un nuevo índice FWI2 enriquecido con información de la humedad del suelo.

- El estudio de la evolución temporal de este nuevo índice FWI2, tanto en las últimas dos décadas (2011-2024) como en las proyecciones futuras bajo escenarios de cambio climático (2025-2040).

La comprobación de estas hipótesis conlleva las siguientes tareas específicas:

1. Analizar variables representativas de la humedad del suelo que no forman parte de la actual definición del índice de peligro de incendio de AEMET, FWI, pero que se consideran significativamente influyentes en el peligro de incendio, como la humedad del suelo, reserva hídrica del suelo, la humedad del combustible vivo, etc.
2. Estudiar su disponibilidad, frecuencia, resolución de cara a su posible incorporación a la definición de una nueva propuesta de índice de peligro de incendio.
3. Diseñar el cálculo de un nuevo índice FWI2 adaptando el esquema del índice FWI canadiense clásico para la inclusión de las variables descriptivas de la humedad del suelo.
4. Calcular las proyecciones climáticas del nuevo índice FWI2 bajo escenarios de cambio climático, para el periodo 2011-2050.
5. Analizar la posible existencia de tendencias en los valores proyectados del nuevo índice FWI2 bajo un escenario de cambio climático.

CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS

1.1.- Datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

En este epígrafe se describen los datos de AEMET utilizados para la elaboración del índice de peligro de incendio.

El índice meteorológico de incendios forestales que calcula la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) diariamente, está basado en el sistema canadiense *Fire Weather Index* (FWI) y se obtiene a partir de los datos de las estaciones meteorológicas de AEMET y de las salidas del modelo numérico de predicción del tiempo ECMWF.

Las variables de entrada del modelo de estimación de peligro de incendio forestal son:

- la temperatura del aire, T, expresada en grados centígrados (°C)
- la humedad relativa del aire, HR, expresada en tanto por ciento (%)
- la velocidad del viento, V, expresada en kilómetros por hora (km/h)
- la precipitación registrada en las últimas 24 horas, P, expresada en milímetros (mm)

En la AEMET los datos que intervienen en el cálculo del índice de peligro de incendio se refieren a las 12 UTC² y proceden de su red de estaciones sinópticas y automáticas y del pronóstico del modelo del Centro Europeo de Predicción de Plazo Medio (CEPPM), con los que se obtiene una salida de datos y de predicción con una resolución espacial de 0.05° (unos 5 km) y ventana de trabajo de 47.367 puntos de rejilla). Cada punto de rejilla se sitúa en el centro de un cuadrado o píxel de 5 km de lado, por tanto, las variables de cálculo son representativas de un área de 25 km², es decir 2.500 ha.

Junto con los datos observados y analizados, se incluyen los valores correspondientes a los índices del Sistema Canadiense de Índice de Peligro de Incendios Forestales (*Canadian Forest Fire Weather Index System*), que son los siguientes:

- Código de humedad de los combustibles finos (FFMC, por sus siglas en inglés *Fine Fuel Moisture Code*)
- Código de humedad del mantillo o de los combustibles intermedios (DMC, por sus siglas en inglés *Duff Moisture Code*)
- Código de sequía o de la humedad en combustibles profundos y grandes (DC, por sus siglas en inglés *Drought Code*)
- Índice de propagación inicial (ISI, por sus siglas en inglés *Initial Spread Index*)
- Índice de acumulación de combustible (BUI, por sus siglas en inglés *Buildup Index*)

² La hora oficial de España se corresponde con la hora UTC +1 en invierno, UTC +2 en verano, excepto en las Islas Canarias que se corresponde con la zona hora UTC +0 en invierno, UTC +1 en verano.

- Índice de peligro de incendio forestal (FWI, por sus siglas en inglés *Fire Weather Index*)

En este trabajo, estos valores de los índices se han considerado como datos de partida, a pesar de que son estimados por un modelo que los calcula, pues no se ha repetido el cálculo ya realizado por AEMET.

En la Figura 1, se muestra un esquema del cálculo del índice FWI, partiendo de las variables meteorológicas, pasando por los índices de humedad en el primer paso y por los índices de comportamiento, para llegar al índice final.

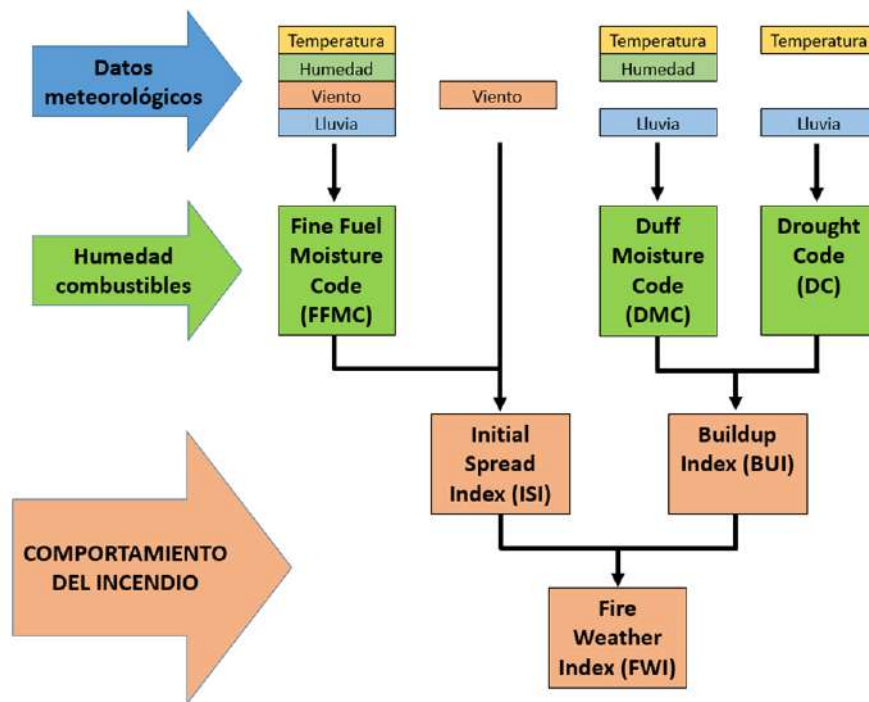


Figura 1. Esquema de cálculo del índice FWI

A continuación se muestran como ejemplo los mapas de los datos meteorológicos y de los subíndices del sistema FWI para cuatro días de la primavera y el verano de 2015, con fechas elegidas al azar:

“Propuesta de un índice meteorológico enriquecido de peligro de incendio forestal en España y su evolución bajo escenarios de cambio climático”

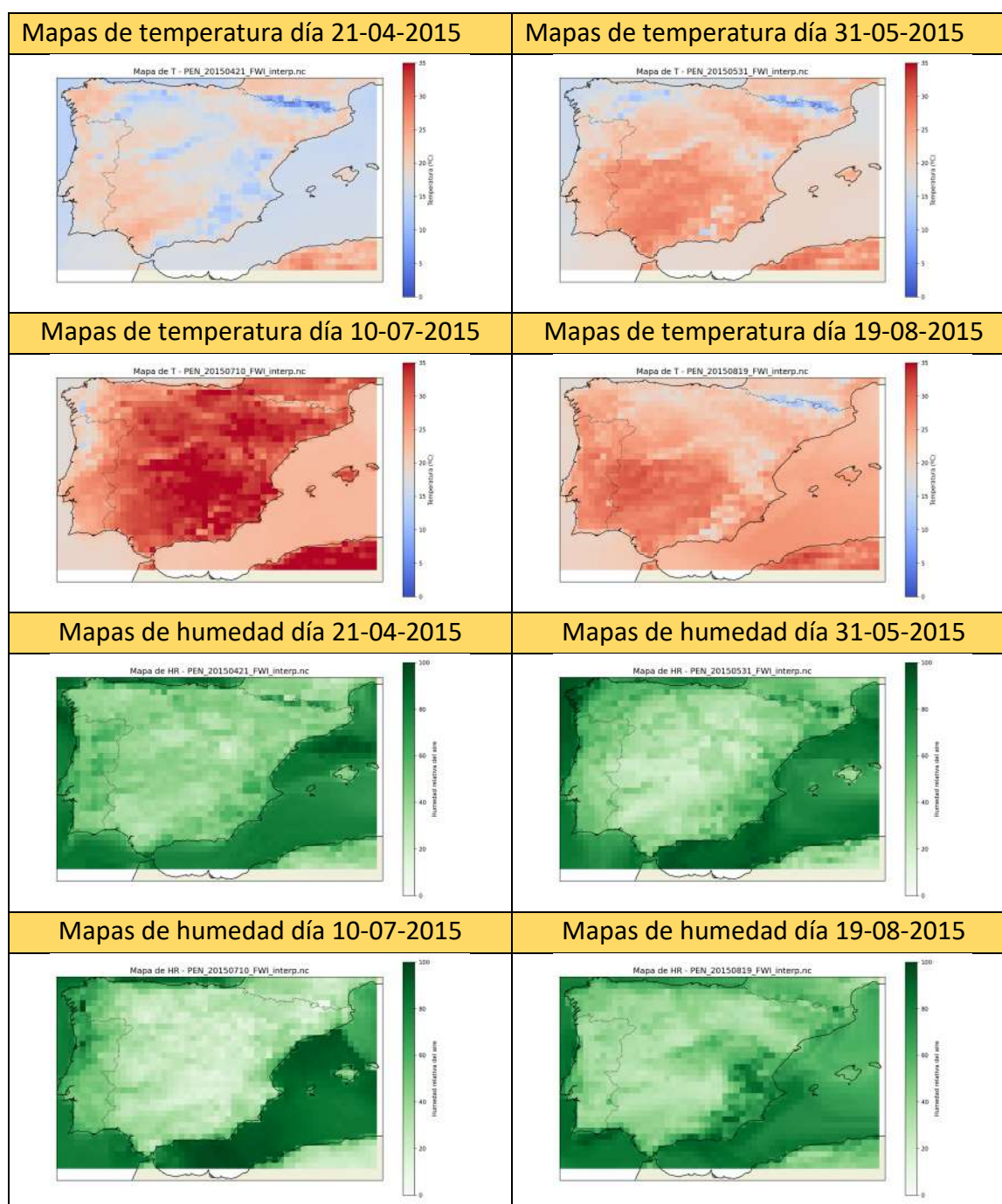


Figura 2. Mapas de temperatura y humedad, días de primavera y verano 2015

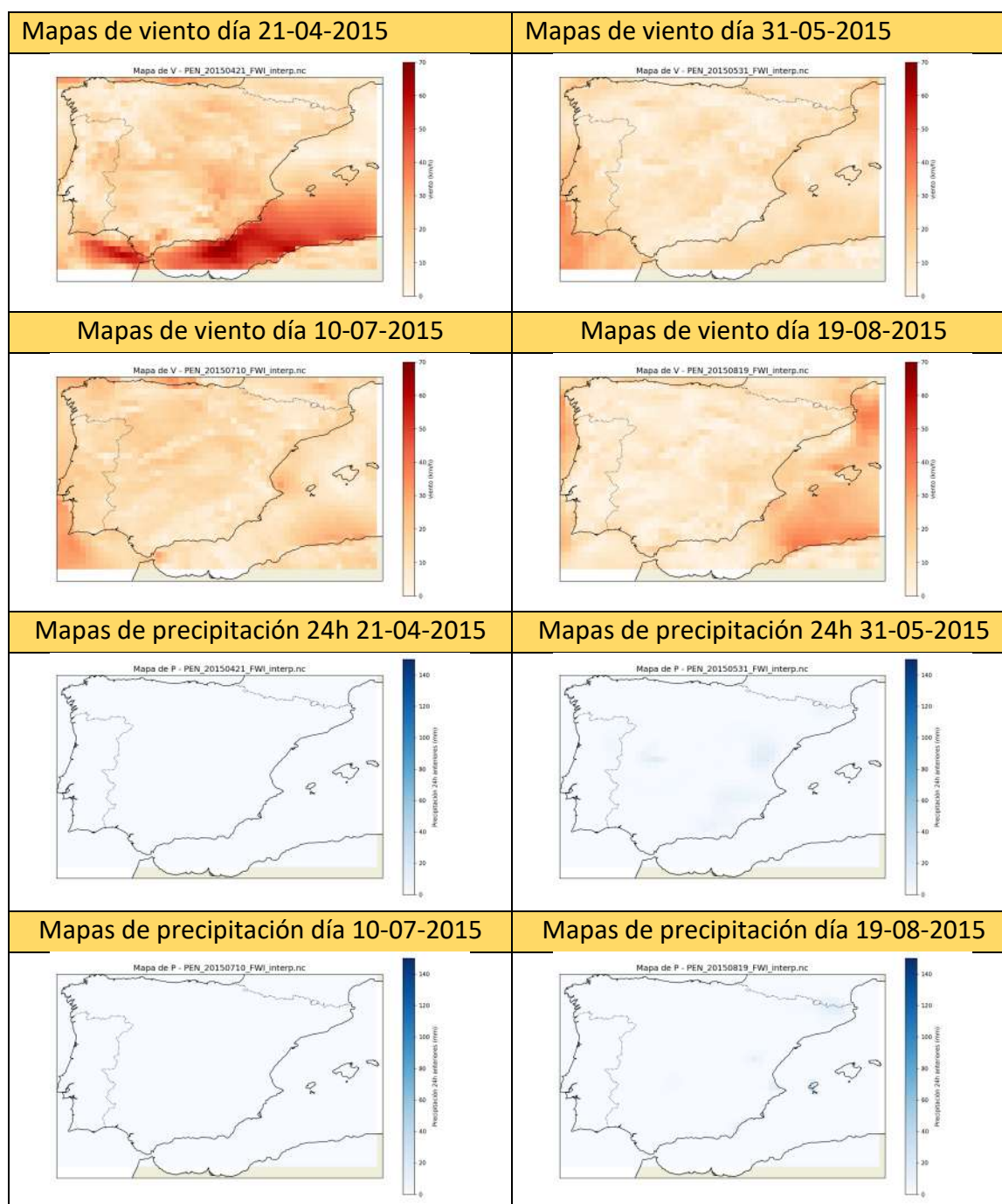


Figura 3. Mapas de viento y precipitación, días de primavera y verano 2015

“Propuesta de un índice meteorológico enriquecido de peligro de incendio forestal en España y su evolución bajo escenarios de cambio climático”

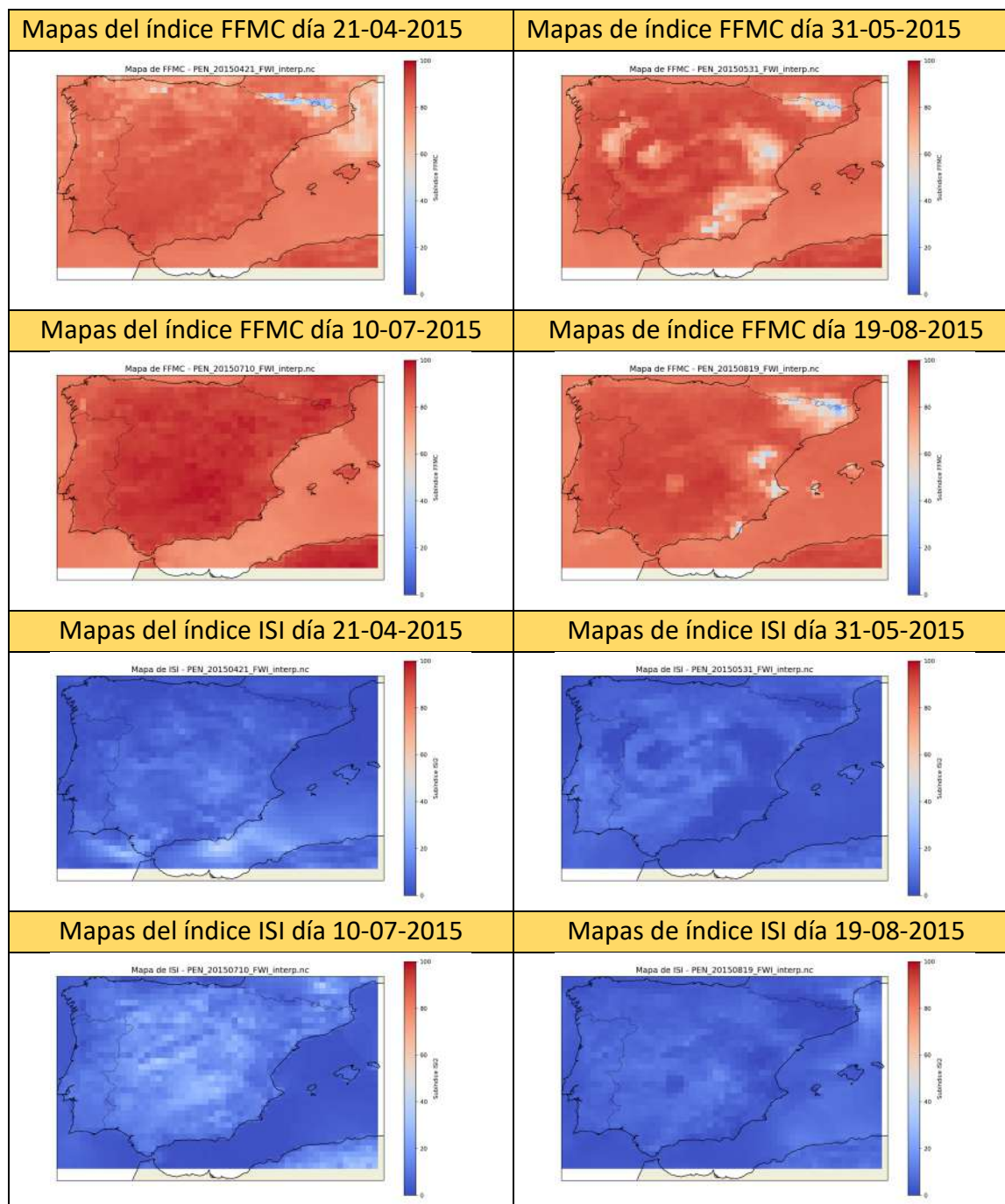


Figura 4. Mapas de los índices FFMC e ISI, días de primavera y verano 2015

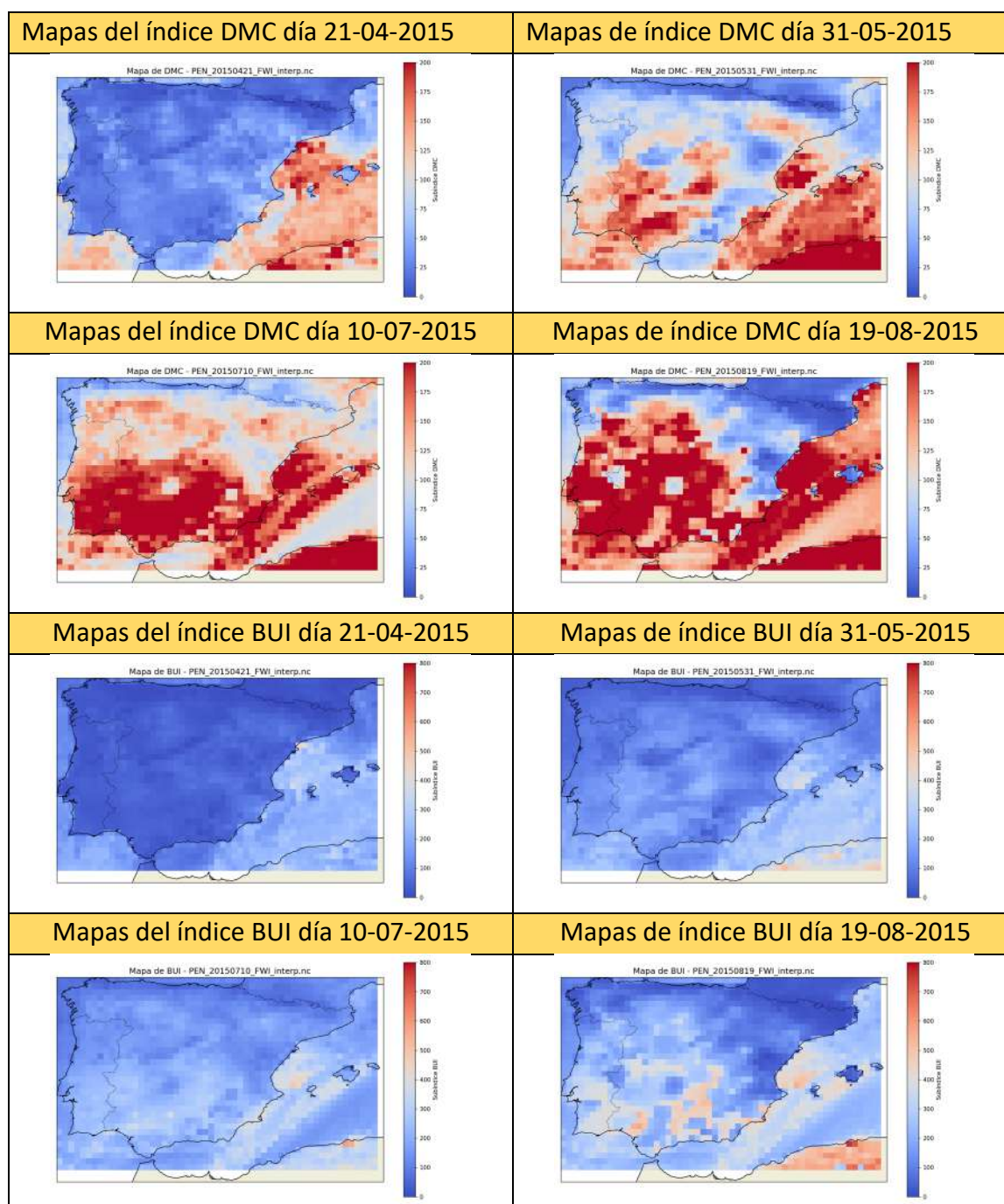


Figura 5. Mapas de los índices DMC y BUI, días de primavera y verano 2015

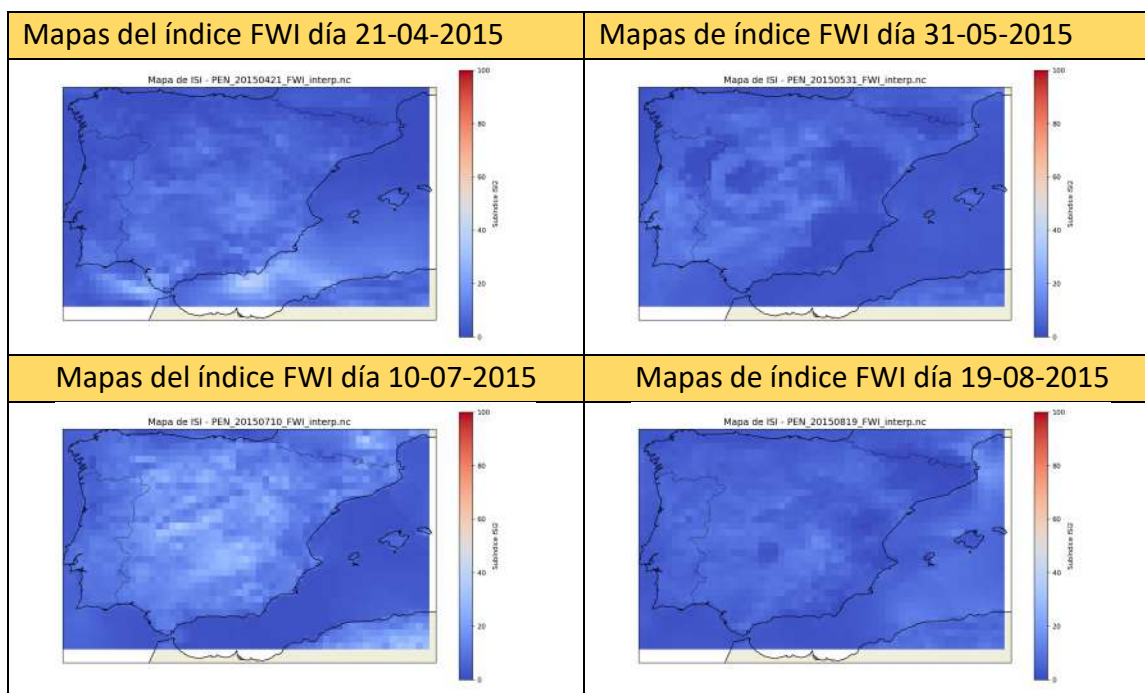


Figura 6. Mapas del índice FWI, días de primavera y verano 2015

1.2.- Datos de humedad del suelo obtenidos de satélite

Para la construcción del índice de peligro de incendio forestal propuesto en este trabajo de fin de máster se han utilizado datos de humedad del suelo obtenidos de satélite. Estos datos se han descargado de la Agencia Espacial Europea (ESA, s.f.), del proyecto de Humedad del Suelo dentro de la Iniciativa sobre el Cambio Climático que proporciona una serie temporal coherente y de largo plazo de datos de humedad del suelo obtenidos por satélite.

La relevancia de la humedad del suelo en el contexto ambiental y climático ha sido ampliamente documentada. Esta componente, la humedad del suelo, desempeña un papel clave en numerosos procesos hidrológicos y agrícolas, como la escorrentía superficial, el desarrollo de episodios de sequía y la dinámica del crecimiento vegetal. Además, influye de manera significativa en el sistema climático a través de mecanismos de retroalimentación atmosférica. Al ser una fuente principal de agua para la evapotranspiración en los ecosistemas terrestres, la humedad del suelo participa activamente en los balances hidrológico y energético del planeta. En reconocimiento a su importancia, fue designada como Variable Climática Esencial (VCE) en el año 2010.

En este marco, el proyecto Soil Moisture CCI se inserta dentro del programa de la Agencia Espacial Europea (ESA) dedicado a la vigilancia global de Variables Climáticas Esenciales: la Iniciativa sobre el Cambio Climático (Climate Change Initiative, CCI), lanzada también en 2010. Este programa produce un producto anual de humedad del suelo, que ha sido empleado extensamente en investigaciones hidrológicas y climáticas a nivel global, así como en contribuciones periódicas al informe "State of the Climate" publicado por la revista BAMS.

La iniciativa genera un registro anual de observaciones climáticas globales sobre la humedad del suelo, actualizado mediante algoritmos, con una cobertura temporal que se extiende por más de cuatro décadas. Este conjunto de datos incluye tres productos independientes basados en sensores activos, pasivos y una combinación de ambos. Hasta la fecha, se han publicado 14 versiones del producto, cada una incorporando nuevos sensores y extendiendo las series temporales.

El conjunto de datos integra observaciones provenientes de diversos sensores satelitales, como se detalla en las representaciones gráficas correspondientes a la versión ESA CCI SM v08.1. En esta versión, se incluyen los datos generados por los satélites ASCAT-A, ASCAT-B y ASCAT-C, elaborados en el marco del proyecto HSAF (*Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management*), disponibles a través de su portal oficial. Asimismo, los registros del satélite ERS son procesados por el Grupo de Teledetección por Microondas de la Universidad Técnica de Viena. Por su parte, los productos derivados de sensores pasivos se procesan empleando el algoritmo LPRMv7, desarrollado por la empresa Planet.

Son estos datos, provenientes del producto ESA CCI SM v08.1, los que se han empleado en este trabajo de fin de máster. La última versión, la 08.1 incluye datos hasta el 31 de diciembre de 2022. Por lo tanto, el periodo de los datos utilizados ha sido 2013-2022, diez años.

La Figura 7 muestran mapas de humedad del suelo correspondientes al producto ESA Soil Moisture CCI, para los días seleccionados por azar anteriormente.

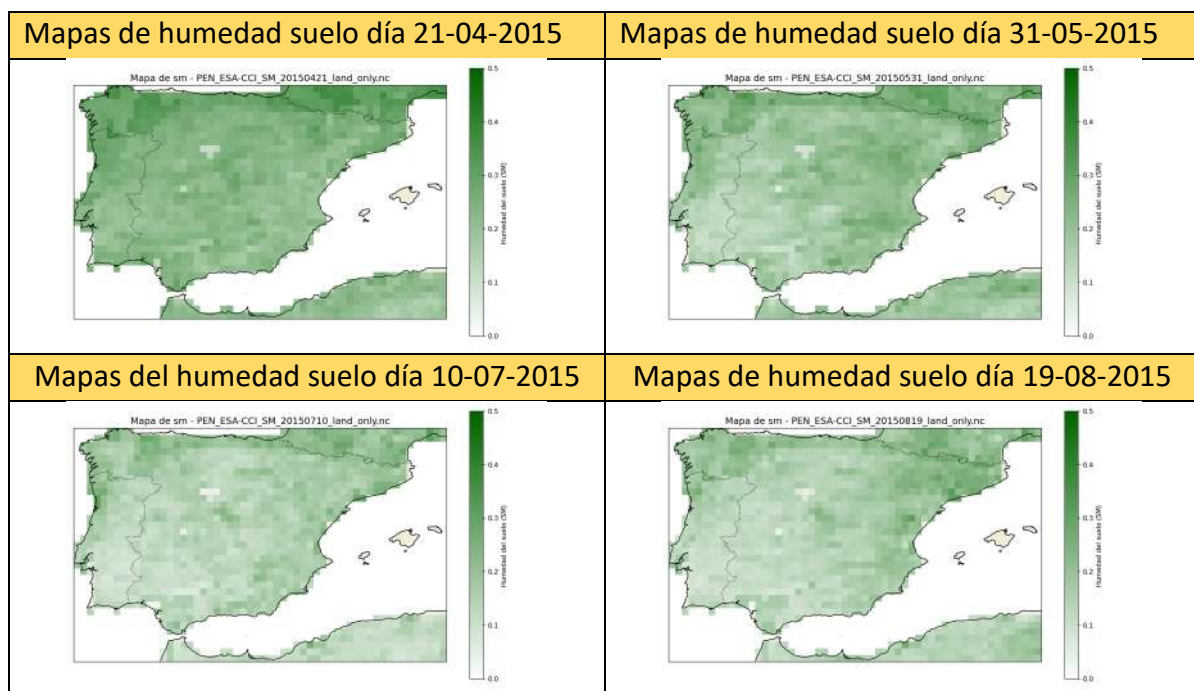


Figura 7. Mapas de humedad de suelo, datos ESA Soil Moisture CCI

A partir de estos datos se ha realizado un análisis para comprender bien su distribución y sus relaciones. Se han calculado una serie de estadísticos básicos a partir de las series de los datos de cada variable y se han obtenido los histogramas correspondientes a la distribución de frecuencias de cada una de las variables descritas: temperatura, viento, precipitación en las 24 horas anteriores, humedad del aire y humedad del suelo.

Las series de datos analizadas comprenden el periodo 2013-2022. Para obtenerlas se han tenido en cuenta todos los valores de cada variable en cuestión en todos los puntos de rejilla del dominio lo que significa más de 47000 valores para cada variable y cada día del periodo analizado.

A continuación se muestran los estadísticos e histogramas de las variables analizadas.

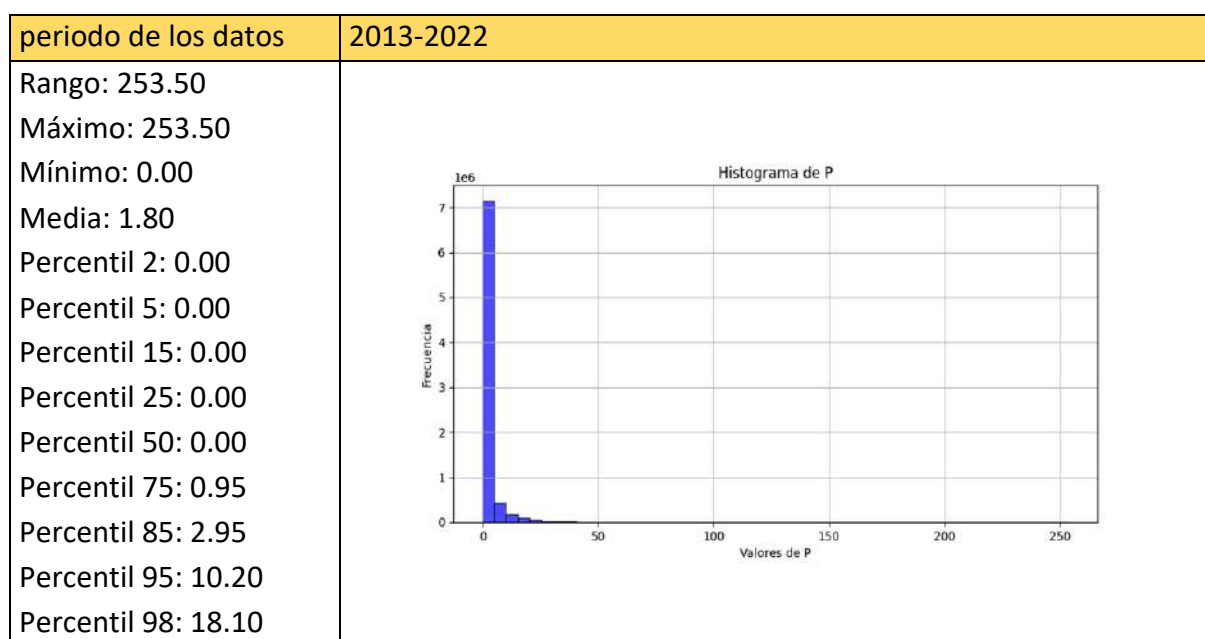


Figura 8. Estadísticos de los datos de Precipitación e histograma de frecuencias

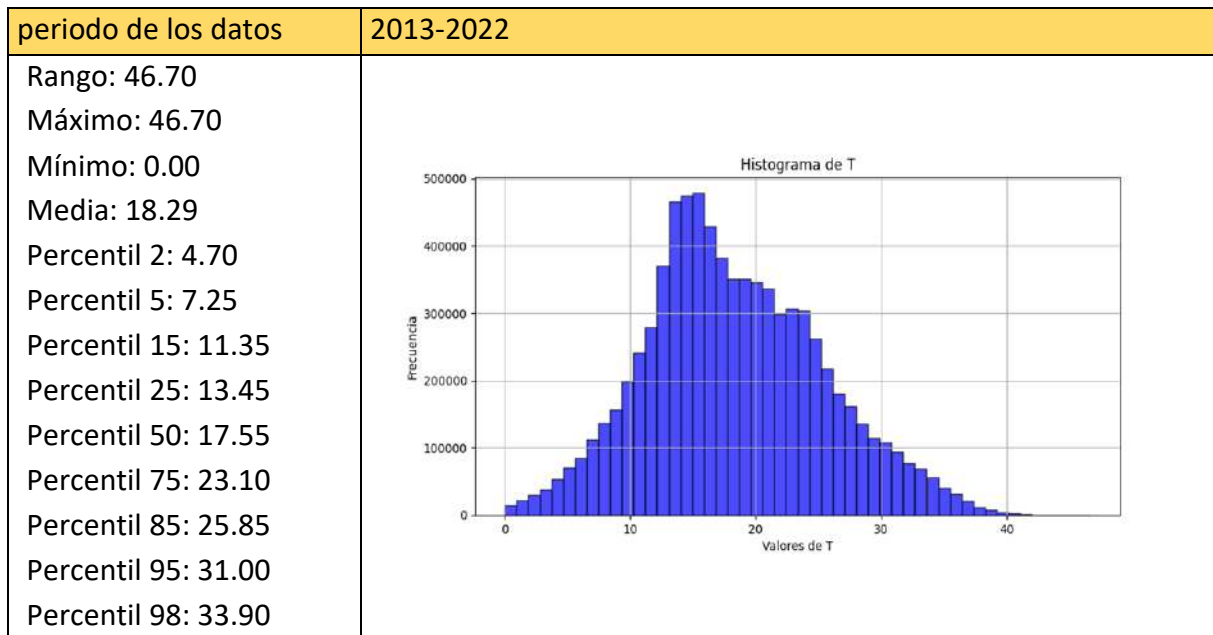


Figura 9. Estadísticos de los datos de Temperatura e histograma de frecuencias

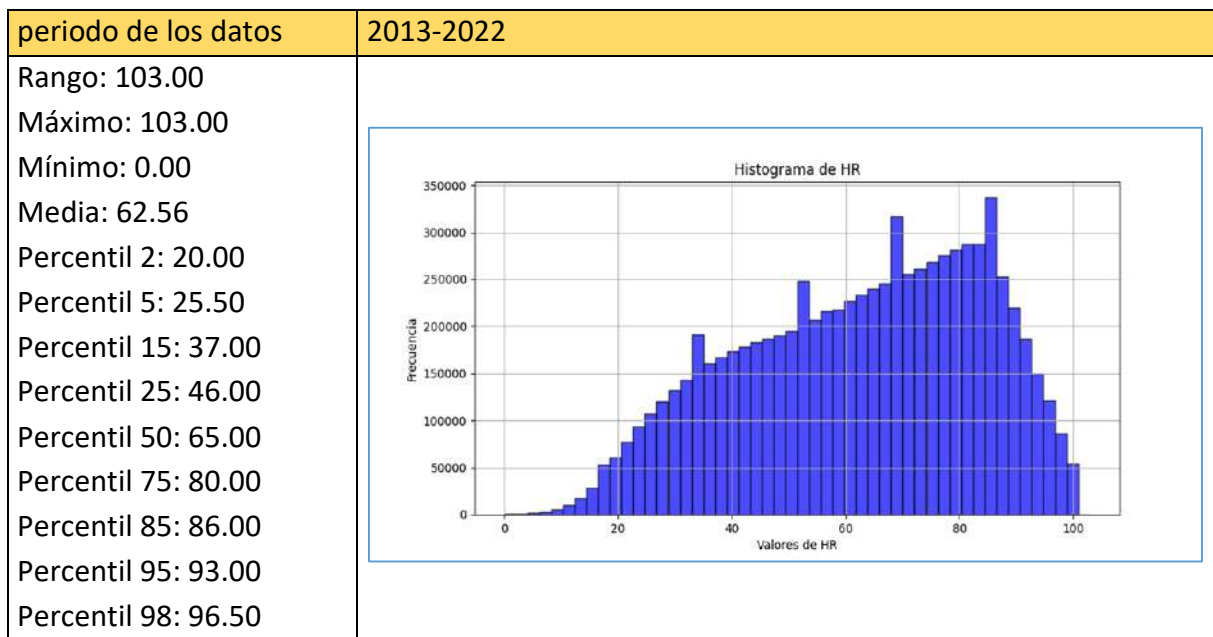


Figura 10. Estadísticos de los datos de humedad del aire e histograma de frecuencias

“Propuesta de un índice meteorológico enriquecido de peligro de incendio forestal en España y su evolución bajo escenarios de cambio climático”

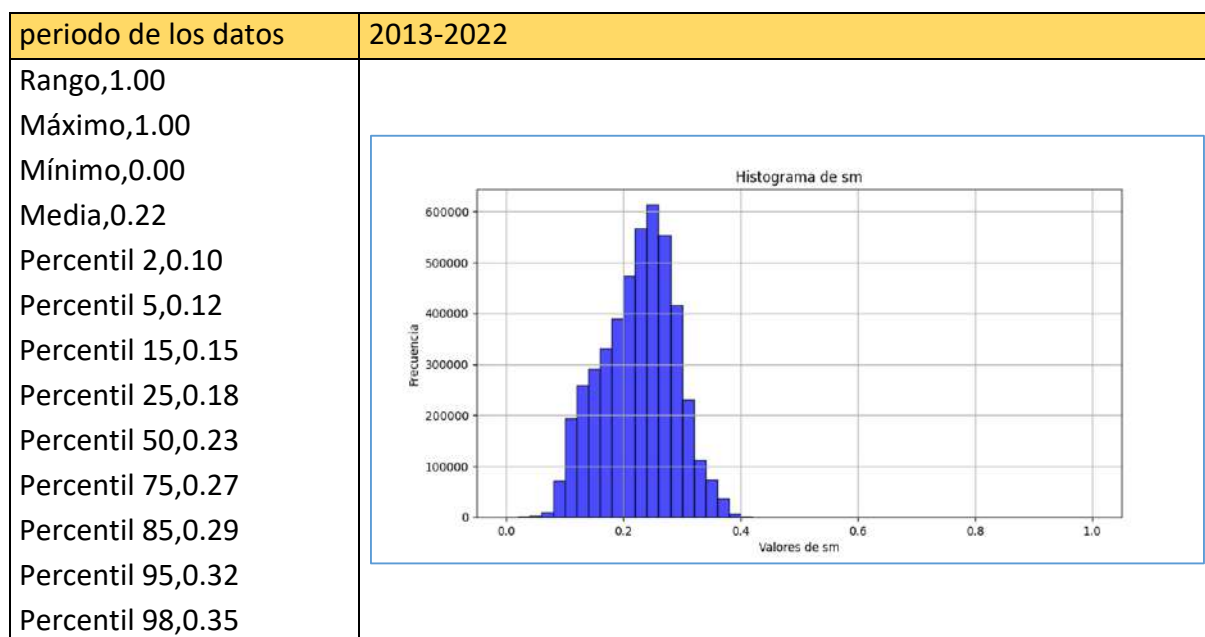


Figura 11. Estadísticos de humedad del suelo obtenida de ESA-CCI-SM e histograma

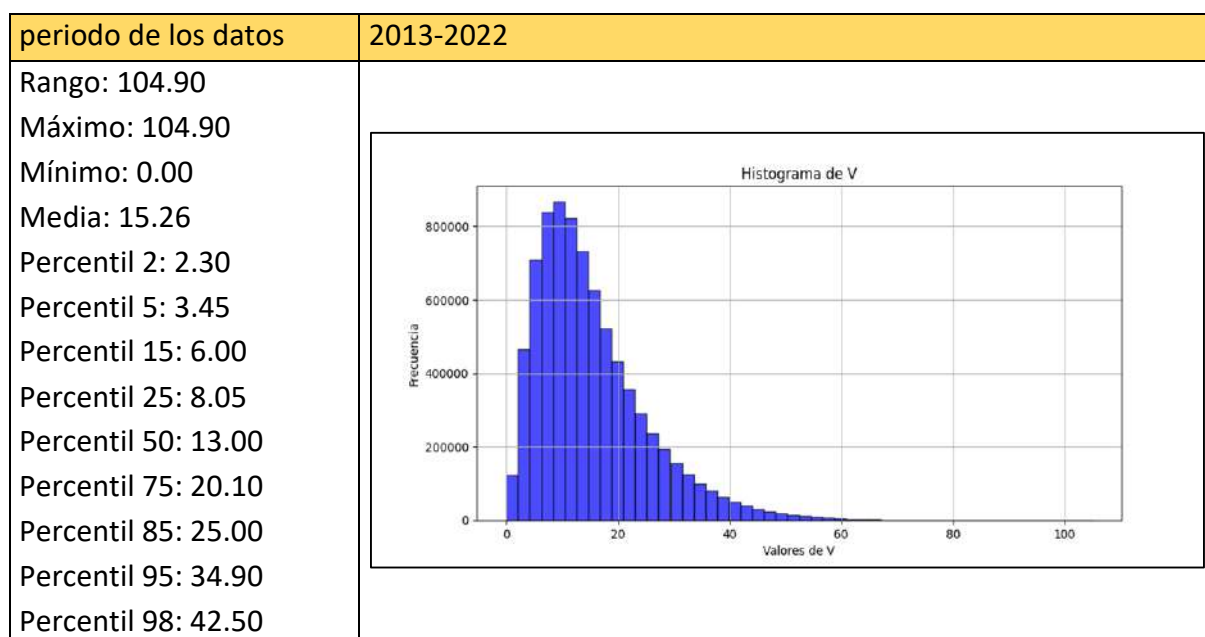


Figura 12. Estadísticos de los datos de Viento e histograma de frecuencias

1.3.- Datos procedentes de proyecciones climáticas regionalizadas

Para calcular los valores del nuevo índice de peligro de incendios forestal FWI2 proyectados en el periodo 2025 2040, se han obtenido, de la página web de AEMET (AEMET, s.f.-b), datos de proyecciones climáticas regionalizadas para el periodo citado de las variables siguientes:

- temperatura máxima diaria a 2 m de altura sobre el suelo (T2MAX)
- racha máxima diaria de viento a 10 m de altura sobre el suelo (W10MAX)
- humedad del suelo (SOILWUP) en la primera capa de 1 cm de espesor
- precipitación en las 24 horas anteriores (PRECIP)

Las proyecciones climáticas regionalizadas son predicciones del clima futuro que se obtienen mediante la desagregación de las salidas de modelos climáticos globales (MCG) a escalas espaciales más pequeñas, como países, cuencas hidrográficas o regiones, para representar en ellas con más detalle las condiciones climáticas que se darán en el futuro.

Dado que los modelos climáticos globales operan con resoluciones espaciales relativamente amplias, entre 100 y 300 km, su capacidad para captar detalles geográficos locales —como cadenas montañosas, litorales o patrones de uso del suelo— es limitada. Para mejorar esa representación, se aplican métodos que regionalizan las salidas de los modelos climáticos globales y permiten así analizar fenómenos a escalas más ajustadas a las necesidades locales o regionales.

Existen dos enfoques principales para regionalizar las proyecciones climáticas:

Regionalización dinámica

Consiste en aplicar modelos climáticos regionales (MCR) sobre una región específica, anidados dentro de un modelo global. Estos modelos simulan los procesos físicos a una resolución espacial más alta (generalmente entre 10 y 50 km), conservando la coherencia física con el modelo global. Es el método más robusto en términos físicos y permite una representación más realista de fenómenos locales.

Regionalización estadística

Se basa en establecer relaciones estadísticas entre las variables de gran escala (proporcionadas por el modelo global) y las variables locales observadas. Estas relaciones se aplican a las proyecciones futuras del modelo global para estimar cómo se comportarían las variables locales bajo escenarios de cambio climático. Requiere series históricas de calidad, pero es menos costosa computacionalmente.

En este trabajo se ha elegido la primera opción, la regionalización dinámica por dos razones principales: 1) se trata de un método más robusto en términos físicos y permite una representación más realista de fenómenos locales, y 2) la regionalización estadística se basa

en establecer relaciones estadísticas entre las variables de gran escala (proporcionadas por el modelo global) y las variables locales observadas, por lo que supone que estas relaciones no cambian. Esta suposición no es aceptable en condiciones de cambio climático como las consideradas en este trabajo, constituyendo una limitación importante.

Por todo ello, para obtener las variables necesarias se ha optado por la salida de una proyección regionalizada dinámica, realizada por el proyecto ENSEMBLES (ver referencia https://ensembles-eu.metoffice.gov.uk/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf) para el escenario de emisiones A1B (referencia https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Guia_IPCC/Guia_IPCC.pdf)

Dentro del proyecto ENSEMBLES existen varios modelos y se ha optado por la salida del modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3, que es comúnmente empleado para el análisis del clima en escalas espaciales intermedias y que está especialmente indicado para el área I de Europa. El modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3 combina dos componentes: el modelo regional RACMO2.1, desarrollado por el Instituto Meteorológico de los Países Bajos (KNMI), y el modelo global ECHAM5, desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania. El sufijo r3 indica que se ha utilizado la tercera realización de sus simulaciones.

Otra razón para la elección de este modelo es que proporciona las variables necesarias para calcular el nuevo índice propuesto en este trabajo o, al menos, otras directamente relacionadas con ellas.

Una vez escogido el modelo, se ha realizado la descarga de sus datos brutos desde la página web de AEMET:

https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=1

Como se ha dicho anteriormente, las variables meteorológicas necesarias para alimentar el modelo de estimación de peligro de incendio son: 1) la temperatura del aire T, 2) la humedad relativa del aire, 3) la velocidad del viento y 4) la precipitación registrada en las últimas 24 horas. Sin embargo, no todas ellas son las predichas por los modelos climáticos. El modelo elegido KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3 tiene entre sus salidas las variables siguientes:

- temperatura máxima diaria a 2 m (T2MAX), expresada en Kelvin
- racha máxima diaria de viento a 10 m (W10MAX), expresada en m/s
- humedad del suelo (SOILWUP) en la primera capa de 1 cm de espesor, expresada como un factor, sin unidades.
- precipitación en las 24 horas anteriores (PRECIP), expresada en mm

Para poder alimentar el cálculo del índice FWI2 ha habido que estimar la temperatura a las 12 UTC y el viento medio en los 10 minutos anteriores a las 12 UTC a partir de la temperatura

máxima diaria y de la racha máxima diaria de viento, respectivamente.

1.4.- Estimación de la temperatura a las 12 UTC a partir de la temperatura máxima.

Para la estimación de la temperatura diaria a las 12 UTC a partir de la temperatura máxima diaria, se han dado los siguientes pasos:

Se ha calculado el valor medio de la temperatura a las 12 horas UTC para cada día del periodo 2013-2022 y para todo el dominio geográfico de la Península Ibérica. Para este cálculo se han empleado las medidas de las estaciones meteorológicas de AEMET y los datos del análisis del modelo de predicción numérica del tiempo ECMWF, utilizados como datos de entrada para calcular el peligro de incendio forestal diario, del sistema Fire Weather Index (FWI)

De igual forma, se ha calculado el valor medio de la temperatura máxima diaria a 2 m (T2MAX) para cada día del periodo 2013-2022 y para todo el dominio geográfico de la Península Ibérica, a partir de la regionalización climática dinámica realizada con el modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3.

Se ha realizado la correlación lineal de Pearson entre ambas series mediante un script escrito en Python, obteniendo como resultados:

- Coeficiente de correlación: 0.867
- p-valor < 1E-16 (muy significativamente igual a cero)
- Regresión lineal: $y = a \cdot x + b$
- a (pendiente) = 0.7983 ± 0.0076 (p-valor: < 1E-16 significativamente = 0)
- b (intercepto) = 3.1563 ± 0.1503 (p-valor: < 1E-16 significativamente = 0)

El resultado gráfico de esta correlación se muestra en la Figura 13, página 23.

Estos resultados indican que es posible estimar la temperatura diaria a las 12 UTC a partir de la temperatura máxima diaria a través de la ecuación:

$$T = 0.80 * T2MAX + 3.16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

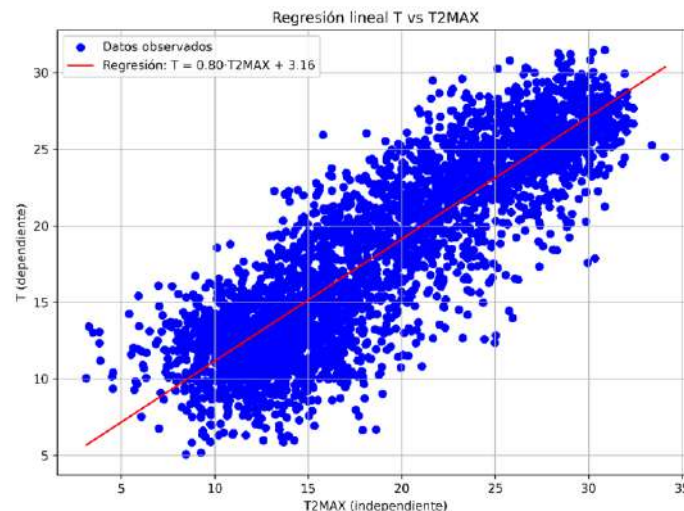


Figura 13.Regresión lineal entre T^a diaria a las 12 UTC y T^a máxima diaria.

1.5.- Estimación del viento medio a las 12 UTC a partir de la racha máxima

De forma similar se ha abordado la estimación del viento a las 12 horas UTC a partir de la racha máxima diaria. Así, se han construido las series de viento a las 12 UTC (V) y de racha máxima diaria (W10MAX) a partir de los mismos datos que en el caso de la temperatura y la temperatura máxima.

Mediante un script Python se ha realizado la correlación lineal de Pearson entre ambas series, obteniendo en este caso resultados no aceptables:

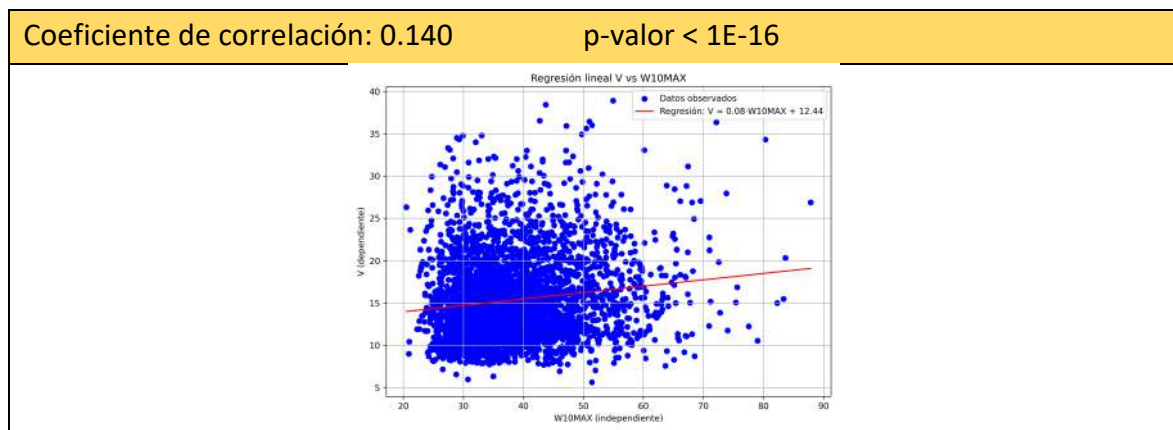


Figura 14.Resultados de la correlación entre (V) viento a las 12 UTC y de racha máxima diaria (W10MAX)

Se ensayaron otros ajustes como la regresión RANSAC, Fischler y Bolles (1981), RANSAC (Scikit-learn, s.f.), y un ajuste polinómico cuadrático, obteniendo también resultados no satisfactorios.

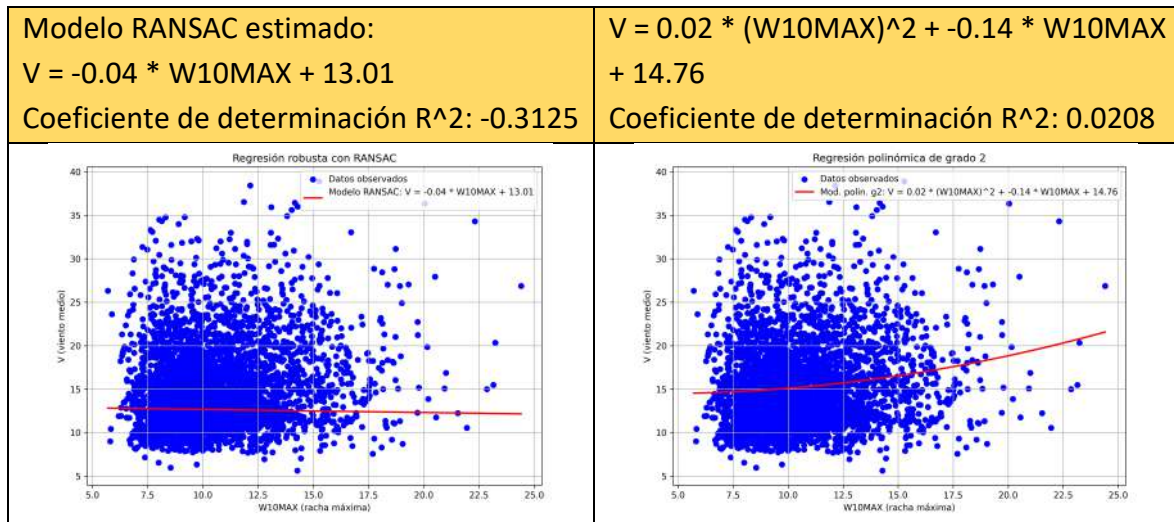


Figura 15. Resultados de las regresiones RANSAC y polinómica 2º grado, entre (V) viento a las 12 UTC y de racha máxima diaria (W10MAX)

También se analizó la propuesta de la OMM-WMO (Organización Meteorológica Mundial), que discute sobre la relación entre la "velocidad media del viento a 10 metros" y la racha máxima diaria en su documento técnico, (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2021–2023), en el Capítulo 7 sobre observaciones del viento. Según dicha publicación, el viento medio es aproximadamente entre un 40% y un 60% de la racha máxima diaria, dependiendo fundamentalmente del terreno y de las condiciones meteorológicas. Así, en terreno abierto, las relaciones se acercan a 0,6 (menor turbulencia), mientras que en zonas urbanas o terrenos accidentados pueden alcanzar relaciones cercanas a 0,4 (mayor turbulencia). Esta relación se deriva del factor de racha (velocidad máxima de la ráfaga dividida entre la velocidad media del viento), que generalmente se sitúa entre 1,5 y 2,5 en la mayoría de los entornos.

También hay que tener en cuenta la diferencia en el promedio temporal de la observación. Mientras que la velocidad media del viento corresponde al promedio de 10 minutos, la ráfaga máxima es un pico de corta duración (p. ej., 3 segundos).

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente, se propone una relación media:

$$V \approx (1/1.6) * V10MAX \approx 0.6 * V10MAX$$

Se comprobó si esta relación media entre valores de viento a las 12 UTC (V) y de racha máxima diaria (W10MAX), existía en nuestro caso, realizando una regresión con paso por el origen de coordenadas, encontrándose en este caso resultados algo más satisfactorios:

- Modelo forzado: $V = 0.3853 * V10MAX$
- R^2 : -0.3263
- RMSE: 5.5765
- MAE: 4.1235

El resultado gráfico se muestra en la Figura 16. Resultado de la regresión lineal entre el viento medio diario y la racha máxima de viento media diaria para el periodo 2013-2024.

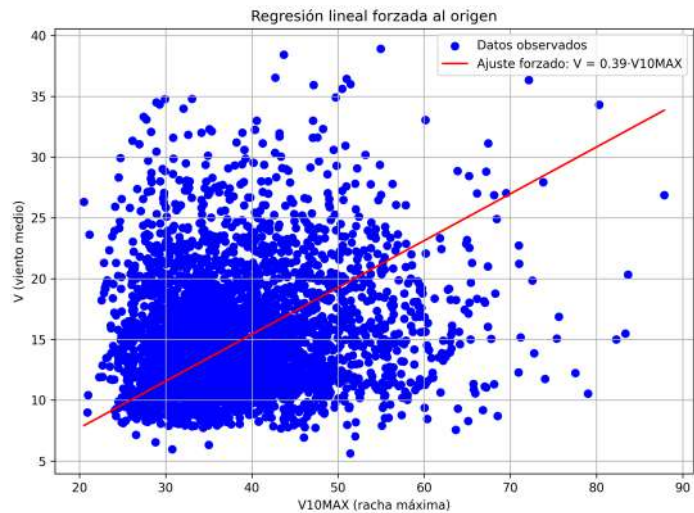


Figura 16. Resultado de la regresión lineal entre el viento medio diario y la racha máxima de viento media diaria para el periodo 2013-2024

A la vista de estos resultados, siguiendo las recomendaciones de la meteorología operativa y la OMM, se ha estimado el viento a las 12 horas UTC a partir de la racha máxima diaria a través de la ecuación:

$$T = 0.80 * T2MAX + 3.16$$

Finalmente la distribución y los estadísticos básicos descriptivos de estas variables se muestran en la Figura 17 que se presenta a continuación.

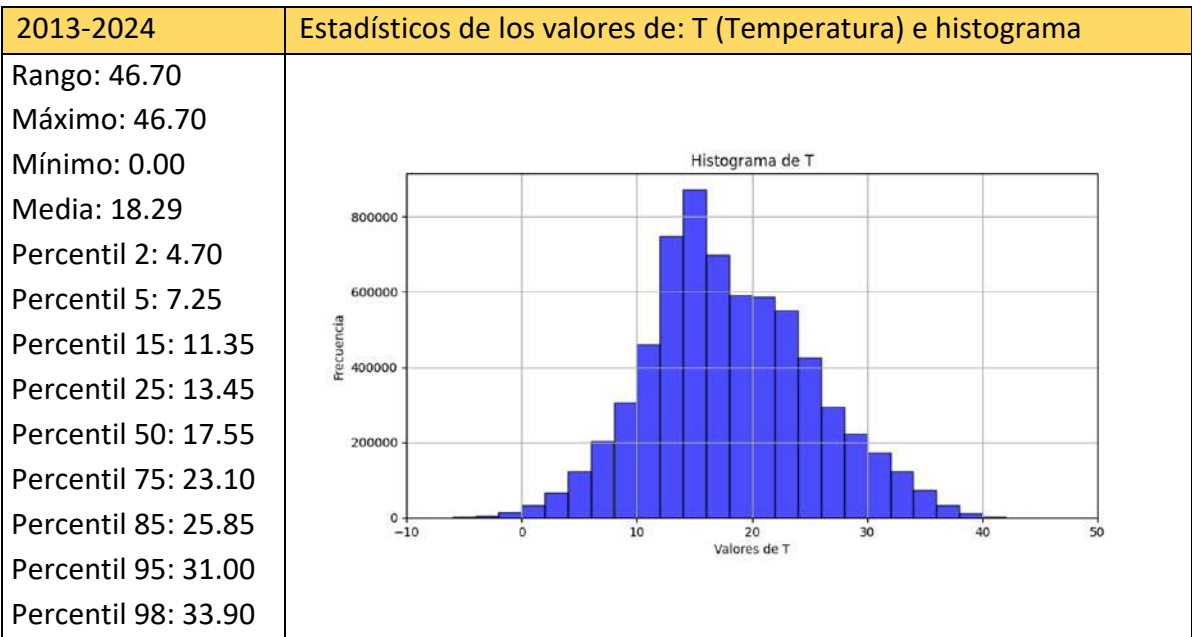


Figura 17. Estadísticos de los valores de: T (Temperatura) e histograma

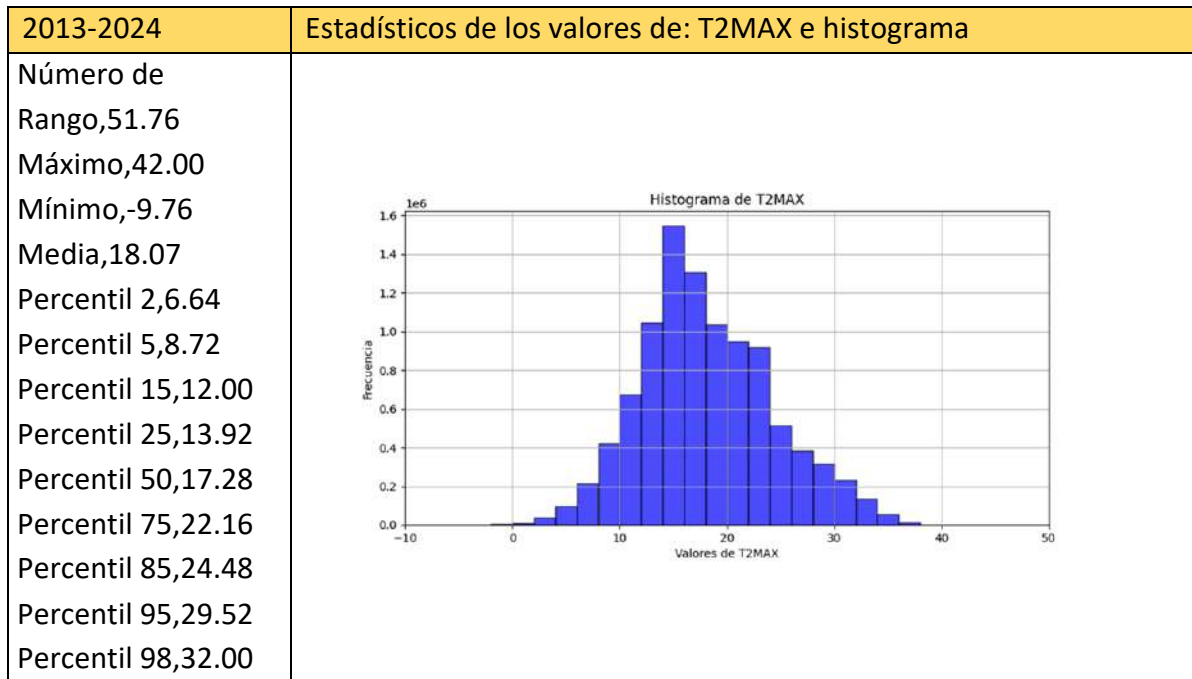


Figura 18. Estadísticos de los valores de: T2MAX e histograma

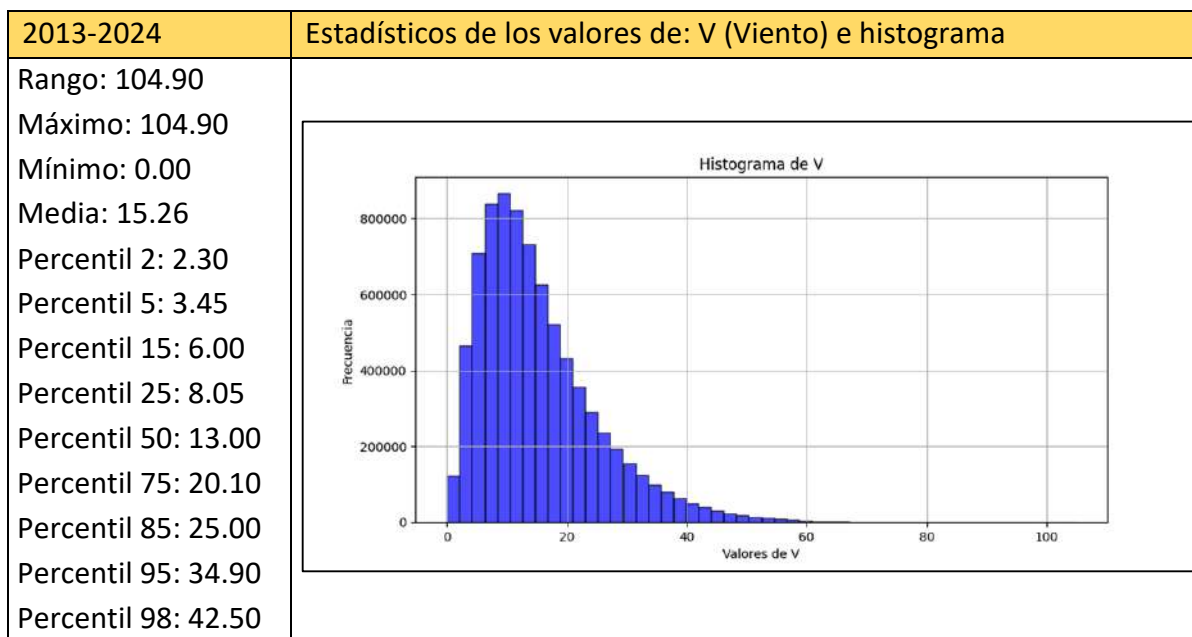


Figura 19. Estadísticos de los valores de: V (Viento) e histograma

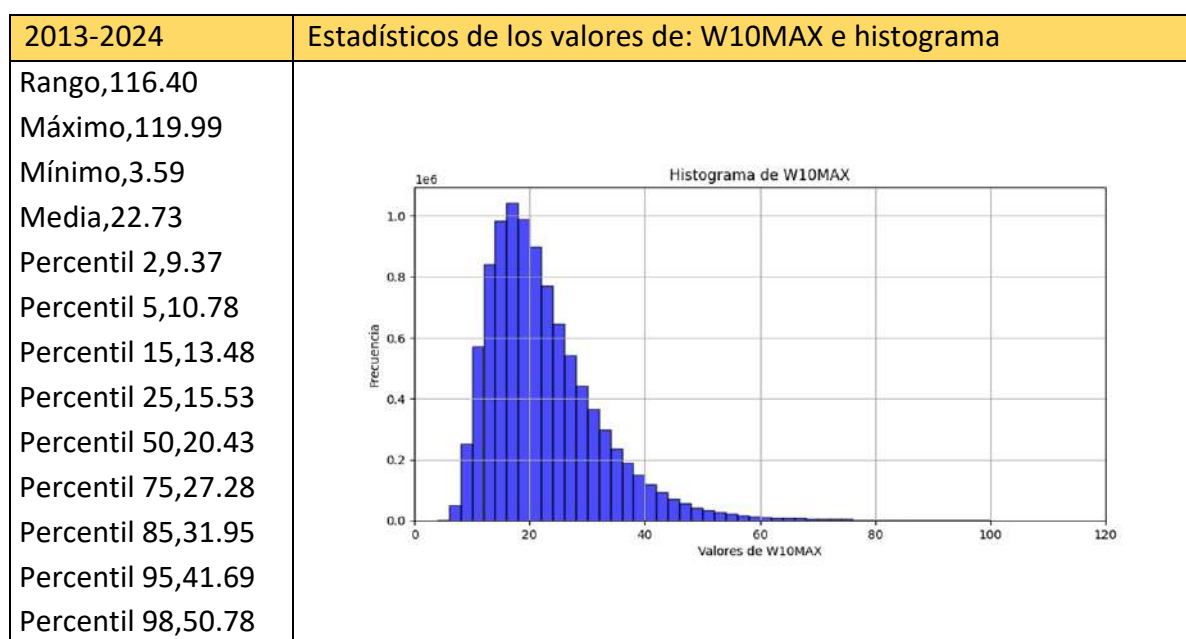


Figura 20. Estadísticos de los valores de: W10MAX e histograma

1.6.- Estimación de la capacidad máxima de humedad del suelo (DSM max)

La capacidad máxima de humedad del suelo describe la máxima cantidad de agua que el suelo es capaz de retener. Esta magnitud viene determinada principalmente por el tipo de suelo y ha sido considerada constante a lo largo de todo el periodo de estudio, tanto durante el periodo pasado reciente 2011-2024 como durante las previsiones futuras 2025-2040.

La propuesta de asignar valores diferentes de capacidad máxima de humedad del suelo en función del tipo de suelo es una de las principales contribuciones de este trabajo fin de máster, siendo una mejora evidente al índice FWI, el cual simplifica todos los suelos asignándoles la misma capacidad máxima.

En el modelo de índice propuesto por este trabajo se consideran únicamente dos capas: una superficial, consistente en los primeros centímetros, y otra correspondiente a la parte más profunda. Como la capacidad máxima de humedad del suelo se refiere fundamentalmente a esta última, se ha denominado por las siglas DSM, correspondientes a su nombre en inglés “Deep Soil Moisture”, con el subíndice “max” relativo a que se trata de la cantidad máxima que el suelo puede retener. Esta variable representa la capacidad de almacenamiento de agua en la capa profunda del suelo, que en el contexto de riesgo de incendios suele corresponder a la zona no afectada por la evaporación rápida (típicamente por debajo de los 30 cm).

Para la estimación de la capacidad máxima de humedad del suelo se ha acudido a la base de datos SoilGrids, base de datos con información global sobre suelos en rejilla, descrita en (Hengl et al., 2017), que es una base de datos global con validación robusta en múltiples escalas (Arrouays et al., 2014; Poggio et al., 2021), la cual proporciona datos globales sobre la

composición del suelo a diferentes profundidades. La capacidad del suelo para retener agua está determinada por su contenido en arena, limo y arcilla; así, este trabajo fin de máster ha empleado la composición porcentual de estos componentes para estimar la variable DSM_max.

Dado que los datos proporcionados por SoilGrids están disponibles para las capas 30-60 cm y 6-100 cm, en este trabajo se ha considerado que la profundidad relevante para la DSM_max sería 30-100 cm, que es la profundidad donde el suelo retiene agua a largo plazo.

Para el cálculo se han descargado de la base de datos SoilGrids las capas correspondientes a la fracción (en g/kg) de arena, limo y arcilla en las capas 30-60 cm y 60-100 cm para un área correspondiente a la Península Ibérica a una resolución espacial de 1 km en la proyección Homolosine en la que se encuentra esta base de datos. La base de datos SoilGrids ofrece capas de información a resoluciones de 5 km, 1 km y 250 m. En este trabajo se ha escogido la resolución de 1 km teniendo en cuenta la posterior reproyección a una rejilla de resolución 5 km en otra proyección. A continuación se han proyectado a la proyección LON/LAT empleada en este trabajo, se ha realizado un cambio de unidades a porcentajes (%) y se han promediado ambas capas ponderando los datos por la profundidad de cada capa (30 cm y 40 cm) obteniendo los porcentajes para la capa completa 30-100 cm según la siguiente fórmula:

$$Arena_{promedio} = ((Arena_{30-60} * 30) + (Arena_{60-100} * 40)) / 70$$

Seguidamente, se ha clasificado cada pixel siguiendo el triángulo de texturas empleado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU (Gee and Bauder, 1986; USDA, 1984, 2010; Buol et al., 2011), que clasifica los suelos en cinco tipos: arenoso, franco-arenoso, franco, franco-arcilloso y arcilloso, en función de los porcentajes de arena y arcilla de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de suelo, criterio de clasificación, y rango y valor típico de capacidad máxima de agua para cada tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Arena (%)	Arcilla (%)	Porosidad
Arenoso	>70	<15	Alta porosidad (≈45%), baja retención.
Franco-arenoso	50–70	15–25	Porosidad moderada (≈40%).
Franco	30–50	25–35	Equilibrio entre retención y drenaje (porosidad ≈35%).
Franco-arcilloso	20–30	35–45	Mayor retención, menor capacidad de almacenamiento (porosidad ≈30%).
Arcilloso	<20	>45	Baja porosidad (≈25%), alta retención pero poco espacio para almacenar.

Por último, se ha estimado la capacidad máxima DSM_max de cada pixel asignándole el valor correspondiente según la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de suelo, rango y valor típico de la capacidad máxima de agua para cada tipo de suelo

Tipo de Suelo	DSM_max rango (mm)	DSM_max típico (mm)
Arenoso	250–350	300
Franco-arenoso	200–250	225
Franco	150–200	175
Franco-arcilloso	100–150	125
Arcilloso	50–100	75

Todo el cálculo relativo a la descarga de capas de información de SoilGrids, reproyección y cálculo ha sido realizado mediante las herramientas GDAL.

1.7.-Definición de la rejilla estándar de trabajo.

Todos los cálculos deben realizarse sobre una rejilla común de trabajo. Esto ha requerido la adecuación de los datos a la misma rejilla y proyección. Hay que hacer notar que este trabajo ha requerido un gran esfuerzo, al manejar datos provenientes de muy diversas fuentes y formatos.

Los datos descritos provienen de 4 fuentes distintas:

- estaciones automáticas y salida del modelo del índice de peligro de AEMET
- proyecciones climáticas regionalizadas del modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3
- datos de satélite ESA-CCI-Combined de la humedad de la capa superficial del suelo
- información de composición del suelo provenientes de la base de datos SoilGrids

Los datos originales tienen cada uno de ellos un formato y unas coordenadas y proyección geográfica diferente, así como una ventana de aplicación sobre el dominio espacial de la península ibérica distinta. Todas estas características han tenido que modificarse hasta unas características comunes a todos ellos, para que pudieran introducirse en las ecuaciones del cálculo.

Esto ha hecho que hubiese que descartar el dominio espacial de las Islas Canarias, propuesto inicialmente, pues sus datos no estaban disponibles en las proyecciones climáticas regionalizadas.

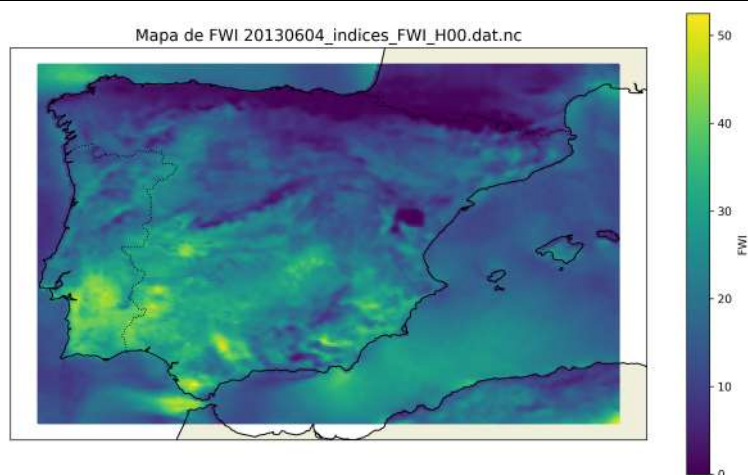
Toda esta preparación de los datos se ha efectuado mediante la elaboración de numerosos programas en Python orientados al tratamiento de estos datos y a la elaboración de una rejilla común con lo que se ha conseguido operar y visualizar estos datos.

Las distintas ventanas o dominios espaciales originales de los datos se han reducido a una

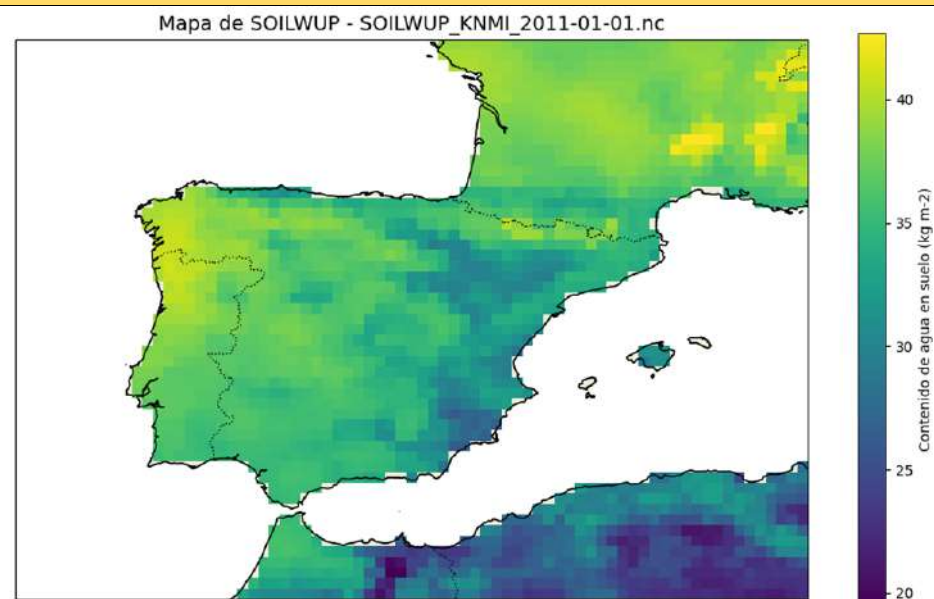
ventana mínima común, que viene descrita por los parámetros siguientes, y que se muestra al final de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

- estructura y las coordenadas del dataset que define la ventana espacial común:
- Tamaño del vector (<xarray.Dataset>): 236 kB
- Dimensiones: (latitud: 35, longitud: 56)
- Coordenadas:
- latitud: 43.62 43.38 43.12 42.88 ... 35.62 35.38 35.12
- longitud: -9.375 -9.125 -8.875 ... 3.875 4.125 4.375

Mapa de la rejilla-1, generada con los datos de las estaciones automáticas y de la salida del modelo, utilizados en la generación del índice de peligro de incendio de AEMET

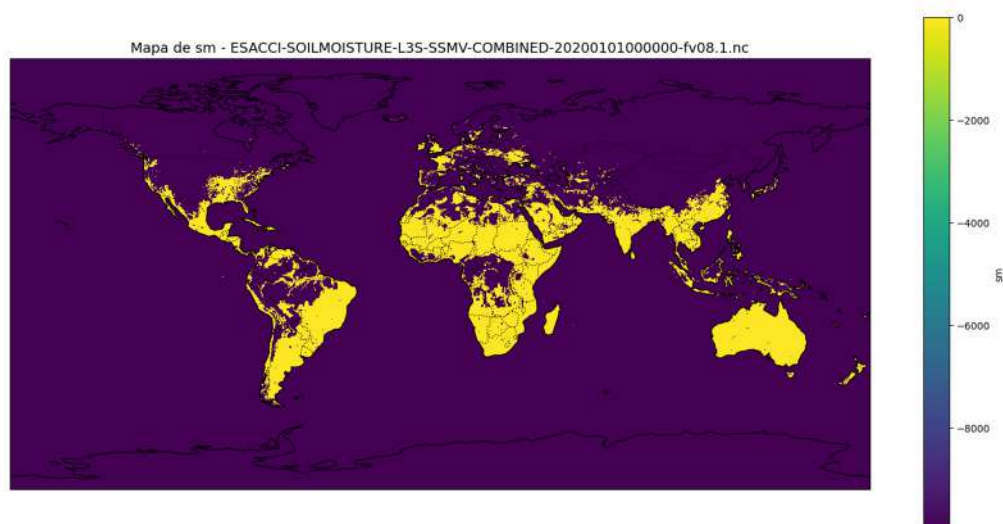


Mapa de la rejilla-2, generada con los datos provenientes de las proyecciones climáticas regionalizadas del modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3

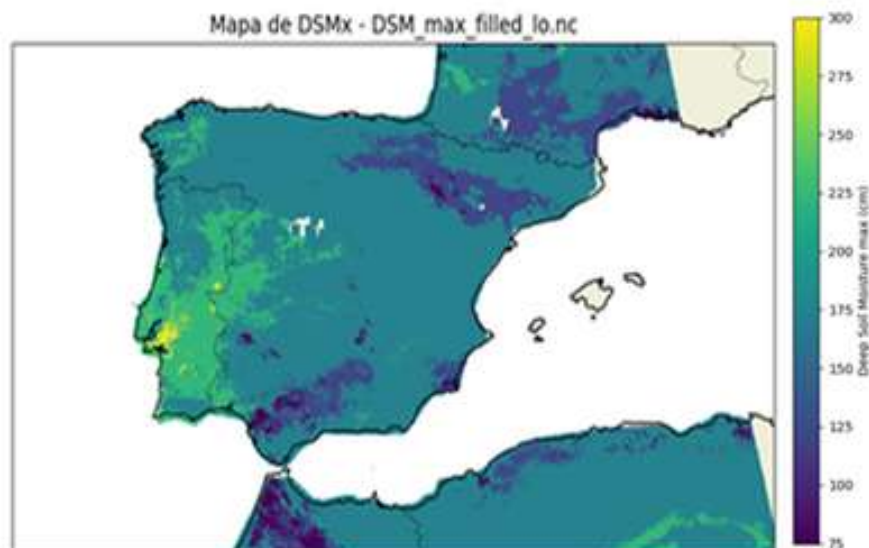


Mapa de la rejilla-3, generada con los datos provenientes de los datos de la humedad del

suelo obtenidos de satélite ESA-CCI-Combined. Fecha 01-enero-2020



Mapa de la rejilla-4, generada con los datos de humedad suelo provenientes de SoilGrids



Mapa de la rejilla final, mínima común de todas las anteriores.

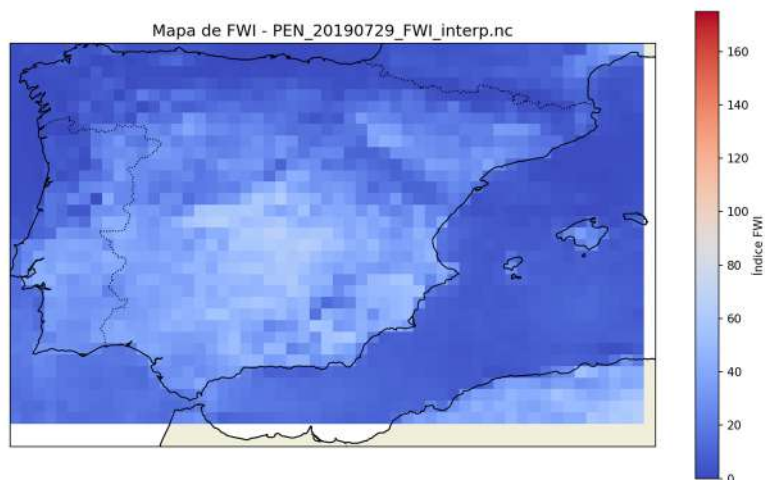


Figura 21. Rejillas procedentes de cada tipo de dato utilizado y rejilla final.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la propuesta de formulación para la obtención de un nuevo índice meteorológico de peligro de incendios, denominado FWI2 en este trabajo fin de máster.

Esta propuesta se resume en un cambio en el cálculo y en el concepto del primer escalón de subíndices del sistema canadiense. Según este sistema, la humedad del combustible se representa por tres índices:

- el código de humedad de los combustibles finos (*Fine Fuel Moisture Code* FFMC),
- el código de humedad del mantillo (*Duff Moisture Code* DMC) y
- el código de sequía (*Drought Code* DC),

En la nueva propuesta, estos índices se han sustituido por dos nuevos que reflejan la humedad de estos combustibles: FFMC2 (*Fine Fuel Moisture Code*) y DSM2 (*Deep Soil Moisture*).

En la Figura 22, se muestra un esquema propuesto para cálculo del índice FWI2, partiendo de las variables meteorológicas, viento, precipitación, temperatura e incluyendo la humedad del suelo (sm), pasando por los índices de humedad en el primer paso (FFMC2 y DMC2), por los índices de comportamiento (ISI2 y BUI2), para llegar al índice final (FWI2).

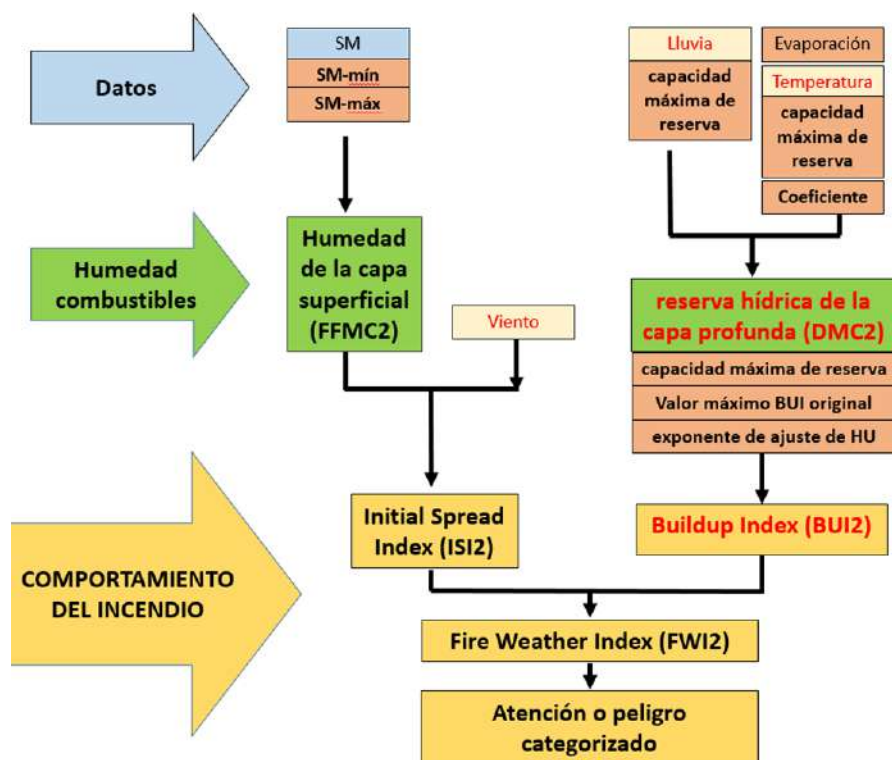


Figura 22. Esquema propuesto para el cálculo del índice FWI2

En el nuevo índice se sustituye el modelo de dos capas del índice FWI y sus índices asociados DMC y DC, por un modelo “cubeta” de una sola capa y el nuevo índice DSM. Este tipo de representación conceptual del suelo es muy común en el campo de la Hidrología y la Meteorología (Lindström et al., 1997; Seibert, 1999) y ha demostrado su utilidad también en investigaciones sobre cambio climático (Teutschbein and Seibert, 2012), y consiste en considerar al suelo como un reservorio de agua con capacidad limitada. Según este modelo la reserva del suelo aumenta con la precipitación, disminuye con los procesos de evaporación y, cuando se satura (se alcanza la capacidad máxima) el exceso se pierde por escorrentía.

Este nuevo modelo de representación del suelo requiere la reformulación del índice de acumulación de combustible (BUI2), tal como se describe a continuación en los siguientes epígrafes. El resto de índices: el índice de propagación inicial (ISI), el índice final FWI mantienen su formulación original.

Los nuevos índices que se proponen para representar la humedad de los combustibles son:

2.1.- El índice FPMC2

Este índice (FPMC2) representa la humedad de la capa de suelo más superficial. Se obtiene directamente la humedad del suelo, derivada del producto satelital ESA Soil Moisture CCI (SM). Se mide en m³ de agua por cada m³ de suelo, es decir es un factor adimensional), y su escala se ha obtenido ajustando su escala original (de 0.0 a 0.5), para que coincida con el rango del FPMC original (0–100).

La fórmula propuesta para el cálculo de este nuevo índice FPMC2 es:

$$FPMC2 = 100 * (1 - \frac{(SM - SMmin)}{(SMmax - SMmin)})$$

Donde:

- SM: es el valor diario de la humedad del suelo medida por satélite
- SMmin y SMmax: son los valores mínimos y máximos de humedad del suelo observados en la región de estudio. Estos valores se han tomado como los percentiles 2% y 98% de toda la serie de datos SM, calculada para todo el periodo 2013-2024 y para todos los puntos del dominio. (Se toman los percentiles 5 y 95 para evitar datos extremos espurios).

La fórmula toma el valor diario de humedad del producto satelital, SM, y lo normaliza entre 0 y 1 al restar el mínimo y dividir entre el rango de variabilidad de SM.

Al igual que el código FPMC original, invierte la relación con la humedad, de forma que a una mayor humedad le corresponde un menor peligro, y también escala los valores SM al rango original del índice FPMC.

2.2.- El índice DSM2

Este índice representa la humedad de la capa de suelo profunda, y se ha denominado DSM2 por sus siglas en inglés (Deep Soil Moisture). Se ha decidido conscientemente añadir un “2” al nombre para identificarlo como uno de los subíndices del índice propuesto FWI2, si bien, en este caso, no existe una versión original de este índice (un DSM previo), al constituir una propuesta completamente novedosa de la descripción de la humedad de la capa más profunda.

El índice DSM2 modela la reserva hídrica profunda, teniendo en cuenta, por un lado la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo denominada DSM_{max} , por otro tiene en cuenta la aportación de la precipitación a esta reserva hídrica profunda del suelo, y finalmente las pérdidas de agua por evaporación.

La ecuación propuesta para el cálculo del valor diario de DSM2, es el siguiente:

$$DSM2(t) = DSM2(t - 1) + \Delta P - \Delta E$$

Donde:

- $DSM2(t)$ se refiere a la humedad de la capa de suelo profunda para el día en cuestión.
- $DSM2(t-1)$ se refiere a la humedad de la capa de suelo profunda para el día anterior.
- ΔP es la incorporación de humedad debida a la precipitación.
- ΔE es la pérdida de humedad debida a la evaporación.

La incorporación de humedad debida a la precipitación (ΔP) se calcula como sigue:

$$\Delta P = P * (1 - DSM2(t - 1) / DSM_{max})$$

Donde:

- P es la precipitación diaria (en mm).
- DSM_{max} es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo

La lógica que subyace tras la fórmula es que la retención de agua por el suelo va disminuyendo a medida que el suelo se acerca a su capacidad máxima (DSM_{max}).

La incorporación de humedad debida a la pérdida por evaporación (ΔE) se calcula como sigue:

$$\Delta E = k * T_{max} * (DSM2(t - 1) / DSM_{max})$$

Donde:

- T_{max} : es la temperatura máxima diaria (°C)
- k : Coeficiente de evaporación que se puede calibrar regionalmente (para este trabajo fin de máster se ha tomado igual a 0.2)

La lógica que subyace tras la fórmula es que la evaporación aumenta con la temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo.

Este cálculo de DSM2 tiene las siguientes restricciones:

- DSM2 no puede superar DSM_{max} ni ser negativo.
- DSM_{max} : Define la capacidad máxima del suelo (p.ej., 75 mm para suelos arcillosos y 300 mm para arenosos).

2.3.- El índice ISI2

Para el cálculo del índice ISI2, que representa la velocidad de propagación únicamente sin la influencia de cantidades variables de combustible, se ha utilizado la misma fórmula original que tiene el índice de propagación inicial (ISI), y que es una combinación del viento y el índice FPMC (Van Wagner, C. E., 1987).

$$mo = 147.2 * (101 - FPMC2) / (59.5 + FPMC2)$$

$$ff = 91.9 * np.exp(-0.1386 * mo) * \left(1 + \frac{mo ** 5.31}{49300000}\right)$$

$$ISI2 = 0.208 * ff * np.exp(0.05039 * V)$$

Donde:

- mo y ff son variables intermedias
- FPMC2 es el índice de la humedad de la capa de suelo más superficial
- V es el viento, expresado en km/h

El rango, o escala, del índice ISI2 se mantiene igual a la del índice original ISI (aproximadamente entre 0 y 56) al utilizar FPMC2 la misma escala que la del índice original FPMC (0 – 100).

2.4. El índice BUI2

El cálculo del índice BUI2 se realiza teniendo en cuenta que, como el índice DSM2 representa la reserva hídrica de la capa profunda (y un mayor valor de DSM2 se corresponde con una mayor humedad y, por tanto un menor peligro), el valor de BUI2 debe disminuir al aumentar el valor del DSM2. Para lograrlo, se propone una fórmula inversamente proporcional al DSM2, y escalada al rango del BUI original (0–800) (Van Wagner, C. E., 1987).

La ecuación propuesta para el cálculo del valor diario de BUI2, es la siguiente:

$$BUI2 = BUI_{max} * \left(1 - \frac{DSM2}{DSM_{max}}\right)^\alpha$$

Donde:

- BUI_{max} : Representa el valor máximo teórico del BUI original (800).
- DSM_{max} : Capacidad máxima de reserva de agua definida para la capa profunda del suelo, definida por el tipo de suelo, de 750-300 mm).
- α : Exponente de ajuste no lineal ($\alpha = 1.5$ por defecto, es calibrable). Este exponente refleja que pequeños incrementos de humedad en suelos secos reducen el peligro más drásticamente, mientras que en suelos ya húmedos, el efecto es menor.

2.5 El índice FWI2

Para el cálculo del índice FWI2, que representa la intensidad de la propagación del incendio como tasa de producción de energía por unidad de longitud del frente de fuego, se ha utilizado la misma fórmula original que tiene el índice de propagación inicial (FWI), y que es una combinación de los índices ISI y BUI. (Van Wagner, C. E., 1987).

Si el valor del índice BUI2 es menor o igual a 80:

$$FWI2 = e^{(0.0817 * (ISI2 + 0.0472 * BUI2))}$$

Si es mayor que 80:

$$FWI2 = e^{(0.0817 * (ISI2 + 3.776) + 0.1 * (BUI2 - 80))}$$

Las principales ventajas o mejoras que se muestran tras esta formulación son las siguientes:

1. El índice FFM2 se calcula directamente a partir de medidas satelitales, integrando así información nueva no considerada en el índice FWI original. A esto hay que añadir las ventajas que supone la observación satelital sobre el resto de medidas (homogeneidad, cobertura, resolución temporal, mantenimiento, etc.)
2. El índice DSM2 introduce un modelo físico realista con capacidad máxima ajustable al tipo de suelo.
3. Todos los subíndices propuestos mantienen su escala y contribución relativa al índice final, FWI2, igual que en el caso original.
4. Los coeficientes (k , α y DSM_{max}) pueden ajustarse regionalmente usando datos históricos de incendios y suelo.

En suma, esta propuesta de formulación moderniza el FWI integrando datos satelitales y un modelo de humedad profunda más flexible, manteniendo compatibilidad con la filosofía del sistema original.

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI2

En este capítulo se analizan las series de datos correspondientes a las variables empleadas para el cálculo del nuevo índice de peligro de incendio forestal FWI2.

3.1.- Descripción de las variables de entrada de FWI2 distintas a las de FWI

A continuación Para un mejor discernimiento de los resultados obtenidos con la generación de este índice FWI2 se muestran estadísticos e histogramas de los datos de las variables que son distintas para el cálculo de FWI y de FWI2, es decir, la humedad del aire y la humedad del suelo.

En relación con la variable Humedad:

- Para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET, para el periodo 2013-2024, se utiliza la humedad relativa del aire, HR, procedente de estaciones de AEMET y salidas del modelo numérico de predicción.
- Para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, para el periodo 2013-2022, se ha utilizado la humedad del suelo, sm, obtenida de las imágenes de satélite ESA-CCI-Combined.

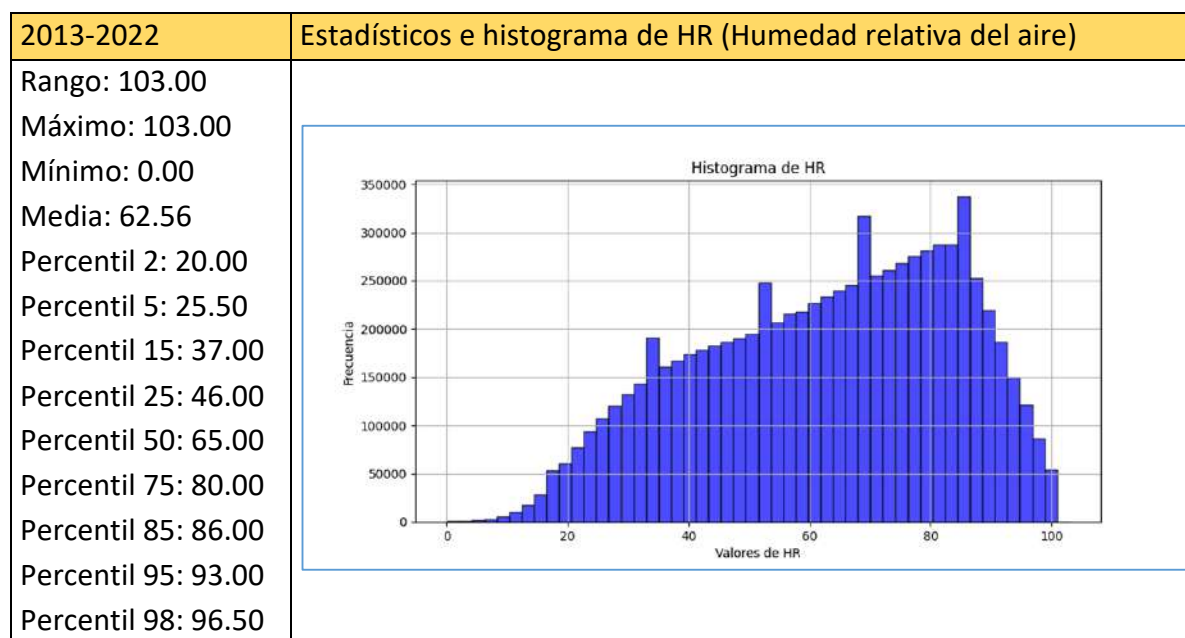


Figura 23. Estadísticos e histograma de los valores de HR (Humedad relativa del aire)

Esta figura muestra el histograma de frecuencias de la humedad del aire, con valores que cubren el rango de 0 a 100 %. Se trata de una función de distribución asimétrica sesgada hacia la izquierda, es decir la cola más larga va hacia la izquierda y los valores más frecuente están hacia la derecha. Llama la atención la existencia de cuatro máximos relativos muy abruptos,

los cuales son probablemente debidos a redondeo de los valores en ciertas estaciones automáticas.

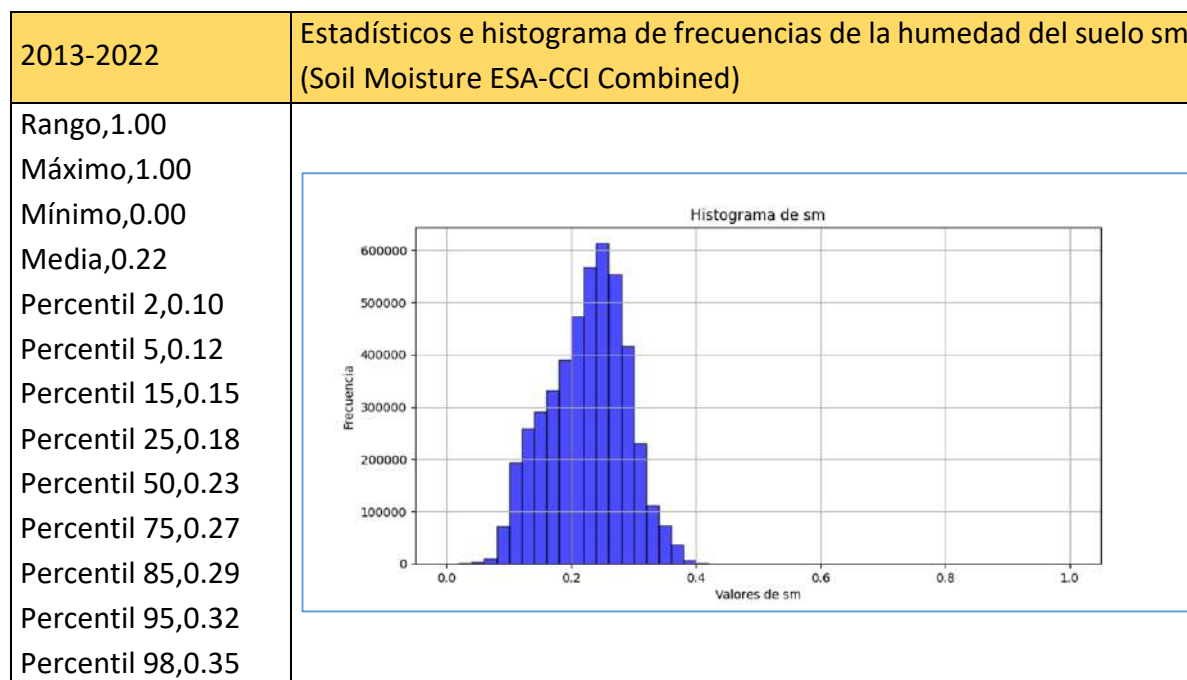


Figura 24. Estadísticos e histograma de frecuencias de la humedad del suelo sm (Soil Moisture ESA-CCI Combined)

A la vista de estas distribuciones de que se muestran en las Figura 23 y Figura 24 se puede observar que, si bien el rango de las variables es distinto, las distribuciones de frecuencias presentan algunas similitudes: ambas son unimodales (tienen un solo máximo) y ambas son asimétricas y sesgadas hacia la izquierda.

3.2. Descripción de los subíndices de FWI2 en comparación con los de FWI

A continuación se muestra la distribución y estadísticos básicos descriptivos de los subíndices e índice final tanto para la versión original como para los propuestos y calculados en este trabajo fin de máster.

Subíndice de la humedad de los combustibles finos muertos:

- FPMC utilizado para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET.
- FPMC2 utilizado para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, 2013-2022.

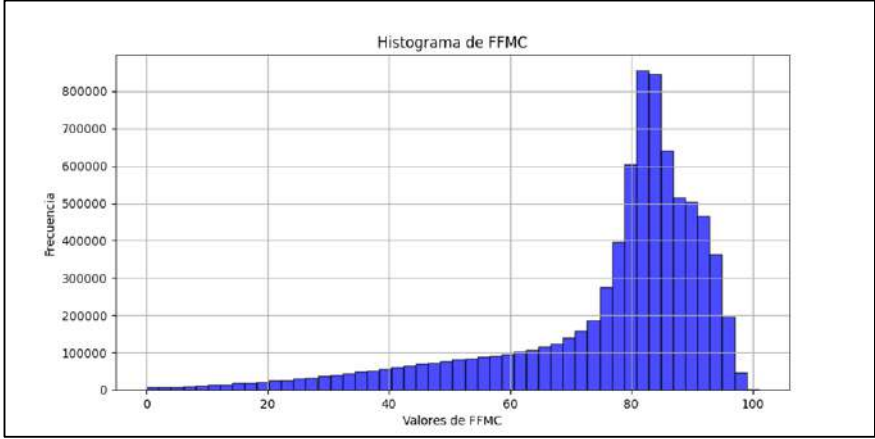
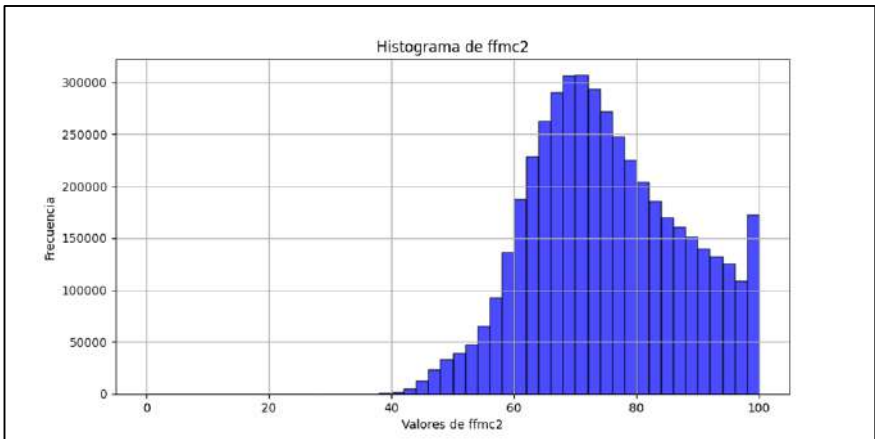
2013-2022	Estadísticos de los valores de: FFMC
Rango: 101.00 Máximo: 101.00 Mínimo: 0.00 Media: 76.11 Percentil 2: 22.65 Percentil 5: 35.80 Percentil 15: 58.15 Percentil 25: 71.90 Percentil 50: 81.90 Percentil 75: 87.25 Percentil 85: 90.40 Percentil 95: 94.00 Percentil 98: 95.60	
2013-2022	Estadísticos de los valores de: FFMC2
Rango: 100.00 Máximo: 100.00 Mínimo: 0.00 Media: 75.07 Percentil 2: 50.79 Percentil 5: 56.06 Percentil 15: 62.45 Percentil 25: 66.14 Percentil 50: 73.86 Percentil 75: 84.03 Percentil 85: 89.79 Percentil 95: 96.85 Percentil 98: 99.87	

Figura 25. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de FFMC y FFMC2.

A la vista de estas distribuciones se puede observar que, si bien el rango de estos índices es distinto, las distribuciones de frecuencias presentan algunas similitudes: ambas son unimodales (tienen una única moda o máximo de frecuencias) y ambas son asimétricas y sesgadas hacia la izquierda.

En la distribución de frecuencias correspondiente a FFMC2 se observa una mayor frecuencia de valores para el valor 100, los cuales representan situaciones de saturación de la humedad de la capa superficial.

Subíndice de la humedad de los combustibles muertos en la capa más profunda del suelo:

- DMC, utilizado para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET, 2013-2022.
- DSM2, utilizado para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, 2013-2022.

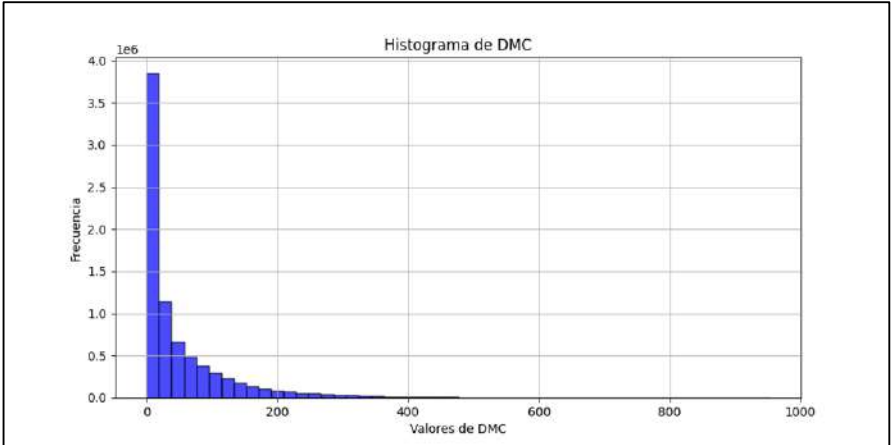
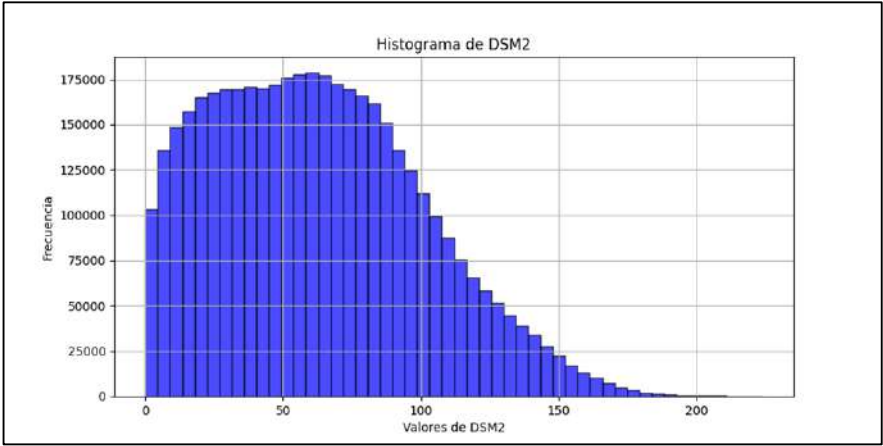
2013-2024	Estadísticos de los valores de: DMC
Rango: 953.05 Máximo: 953.05 Mínimo: 0.00 Media: 52.90 Percentil 2: 0.20 Percentil 5: 0.65 Percentil 15: 2.90 Percentil 25: 6.00 Percentil 50: 20.65 Percentil 75: 68.75 Percentil 85: 110.25 Percentil 95: 210.80 Percentil 98: 302.00	
2013-2022	Estadísticos de los valores de: DSM2
Rango: 224.11 Máximo: 224.11 Mínimo: 0.01 Media: 62.84 Percentil 2: 3.83 Percentil 5: 8.21 Percentil 15: 20.64 Percentil 25: 32.09 Percentil 50: 59.94 Percentil 75: 88.49 Percentil 85: 103.96 Percentil 95: 131.26 Percentil 98: 147.53	

Figura 26. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de DMC y DSM2.

Se observa qué tanto el rango de los índices como sus distribuciones son muy distintos. Esto es lógico pues tanto las definiciones de los dos índices como sus variables de entrada son completamente distintas, humedad del aire para DMC y la humedad del suelo para DSM2.

Subíndice de la propagación Inicial del incendio:

- ISI, utilizado para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET, 2013-2022.
- ISI2, utilizado para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, 2013-2022.

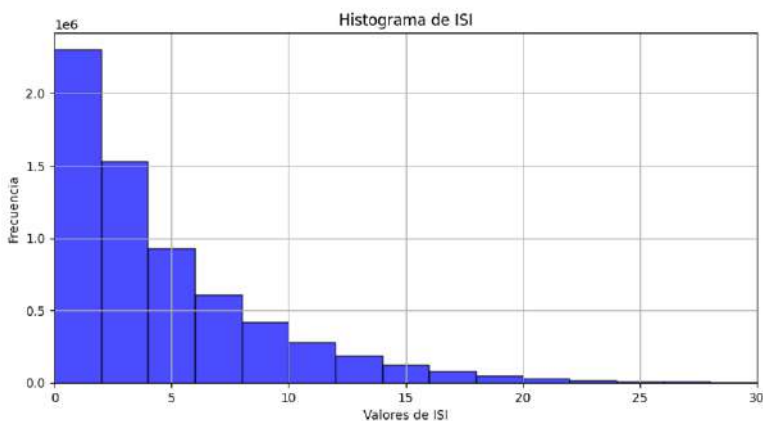
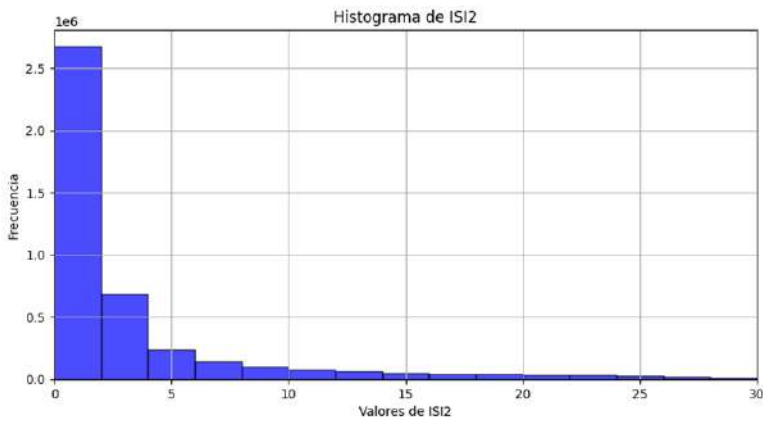
2013-2022	Estadísticos de los valores de: ISI.
Rango: 289.80 Máximo: 289.80 Mínimo: 0.00 Media: 4.76 Percentil 2: 0.00 Percentil 5: 0.00 Percentil 15: 0.70 Percentil 25: 1.35 Percentil 50: 3.20 Percentil 75: 6.55 Percentil 85: 9.15 Percentil 95: 14.40 Percentil 98: 18.90	
2013-2022	Estadísticos de los valores de: ISI2
Rango: 164.81 Máximo: 164.81 Mínimo: 0.00 Media: 4.04 Percentil 2: 0.33 Percentil 5: 0.52 Percentil 15: 0.77 Percentil 25: 0.94 Percentil 50: 1.50 Percentil 75: 3.43 Percentil 85: 7.04 Percentil 95: 18.90 Percentil 98: 26.65	

Figura 27. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de ISI e ISI2.

A la vista de estas distribuciones se observa que el rango de los índices ISI e ISI2 es el mismo. Además, ambas distribuciones de frecuencias son fuertemente asimétricas y sesgadas hacia la derecha, aunque la curva de frecuencias de ISI disminuye más lentamente que la campana de distribución de ISI2 que se reduce con mayor gradiente.

Para la interpretación de estos valores, conviene recordar que valores altos del subíndice indican condiciones ideales para una propagación rápida (vientos fuertes y combustibles muy

secos), mientras que valores de ISI bajos sugieren propagación lenta o limitada (vientos débiles o combustibles con algo de humedad).

Subíndice de acumulación, BUI

El subíndice de acumulación, BUI, que representa la cantidad y disponibilidad de combustible orgánico en una capa más profunda del suelo y de tamaño grueso, evalúa la carga de combustible seco y denso que, una vez encendido, contribuye a incendios más intensos y duraderos.

Se muestran:

- BUI, utilizado para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET, 2013-2022.
- BU2, utilizado para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, 2013-2022.

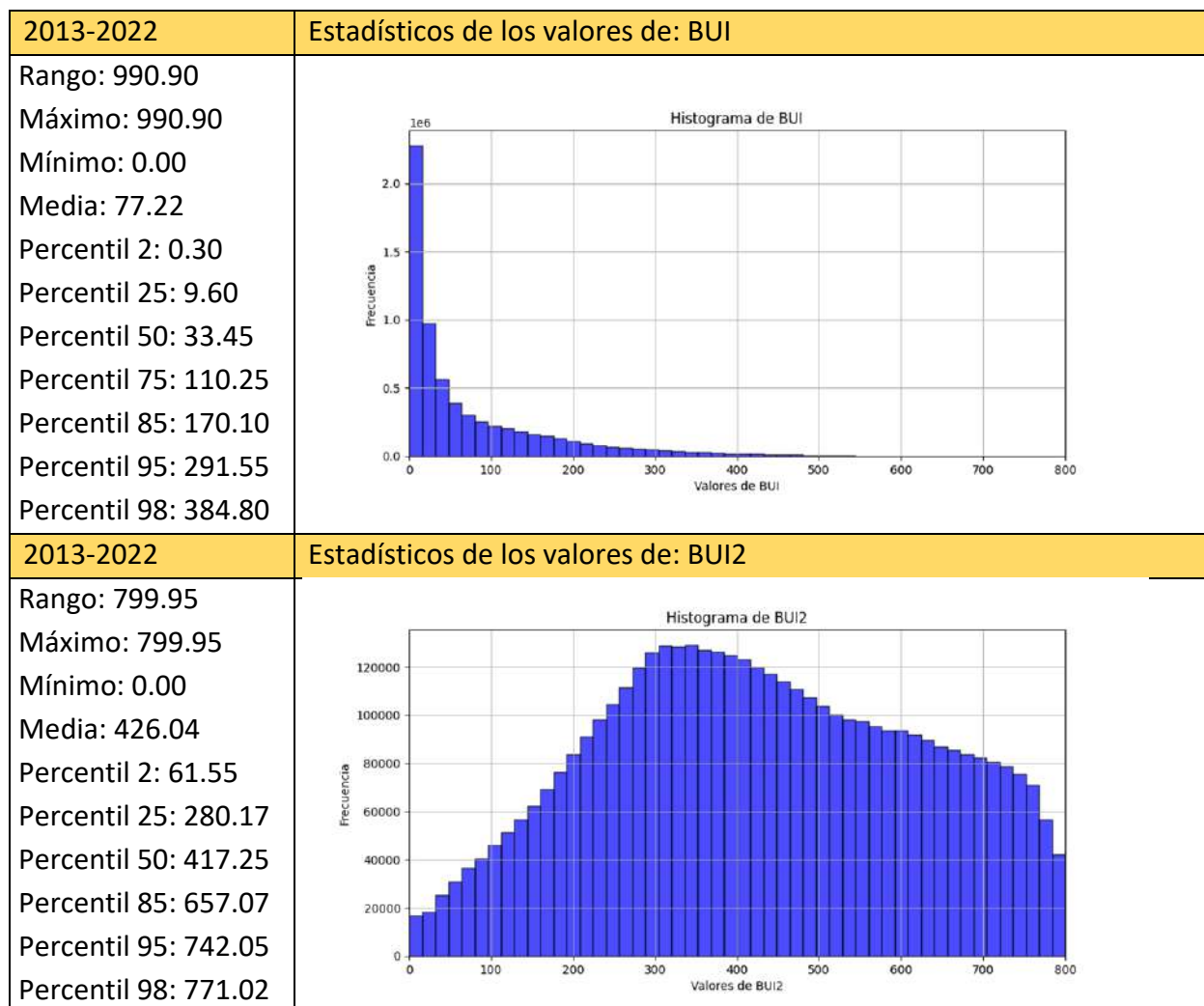


Figura 28. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de BUI e BUI2

Se observa que los índices BUI y BUI2 muestran el mismo rango de valores, tal y como se propuso en la formulación. Sin embargo, las curvas de distribución son claramente distintas. Esto es lógico y esperable pues las variables de entrada de ambos índices también difieren,

siendo el índice de humedad de la capa profunda del suelo, DMC, entrada para BUI, y el índice de humedad de la capa profunda del suelo, DSM2, para BUI2.

Valores altos del índice BUI indican una mayor acumulación de combustible seco, lo que implica mayor riesgo de incendios graves y, en caso de producirse, difíciles de controlar.

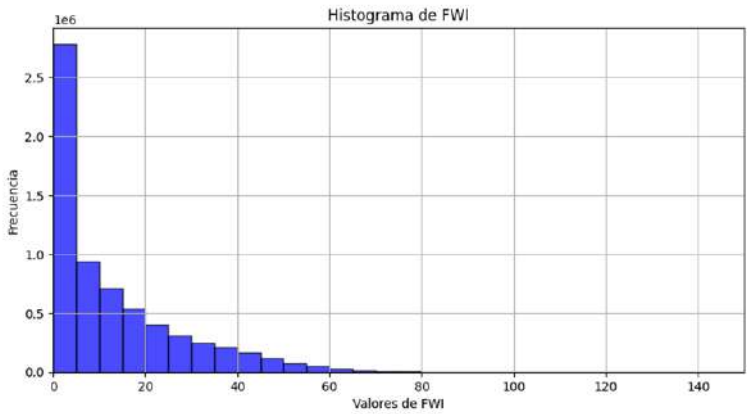
La mayor frecuencia de valores elevados del índice BUI2 en comparación con los valores del índice BUI Figura 28 se verá compensado en los valores del índice final por la atenuación más rápida de FWI2 en comparación con FWI, como se comentó a la vista de la Figura 27.

Índice final, FWI

El índice final FWI representa la energía potencial del incendio por metro del frente y se mide en kW/m. Este índice cuantifica la intensidad de un incendio y la dificultad de controlarlo si llega a producirse.

Se muestran:

- FWI, utilizado para el cálculo del índice FWI, operativo de AEMET, 2013-2024.
- FWI2, utilizado para el cálculo del índice FWI2, propuesto en este TFM, 2013-2022.

2013-2022	Estadísticos de los valores de: FWI
Rango: 255.60 Máximo: 255.60 Mínimo: 0.00 Media: 13.13 Percentil 2: 0.00 Percentil 5: 0.00 Percentil 15: 0.35 Percentil 25: 1.15 Percentil 50: 7.60 Percentil 75: 19.85 Percentil 85: 29.20 Percentil 95: 44.75 Percentil 98: 54.30	

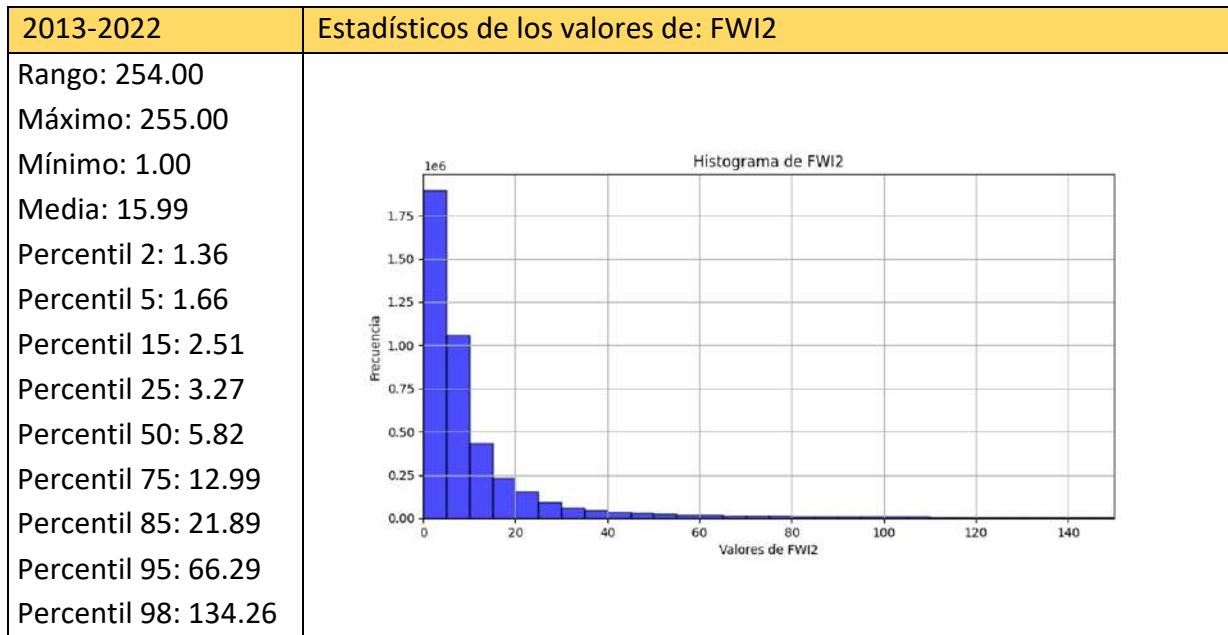


Figura 29. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de FWI e FWI2

Se observa que FW y FWI2 muestran el mismo rango, tal y como se propuso en la formulación. Además, ambas distribuciones son fuertemente asimétricas y sesgadas hacia la derecha, y difieren fundamentalmente en su velocidad de disminución.

Su similitud en la forma de la distribución es debida a la compensación entre las dos “ramas” que llevan a la formulación del índice final. Por un lado, en la rama de la formulación de los índices ISI, con datos de humedad del aire en (ISI), y datos de humedad del suelo en (ISI2), veíamos que la distribución la curva de frecuencias de ISI disminuye más lentamente que la campana de distribución de ISI2 que se reduce con mayor intensidad.

Por un lado, en la rama de la formulación de los índices ISI, con datos de humedad del aire en (ISI), y datos de humedad del suelo en (ISI2), veíamos que la distribución la curva de frecuencias de ISI disminuye más lentamente que la campana de distribución de ISI2 que se reduce con mayor intensidad.

Mientras que, por el otro lado, en la rama de los índices BUI, con datos de los índices originales de humedad de capas del suelo de distinta profundidad (DMC y DC) para BUI, y con datos de una sola capa y con un modelo más realista de la influencia de las precipitaciones y la evaporación (DSM2) para BUI2, la curva de frecuencias de valores elevados de BUI2 en comparación con la distribución de valores de BUI, se verá compensada con la diferencia entre las distribuciones de ISI2 frente a ISI.

Finalmente y tras dicha compensación, la diferencia observada en las curvas de las distribuciones, (FWI decae más lentamente que FWI2), nos ayudaría a compensar una de las limitaciones principales del índice original, y es que, en determinadas épocas (sobre todo en los veranos) y en la mayor parte de la península ibérica, el índice FWI se satura, alcanzando

valores “Muy Alto” y “Extremo” con demasiada frecuencia. Esta saturación excesiva en las situaciones extremas limita las actuaciones en los ámbitos agrícola y forestal debido a la normativa en vigor al respecto. Es de esperar que el mayor decaimiento en las frecuencias de valores altos de FWI2 compense esta saturación excesiva, dando lugar a un índice con mayor capacidad para discriminar las situaciones “Muy Alto” y “Extremo” y, por tanto, una mayor utilidad en los ámbitos agrícola y forestal.

Así, puede considerarse como un buen resultado de la formulación de este nuevo índice FWI2, propuesto en este trabajo, con la que se consigue que los casos de índice con valores “Muy Alto” y “Extremo” estén algo más compensados y sean menos frecuentes.

3.3.- Resumen gráfico de la evolución diaria y anual del valor del índice final, para el dominio de la península Ibérica.

Se muestran a continuación las curvas de las figuras Figura 30 y Figura 31, que representan la evolución del valor medio diario de los índices original FWI y propuesto FWI2 en la península ibérica, para el periodo 2013-2024.

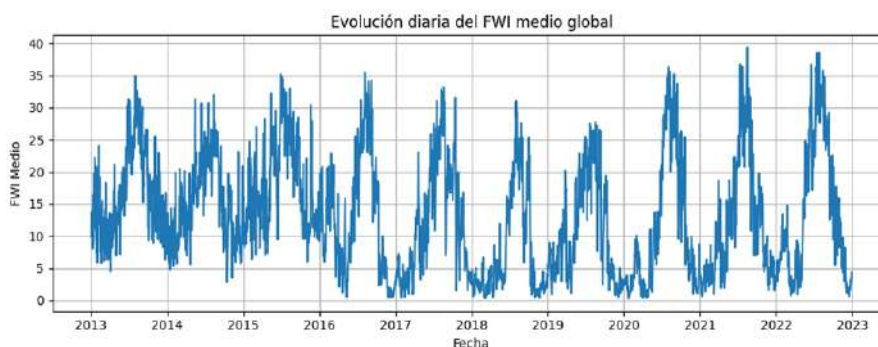


Figura 30. Evolución del valor medio diario del índice, en la península ibérica, 2013-2024, índice original FWI

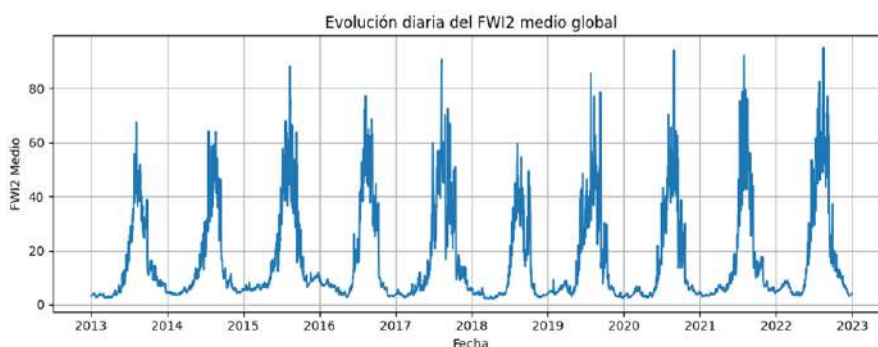


Figura 31. Evolución del valor medio diario del índice, en la península ibérica, 2013-2024, índice FWI2

A la vista de ambas figuras se observa que ambos índices recogen adecuadamente el ciclo anual, compartiendo además los valores mínimos. Sin embargo, los rangos y los máximos

difieren, mostrando el índice FWI2 una mayor sensibilidad a los valores altos.

Las Figura 32 y Figura 33, representan la evolución de la frecuencia diaria del % de celdas con valores superiores al percentil 85 del índice, que corresponden a los casos calificados como Muy Altos o Extremos.



Figura 32. Frecuencia diaria del % de celdas con valores > p85 del índice, valores calificados como Muy Altos o Extremos



Figura 33. Frecuencia diaria del % de celdas con valores > p85 del índice, valores calificados como Muy Altos o Extremos.

A la vista de ambas figuras se observa que la limitación de la frecuencia de los valores extremos está un tanto limitada pero en los periodos más álgidos del índice se sigue superando este límite del percentil 86, en un % de celdas considerable, es decir, la nueva formulación del FWI2, no desactiva del todo la superación de los umbrales, solo la suaviza.

Se muestran a continuación las Figura 34 y Figura 35, que representan la evolución del valor medio anual del índice en todo el dominio. Cada barra representa el valor medio del año y de todo el dominio para el índice.

“Propuesta de un índice meteorológico enriquecido de peligro de incendio forestal en España y su evolución bajo escenarios de cambio climático”

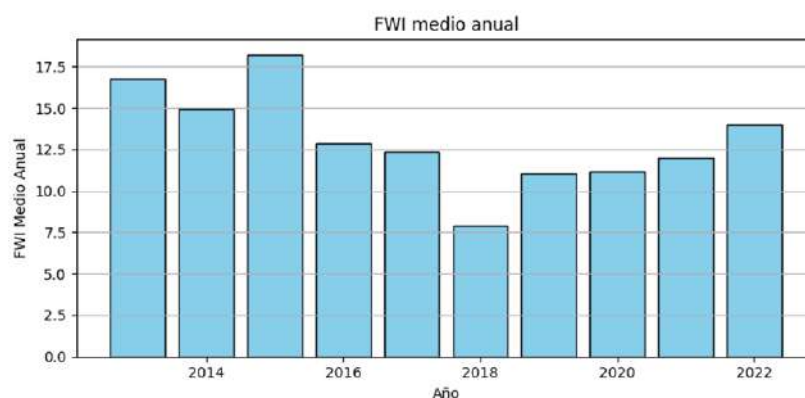


Figura 34. Evolución del valor medio anual del índice FWI en la península ibérica.

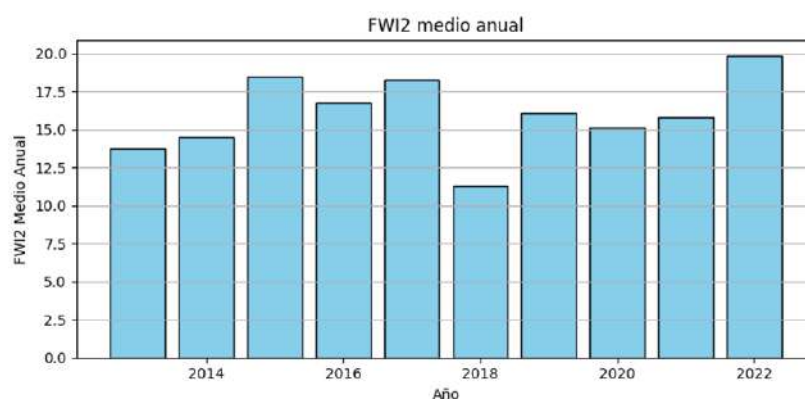


Figura 35. . Evolución del valor medio anual del índice FWI2 en la península ibérica.

A la vista de ambas figuras se observa que el comportamiento de ambos índices es similar pero no igual en promedio anual y para la península ibérica, los años más significativos por índices altos, 2015 y 2022, y por índices bajos, 2018, resultan claros para ambos índices.

Se muestran a continuación las Figura 36 y Figura 37, en las que representan la evolución de la frecuencia anual del % de valores del dominio y del año que son superiores al percentil 85 del índice, calificados como Muy Altos o Extremos.

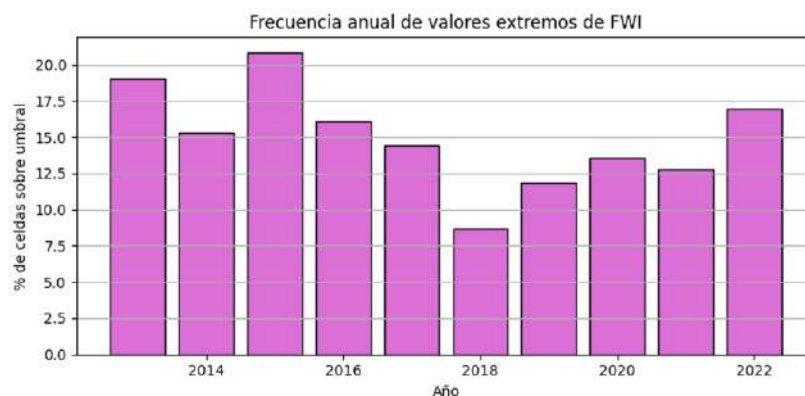


Figura 36. % de valores > p85 de FWI, valores Muy Altos o Extremos.

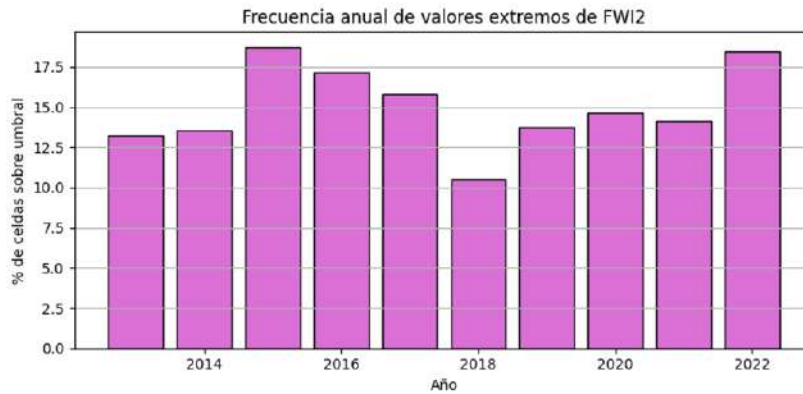


Figura 37. % de valores > p85 de FWI2, valores Muy Altos o Extremos.

De nuevo, en el análisis de las frecuencias de los valores altos y extremos, se observa un comportamiento similar de ambos índices, los años más significativos por índices altos, 2015 y 2022, y por índices bajos, 2018, resultan claros también en este caso. Y las frecuencias similares en ambos índices pero algo más atenuadas en el caso del FWI2.

3.4.- Correlación entre las series FWI y FWI2

Como último paso del análisis de las series FWI y FWI2, y como una medida de la similitud de ambas series, se han analizado las series valores del índice medio diario para la península Ibérica para el periodo 2013-2022, para FWI y FWI2.

Se ha realizado un análisis de correlación entre ambas series y los resultados obtenidos son los siguientes:

Resultado de la correlación de Pearson:

- Coeficiente de correlación: 0.810
- p-valor < 1E-16
- Regresión lineal: $y = a \cdot x + b$
 - a (pendiente) = 1.5380 ± 0.0184 (p-valor < 1E-16)
 - b (intercepto) = -4.1912 ± 0.2935 (p-valor < 1E-16)

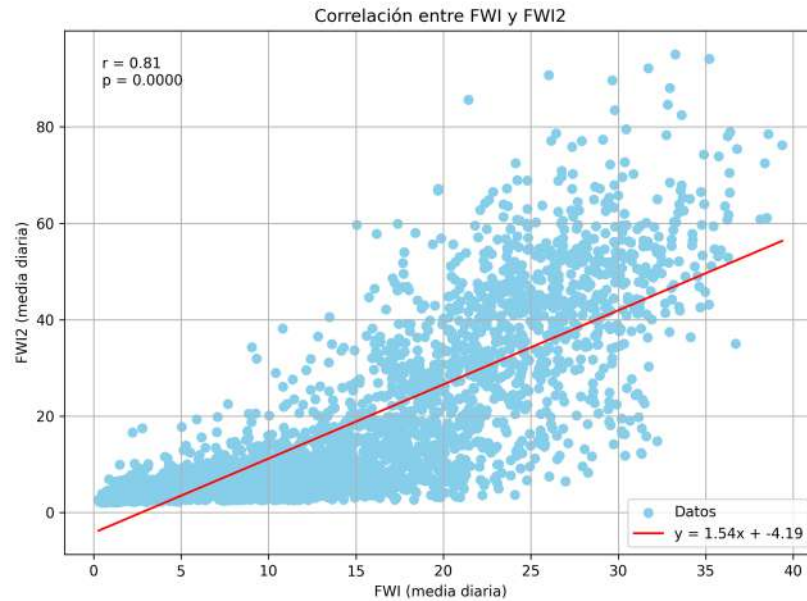


Figura 38. Correlación entre las series del índice medio diario FWI y FWI2, península ibérica, 2013-2022.

Los resultados gráficos y numéricos de la correlación realizada entre ambas series de los índices medios diarios FWI y FWI2, indican la buena relación entre ambos índices. Lo que puede interpretarse como que la formulación propuesta para FWI2 es robusta y coherente con la original.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA GENERACIÓN DEL ÍNDICE FWI2P

A partir de datos obtenidos de las proyecciones regionalizadas de cambio climático, mediante el modelo KNMI-RACMO2.1-ECHAM5-r3 se han calculado para el dominio de la península ibérica las variables de entrada de la formulación propuesta para el índice FWI2. Posteriormente se ha generado la serie del índice con los datos de las proyecciones climáticas para el período 2011-2040, a la serie del índice de peligro de incendio forestal en este periodo se la ha denominado FWI2p (p de proyecciones climáticas)

La hipótesis que se pretende contrastar en este apartado es que el cambio climático influirá de manera significativa en los valores del índice de peligro de incendio forestal en las décadas venideras. Para demostrar esta hipótesis vamos a analizar la tendencia del índice final FWI2p en el periodo 2011-2040.

4.1.- Descripción de las variables de entrada de FWI2p

Antes de analizar los resultados obtenidos con la generación de este índice FWI2p se muestran a continuación los histogramas de las variables de entrada para el periodo 2011-2040.

En relación con la variable humedad del suelo, para el cálculo del índice FWI2p, propuesto en este TFM, se ha utilizado la variable SOILWUP, obtenida de las proyecciones climáticas, para el periodo 2011-2040.

Distribución de frecuencias de los valores de: SOILWUP, periodo 2011-2040

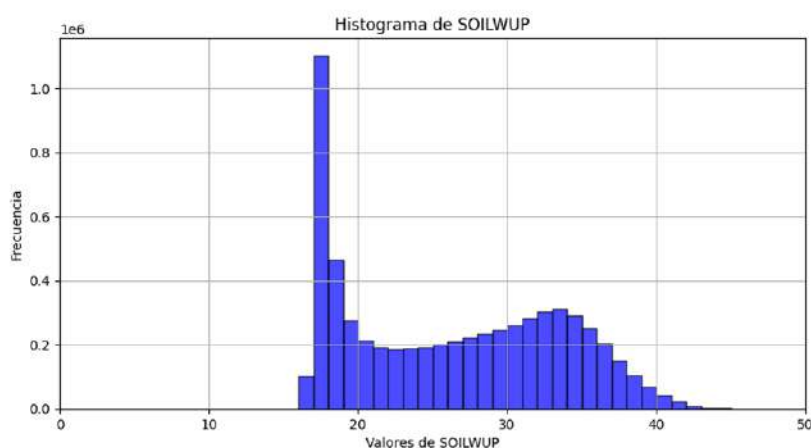


Figura 39. Distribución de frecuencias de los valores de: SOILWUP, periodo 2011-2040.

A la vista de estas distribuciones de la Figura 10 y Figura 11 se puede observar que el rango de las variables, SOILWUP, HR, y sm, es distinto. También difiere la distribución de frecuencias.

Estas diferencias eran esperables al tratarse de variables distintas: SOILWUP representa la humedad de superficie 10 cm por encima del suelo medida por satélite, HR es la humedad del aire a 1.5 m de altura sobre la superficie, y sm es humedad del suelo.

En relación con la variable Precipitación, para el cálculo del índice FWI2p, propuesto en este TFM, se ha utilizado la precipitación prevista en las 24 horas anteriores, PRECIP, obtenida de las proyecciones climáticas, para el periodo 2011-2040. Su distribución de frecuencias puede verse en la Figura 40.

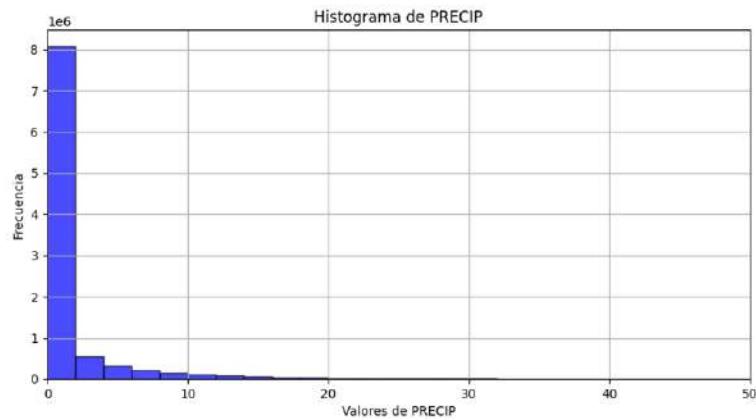


Figura 40. Distribución de frecuencias de los valores de: PRECIP, periodo 2011-2040

A la vista de esta distribución de frecuencias y de la mostrada para la variable precipitación (P) obtenida de los valores de AEMET, Figura 8, puede concluirse que ambas distribuciones son muy semejantes.

La Temperatura, para el cálculo del índice FWI2p, propuesto en este TFM, se ha estimado a partir de la variable T2MAX, obtenida de las proyecciones climáticas, para el periodo 2011-2040. Cuyos valores, estadísticos y distribuciones de frecuencias se han mostrado ya en la Figura 16.

La variable Viento, para el cálculo del índice FWI2p, propuesto en este TFM, se ha estimado a partir de la variable, W10MAX, obtenido de las proyecciones climáticas, para el periodo 2011-2040. Cuyos valores, estadísticos y distribuciones de frecuencias se han mostrado ya en la Figura 20.

Como resultado final del cálculo según las fórmulas propuestas en el Figura 21. Rejillas procedentes de cada tipo de dato utilizado y rejilla final.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA, utilizando los datos que se acaban de describir, se han obtenido los valores del índice FWI2p, para el periodo 2011-2040.

A continuación se muestra la distribución de frecuencias de los valores obtenidos para el índice FWI2p en el periodo 2011-2040.

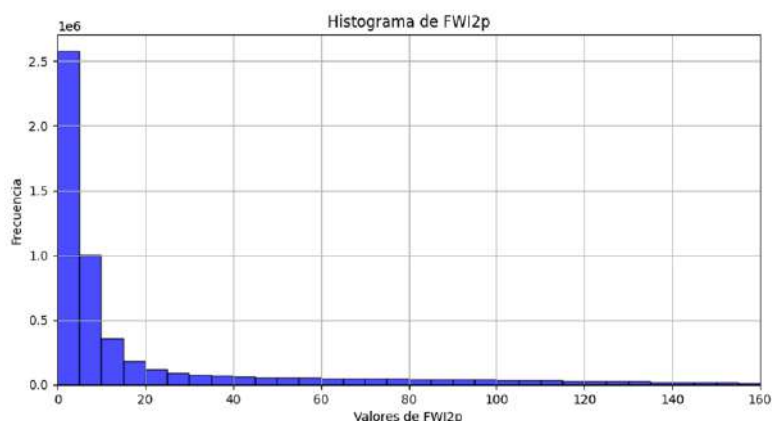


Figura 41. Distribución de frecuencias de los valores de: FWI2p, periodo 2011-2040.

Esta distribución de frecuencias de los valores del índice FWI2p, calculada para el periodo 2011-2040, es similar a la mostrada para los índices FWI2 y FWI, para el periodo 2011-2022, Figura 29, lo cual puede concluirse como una prueba de la precisión de la nueva formulación del índice propuesta en este trabajo fin de máster.

4.2.- Correlación entre las series del FWI2p y el tiempo

Para comprobar si los valores del índice FWI2p, calculado con la fórmula propuesta para este trabajo fin de máster y con las variables de entrada obtenida de las proyecciones climáticas regionalizadas dinámicamente, en el período 2011-2040, aumentan con el tiempo, se ha realizado una regresión lineal simple donde la variable independiente es el tiempo (por ejemplo, el número de días desde el inicio) y la dependiente es el valor medio diario de FWI2p.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:			
OLS Regression Results			
=====			
Dep. Variable:	FWI2p_media_diaria	R-squared:	0.006
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.006
Method:	Least Squares	F-statistic:	63.39
Date:	Wed, 23 Apr 2025	Prob (F-statistic):	1.87e-15
Time:	21:52:35	Log-Likelihood:	-56482.
No. Observations:	10958	AIC:	1.130e+05
Df Residuals:	10956	BIC:	1.130e+05
Df Model:	1		

Covariance Type:		nonrobust				
=====						
===						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

const	30.0239	0.801	37.497	0.000	28.454	31.593
dias_desde_inicio	0.0010	0.000	7.962	0.000	0.001	0.001
=====						
Omnibus:	1857.034	Durbin-Watson:		0.057		
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):		2958.182		
Skew:	1.257	Prob(JB):		0.00		
Kurtosis:	3.401	Cond. No.		1.27e+04		
=====						

El objetivo del análisis es comprobar si la variable FWI2p_media_diaria aumenta con el tiempo para ello se ha calculado la variable (dias_desde_inicio) que representa el número de días transcurrido desde el inicio de la serie (1-ene-2011)

La explicación de estos valores es la siguiente:

- const = 30.0239
- dias_desde_inicio = 0.0010
- const (intercepto): cuando dias_desde_inicio es 0 (es decir, el primer día de la serie temporal), el valor esperado de FWI2p_media_diaria es aproximadamente 30.02
- dias_desde_inicio: por cada día adicional, el valor esperado de FWI2p_media_diaria aumenta en 0.0010 unidades. Este es el coeficiente clave para saber si hay una tendencia creciente.

La significancia estadística viene dada por: $P>|t|$ para dias_desde_inicio = 0.000

El p-valor para dias_desde_inicio es prácticamente cero, lo cual indica que el aumento diario de FWI2p_media_diaria es estadísticamente significativo.

R^2 (R-squared): 0.006,

Este valor indica qué proporción de la variabilidad en FWI2p_media_diaria se explica por el tiempo.

Un valor de 0.006 es muy bajo, lo que significa que aunque la tendencia creciente es estadísticamente significativa, el tiempo apenas explica la variación de FWI2p_media_diaria (solo un 0.6%). Esto es lógico pues la variación del índice FWI2p es debida sobre todo a variabilidad de las variables de entrada que lo generan.

F-statistic y su p-valor:

- F-statistic: 63.39
- Prob (F-statistic): 1.87e-15

Esto confirma que el modelo en su conjunto es significativo es decir hay una relación no nula entre tiempo y FWI2p_media_diaria.

Conclusión: Sí, hay evidencia estadística de que FWI2p_media_diaria aumenta con el tiempo.

Para corroborar con más certeza este resultado se han realizado regresiones lineales simples frente al el tiempo, además de la ya citada del valor medio diario de FWI2p, con el valor medio anual de FWI2p, y con los valores medios anuales de los cuartiles que definen las categorías “Bajo, Moderado, Alto, Muy alto y Extremo” y en todos los casos se ha encontrado una tendencia creciente es estadísticamente significativa.

MEDIA

Multiple R-squared: 0.2039, Adjusted R-squared: 0.1755
F-statistic: 7.173 on 1 and 28 DF, p-value: 0.01224

P40

Multiple R-squared: 0.003279, Adjusted R-squared: -0.03232
F-statistic: 0.0921 on 1 and 28 DF, p-value: 0.7638

P65

Multiple R-squared: 0.1036, Adjusted R-squared: 0.07163
F-statistic: 3.237 on 1 and 28 DF, p-value: 0.08276

P85

Multiple R-squared: 0.1958, Adjusted R-squared: 0.1671
F-statistic: 6.816 on 1 and 28 DF, p-value: 0.01435

P95

Multiple R-squared: 0.1346, Adjusted R-squared: 0.1037
F-statistic: 4.355 on 1 and 28 DF, p-value: 0.04612

Este resultado puede comprobarse también gráficamente en la Figura 42.

Con todos se confirma la hipótesis que queríamos contrastar: que los valores del índice FWI2p, calculado con la fórmula propuesta para este trabajo fin de máster y con las variables de entrada obtenida de las proyecciones climáticas regionalizadas dinámicamente, en el período 2011 2040, aumentarán con el tiempo.

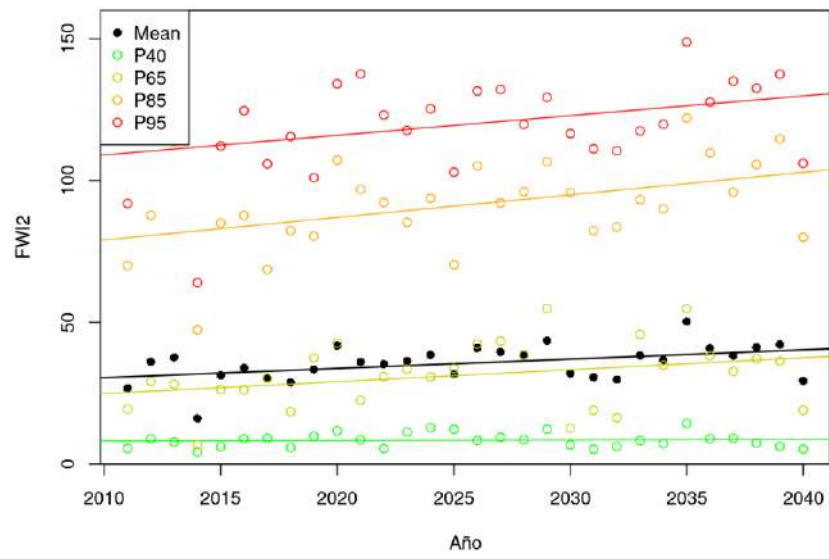


Figura 42. Regresión lineal de los valores: media y percentiles 40, 65, 85 y 95, del valor medio anual de FWI2p.

CONCLUSIONES

Finalizado el desarrollo del estudio se sintetizan a continuación las conclusiones y resultados más relevantes relacionados con los objetivos inicialmente planteados:

1. Se han analizado diversas variables representativas de la humedad de los combustibles, que no forman parte de la actual definición del índice de peligro de incendio de AEMET, FWI, seleccionando la humedad del suelo como la más adecuada y factible de implementar. Esto se ha hecho tras analizar su disponibilidad y su resolución espacial y temporal, para su incorporación a una nueva propuesta de definición del índice de peligro de incendio.
2. Se ha diseñado una nueva formulación del índice de peligro de incendio, FWI2, adaptando el esquema del índice FWI canadiense clásico, incluyendo la humedad del suelo. El nuevo índice resulta novedoso en cuanto a la incorporación de medidas por satélite de la humedad de la capa superficial del suelo, el cálculo de la humedad de la capa profunda del suelo mediante un modelo “cubeta” y la asignación a cada pixel de una capacidad máxima de almacenamiento de agua en función de la composición del suelo.
3. Las distribuciones de frecuencias de los valores de entrada: humedad del aire y humedad del suelo, así como la comparación de las distribuciones de las parejas de subíndices (FFMC y FFMC2, DMC y DSM2, ISI e IS2, BUI y BUI2) y en último lugar de los índices finales FWI y FWI2, indican que el mayor decaimiento en las frecuencias de valores altos de FWI2 compensa las situaciones de saturación de FWI, dando lugar a un índice FWI2 con mayor capacidad para discriminar entre los valores “Muy Alto” y “Extremo” del índice.
4. Se han calculado las proyecciones climáticas del nuevo índice FWI2 bajo un escenario de cambio climático, para el periodo 2011-2050.
5. Se han analizado la posible existencia de tendencias en los valores proyectados del nuevo índice FWI2 bajo un escenario de cambio climático, para el periodo 2011-2050, encontrando suficientes evidencias estadísticas para afirmar que hay una tendencia significativa de aumento del índice propuesto en las décadas venideras, la cual es mayor para los valores más altos del índice.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (s.f.-a). Interpretación: Predicción de incendios. Recuperado el 25 de abril de 2025, de

<https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/incendios/ayuda>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (s.f.-b). Datos diarios de proyecciones regionalizadas de cambio climático. Recuperado el 25 de abril de 2025, de

https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios

Aguilar Albán, JH. (2018). Análisis espacio-temporal de la humedad del combustible vivo en la Comunidad Valenciana usando métodos estadísticos multivariados. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/164694>

Arrouays, D., Grundy, M. G., Hartemink, A. E., Hempel, J. W., Heuvelink, G. B., Hong, S. Y., & Zhang, G. L. (2014). GlobalSoilMap: Toward a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in agronomy*, 125, 93-134.

Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil genesis and classification*. John Wiley & Sons.

European Space Agency (ESA). (s.f.). *Soil Moisture - Climate Change Initiative*. Climate.esa.int. <https://climate.esa.int/en/projects/soil-moisture/>

Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

FireURisk. (s.f.). Developing a holistic, risk-wise strategy for wildfire management in the EU. <https://fireurisk.eu/project/> (Consultado el 22 de abril de 2025).

Frost, J. (2019). *Regression Analysis: An Intuitive Guide for Using and Interpreting Linear Models*. Statistics By Jim Publishing.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., and Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology*, 201(1-4), 272-288.

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). Wiley.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2021–2023). *Guía de instrumentos y métodos de observación* (WMO-No. 8). Ginebra: OMM. Recuperado de <https://library.wmo.int/records/item/41650-guide-to-instruments-and-methods-of-observation>

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7(1), 217-240.

Seibert, J. (1999). Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and forest meteorology*, 98, 279-293.

Scikit-learn. (s.f.). `sklearn.linear_model.RANSACRegressor`. Recuperado de https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.RANSACRegressor.html

Teutschbein, C., and Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.

USDA, United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, (1984). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Wiley-Interscience.

USDA, United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, (2010). *Keys to Soil Taxonomy: 2010*. Government Printing Office.

Van Wagner, C. E. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System* (Technical Report No. 35). Canadian Forestry Service, Ottawa. Disponible en <https://cfs.nrcan.gc.ca>

TABLAS DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de cálculo del índice FWI	10
Figura 2. Mapas de temperatura y humedad, días de primavera y verano 2015	11
Figura 3. Mapas de viento y precipitación, días de primavera y verano 2015	12
Figura 4. Mapas de los índices FPMC e ISI, días de primavera y verano 2015.....	13
Figura 5. Mapas de los índices DMC y BUI, días de primavera y verano 2015	14
Figura 6. Mapas del índice FWI, días de primavera y verano 2015	15
Figura 7. Mapas de humedad de suelo, datos ESA Soil Moisture CCI.....	16
Figura 8. Estadísticos de los datos de Precipitación e histograma de frecuencias.....	17
Figura 9. Estadísticos de los datos de Temperatura e histograma de frecuencias.....	18
Figura 10. Estadísticos de los datos de humedad del aire e histograma de frecuencias	18
Figura 11. Estadísticos de humedad del suelo obtenida de ESA-CCI-SM e histograma	19
Figura 12. Estadísticos de los datos de Viento e histograma de frecuencias	19
Figura 13. Regresión lineal entre Tª diaria a las 12 UTC y Tª máxima diaria.	23
Figura 14. Resultados de la correlación entre (V) viento a las 12 UTC y de racha máxima diaria (W10MAX)	23
Figura 15. Resultados de las regresiones RANSAC y polinómica 2º grado, entre (V) viento a las 12 UTC y de racha máxima diaria (W10MAX)	24
Figura 16. Resultado de la regresión lineal entre el viento medio diario y la racha máxima de viento media diaria para el periodo 2013-2024.....	25
Figura 17. Estadísticos de los valores de: T (Temperatura) e histograma	25
Figura 18. Estadísticos de los valores de: T2MAX e histograma	26
Figura 19. Estadísticos de los valores de: V (Viento) e histograma	26
Figura 20. Estadísticos de los valores de: W10MAX e histograma	27
Figura 21. Rejillas procedentes de cada tipo de dato utilizado y rejilla final.....	31
Figura 22. Esquema propuesto para el cálculo del índice FWI2	33
Figura 23. Estadísticos e histograma de los valores de HR (Humedad relativa del aire).....	39
Figura 24. Estadísticos e histograma de frecuencias de la humedad del suelo sm (Soil Moisture ESA-CCI Combined).....	40
Figura 25. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de FPMC y FPMC2.	41
Figura 26. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de DMC y DSM2.....	42
Figura 27. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de ISI e ISI2.....	43
Figura 28. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de BUI e BUI2.....	44
Figura 29. Distribución y los estadísticos básicos descriptivos de FWI e FWI2	46
Figura 30. Evolución del valor medio diario del índice, en la península ibérica, 2013-2024, índice original FWI.....	47
Figura 31. Evolución del valor medio diario del índice, en la península ibérica, 2013-2024, índice FWI2.....	47
Figura 32. Frecuencia diaria del % de celdas con valores > p85 del índice, valores calificados	

como Muy Altos o Extremos	48
Figura 33. Frecuencia diaria del % de celdas con valores > p85 del índice, valores calificados como Muy Altos o Extremos.	48
Figura 34. Evolución del valor medio anual del índice FWI en la península ibérica.	49
Figura 35. . Evolución del valor medio anual del índice FWI2 en la península ibérica.	49
Figura 36. % de valores > p85 de FWI, valores Muy Altos o Extremos.	49
Figura 37. % de valores > p85 de FWI2, valores Muy Altos o Extremos.	50
Figura 38. Correlación entre las series del índice medio diario FWI y FWI2, península ibérica, 2013-2022.	51
Figura 39. Distribución de frecuencias de los valores de: SOILWUP, periodo 2011-2040.	53
Figura 40. Distribución de frecuencias de los valores de: PRECIP, periodo 2011-2040	54
Figura 41. Distribución de frecuencias de los valores de: FWI2p,	55
Figura 42. Regresión lineal de los valores: media y percentiles 40, 65, 85 y 95, del valor medio anual de FWI2p.	58