



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Papel de la gestión forestal y el clima en el comportamiento futuro de incendios forestales: una aproximación mediante modelización

MIEŽĪTE, L.E¹, AMEZTEGUI, A^{1,2}; RODRIGUES, M³

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universitat de Lleida.

² JRU CTFC-Agrotecnio

³ Universidad de Zaragoza.

Resumen

La gestión forestal puede contribuir a adaptar los bosques a los cambios en los regímenes de incendios asociados al cambio climático, pero se desconoce con exactitud cómo diversas actuaciones pueden afectar al riesgo futuro de incendio. En este trabajo evaluamos el comportamiento del fuego en bosques de *Pinus nigra* bajo diferentes escenarios de gestión y climas futuros. Simulamos la dinámica forestal bajo los diferentes escenarios, usando el *Canadian Fire Weather Index* para determinar la humedad del combustible y el modelo *medfate* para analizar el comportamiento del fuego, mediante variables como la tasa de propagación (ROS) de incendios de superficie y copa, y el potencial de inicio de fuegos de copa (CFII). Nuestros resultados muestran que el CFII y ROS de copa están fuertemente influenciados por la dinámica forestal, especialmente en escenarios de altas emisiones. La gestión actual conduce a valores altos de ROS de copa, mientras que una gestión para la adaptación al cambio climático presenta los valores más bajos. Nuestras simulaciones muestran la influencia del clima y de la gestión en los diferentes parámetros de comportamiento del fuego, destacando la importancia de considerar ambos en la planificación.

Palabras clave

Modelización, escenarios futuros, Selvicultura adaptativa, comportamiento del fuego, Cambio Climático.

1. Introducción

Uno de los desafíos actuales para la mitigación del riesgo de incendios forestales es pronosticar adecuadamente los cambios futuros en las condiciones de peligro. Entender dónde y cómo pueden cambiar los patrones de comportamiento del fuego en las próximas décadas es fundamental para elaborar estrategias y gestionar los recursos necesarios (SYPHARD et al., 2018). Hasta la fecha, los esfuerzos se han dedicado principalmente a predecir las condiciones de peligro (probabilidad de ocurrencia de un incendio de una intensidad y/o tamaños determinados) utilizando indicadores meteorológicos, sin tener en cuenta la dinámica de las comunidades vegetales y los combustibles (BARBERO et al., 2019; BEDIA et al., 2014). Pero, dejando de lado el factor humano, las interacciones clima-vegetación-fuego juegan un papel fundamental en la definición de los regímenes de incendios. Las variaciones climáticas pueden alterar los patrones y tipos de comunidades vegetales; a su vez, es la vegetación la que soporta el fuego, cuya incidencia también está condicionada por las fluctuaciones climáticas. Por lo tanto, la práctica común de omitir la dinámica de la vegetación introduce una incertidumbre significativa en las proyecciones basadas únicamente en modelos climáticos, ya que la humedad, la abundancia y la estructura del combustible son características clave detrás de la incidencia y el comportamiento del fuego (SYPHARD et al., 2018).

Las proyecciones climáticas apuntan un aumento de la temperatura y una reducción (o estancamiento) de las precipitaciones y, por tanto, una disminución de la humedad del combustible (FMC) en el futuro (BEDIA et al., 2014, 2015; VARELA et al., 2019), con el consecuente incremento

del peligro potencial. La mayoría de los estudios realizados en la región mediterránea se han centrado en comprender los impactos del cambio climático en el peligro meteorológico de incendio (CALHEIROS et al., 2021; LAHAYE et al., 2018), el comportamiento del fuego (MITSOPOULOS et al., 2016, p. 2; MOLINA et al., 2019; MORENO et al., 2014; RODRIGUES et al., 2020) o la dinámica de la vegetación (AMEZTEGUI et al., 2017; SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2021) por separado, siendo pocas las experiencias que han tenido en cuenta la interacción entre el clima, el fuego y la dinámica de la vegetación (DUANE et al., 2019; MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2021). Sin embargo, las condiciones climáticas no son las únicas variables que influyen en el comportamiento del fuego. Las características a nivel de bosque, rodal o árbol (abundancia y estructura de sotobosque, disposición de las ramas, estructura del dosel o fracción de cabida cubierta) pueden determinar el potencial de fuego de copas -considerado el patrón más peligroso de propagación- la tasa de propagación o la intensidad de quema (FLANNIGAN et al., 2016; KUCUK et al., 2007; SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2021, p.; SCOTT & BURGAN, 2005). En este sentido, la gestión forestal puede ayudar a aumentar la resiliencia de los bosques al cambio climático y a las perturbaciones adversas en general (COLL et al., 2021; DUANE et al., 2019; FERNANDES, 2013, p. 201; MORÁN-ORDÓÑEZ et al., 2020, 2021). Continuando el trabajo de MORÁN-ORDÓÑEZ et al. (2020), quienes analizaron cuatro estrategias de gestión forestal basadas en las políticas forestales de la UE y en las necesidades del sector forestal bajo dos trayectorias climáticas (RCP 4.5 y RCP 8.5), en el presente trabajo complementamos su evaluación sobre la provisión de servicios ecosistémicos a lo largo del siglo XXI incorporando estimaciones de peligro de incendio. Nuestro objetivo principal es el de comprender mejor las consecuencias del cambio climático sobre el comportamiento y la capacidad de atenuación mediante una gestión forestal proactiva.

2. Objetivos

El presente estudio avanza en la comprensión del comportamiento de los incendios mediante la evaluación de la dinámica de la velocidad de propagación del fuego y del potencial de iniciación de los incendios de copa, resultante de integrar la gestión forestal -basada en factores socioeconómicos y no en la reducción de los incendios bajo el cambio climático- en el periodo 2020-2100. Hemos simulado el comportamiento de los incendios bajo diversos escenarios de gestión forestal y climáticos para responder a las siguientes preguntas: (1) ¿Cómo puede evolucionar la humedad del combustible bajo los diferentes escenarios de cambio climático? (2) ¿Cuál es el papel de la gestión forestal en el comportamiento potencial de los incendios? (3) ¿Qué escenarios de gestión ayudarían a mitigar el riesgo de incendio?

3. Metodología

El trabajo se ha desarrollado en tres fases. La primera etapa incluye la definición de escenarios climáticos y de gestión forestal y su traducción en planes de tratamiento forestal. La segunda parte comprende la simulación de la estructura y dinámica forestal con el modelo SORTIE-ND v7.06 (<http://www.sortie-nd.org>). Estas dos etapas iniciales se tomaron del estudio de MORÁN-ORDÓÑEZ et al. (2020). La tercera y última parte se dedicó a la estimación de los parámetros relacionados con el contenido de humedad del combustible para luego simular el comportamiento del fuego, siendo éste el foco principal de nuestro estudio.

Para ello, se analizaron trayectorias de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) y los siguientes escenarios de dinámica forestal: (i) adaptación al cambio climático, (ii) promoción de la biomasa, (iii) almacenamiento de carbón y (iv) situación actual. Los escenarios de gestión forestal y los climáticos se tradujeron en planes de gestión forestal con la ayuda de expertos y propietarios locales. El resultado fue un plan de gestión forestal específico bajo cada escenario que incluye actividades que pueden ser implementadas en las simulaciones de la dinámica forestal con SORTIE-ND (claras, cortas de regeneración). Combinando la gestión forestal y las condiciones climáticas

proyectadas, contabilizamos ocho escenarios diferentes de gestión forestal que se simularon para el periodo 2001-2100. La gestión para la adaptación al cambio climático incluía actividades como claras tempranas y fuertes, que pretendían mejorar el vigor del árbol y su resistencia a los eventos de sequía extremos. La estrategia de promoción de la biomasa forestal se logró acortando los turnos (80-90 años) y realizando una o dos claras, en función de la trayectoria climática. En el caso del aumento de las reservas de carbono, la característica más importante fue la ampliación del turno (hasta 290 años, dependiendo del escenario climático). Las principales intervenciones de gestión forestal para la situación actual incluyen cortas selectivas (huroneo) cada 15 o 20 años.

Sobre la base de dichos escenarios (previamente simulados y caracterizados en MORÁN-ORDÓÑEZ et al. (2020) realizamos las estimaciones de los Códigos de Humedad del *Canadian Fire Weather Index* (FWI) como proxies del contenido de humedad del combustible, calculando los parámetros de la cubierta necesarios y, finalmente, simulando el comportamiento del fuego mediante el paquete *medfate* en R (DE CÁCERES et al., 2015; 2021). Se evaluó la dinámica del comportamiento del fuego en 143 masas puras de *Pinus nigra* en la comarca de El Solsonès (Cataluña central) utilizando los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN). Complementariamente, se aplicó un análisis de tendencias para guiar y sintetizar los cambios predichos en el comportamiento del fuego.

3.1. Estimación de la humedad del combustible

El contenido de humedad del combustible (FMC) es una de las variables más importantes en la modelización del comportamiento del fuego que afecta, entre otros factores, a la velocidad de propagación del fuego. Para capturar adecuadamente las condiciones de humedad es necesario estimar sus fracciones "viva" (aFMC) y "muerta" (dFMC) (DANSON & BOWYER, 2004). El dFMC y el aFMC se obtuvieron a partir del Contenido de Humedad del Combustible Fino (FFMC; *Fine Fuel Moisture Content*) y del Código de Sequía (DC; *Drought Code*) del FWI. En primer lugar, calculamos el FWI utilizando el paquete *cffdrs* en R (WANG et al., 2017). Los datos de entrada necesarios se obtuvieron de las proyecciones climáticas, incluyendo la precipitación diaria, la temperatura media, la humedad relativa, los datos de velocidad del viento y las coordenadas (latitud y longitud). Los cálculos de FWI (inicializados en 2015 para garantizar la estimación adecuada de DC) se repitieron para cada proyección climática. Los resultados incluyeron datos diarios para los 80 años (2020-2100), siendo posteriormente agregados anualmente como el percentil 97 de FWI, seleccionando los FFMC y DC correspondientes. La humedad del combustible fino muerto (dFMC) se calculó según WOTTON (2009):

$$dFMC_{litter}=147,2 * FFMC \quad (1)$$

donde FFMC es el percentil 97 de cada año. La dFMC para las fracciones herbácea, arbustiva y leñosa se calculó incrementando consecutivamente en un 1% el $dFMC_{litter}$ (MATTHEWS, 2014; NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP, 2021a).

El contenido de humedad del combustible vivo (aFMC) para los arbustos se calculó utilizando una ecuación desarrollada por Viegas et al. (2001)

$$aFMC=c (DC)^d \quad (2)$$

donde c y d son coeficientes de ajuste de ley de potencia para varios combustibles por VIEGAS et al. (2001). En este caso, se utilizaron los coeficientes de la especie de matorral más común sobre el área de estudio: *Rosmarinus officinalis*, cuyos valores fueron $c = 771,8$ y $d = -0,343$. Se asumió que la cobertura de arbustos era igual a la cobertura del dosel (NATIONAL WILDFIRE COORDINATING

GROUP, 2021b) mientras que la cobertura de herbáceas requería restar un 30% (SCOTT & BURGAN, 2005).

3.2. Simulación del comportamiento del fuego

Los cálculos del comportamiento del fuego se realizaron utilizando el paquete *medfate* (DE CÁCERES et al., 2015, 2021). El paquete incluye las funciones necesarias para estimar las características de combustible por estrato. Tanto las características del combustible como los procesos de comportamiento del fuego se basan en una modificación del Sistema de Clasificación de Características del Combustible (FCCS) descrito por Prichard et al. (2013). Una de las principales diferencias con respecto al FCCS original es que en *medfate* los tipos de combustible se dividen en cinco estratos (dosel, arbustos, vegetación herbácea, materiales leñosos y hojarasca), mientras que el FCCS también incluye los combustibles del suelo (De Cáceres et al., 2021). Las características de los combustibles se modelizaron a partir de los resultados de la dinámica forestal anual obtenidos de SORTIE-ND. Asimismo, los datos sobre el contenido de humedad del combustible y la velocidad del viento se obtuvieron de las proyecciones climáticas.

Se realizaron simulaciones anuales del comportamiento de los incendios forestales para los ocho escenarios de gestión forestal y de proyección climática en las 143 parcelas de la región de estudio durante un periodo de 80 años (2020-2100). De la amplia gama de resultados que proporciona *medfate* (por ejemplo, la longitud de llama, la tasa de propagación, la intensidad del frente de llamas y el índice de probabilidad de fuego de copa), seleccionamos la tasa de propagación del fuego de copa (ROS, *rate of spread*; m min⁻¹) y el índice de probabilidad de fuego de copa (CFII, *crown fire initiation index*; 0-9, adimensional). El ROS es un indicador clave de la peligrosidad de los incendios forestales y de la capacidad de extinción (cuanto más bajo sea el ROS mayor será la posibilidad de contener un incendio) y muestra una estrecha relación con la intensidad del fuego y la geometría del frente de llamas (PASTOR et al., 2006). El índice de probabilidad de incendios de copa nos permite comprender mejor la probabilidad de experimentar un evento de incendio de copa.

3.3. Análisis estadístico

Posteriormente llevamos a cabo un análisis de tendencias sobre las series anuales de comportamiento del fuego para simplificar la interpretación y evaluar su dinámica temporal. Abordamos la evolución temporal utilizando la prueba de Mann-Kendall (MK) (KENDALL, 1975; MANN, 1945) para determinar si existían tendencias significativas en las proyecciones de, FFMC, DC, ROS y CFII. La pendiente de Sen (Sen, 1968) se utilizó para completar la información del MK determinando la inclinación de la pendiente de la tendencia monotónica, cuantificando así el grado de cambio y permitiendo la comparación de tendencias. Como entrada a estos análisis estadísticos introdujimos los valores medios anuales de todas las parcelas para todas las variables excepto para CFII, para el que se utilizó la mediana. Todos los procedimientos estadísticos y los gráficos se desarrollaron utilizando el lenguaje de programación estadística R (R CORE TEAM & R DEVELOPMENT TEAM CORE, 2021).

4. Resultados

4.1. Tendencias climáticas y de humedad el combustible

Las trayectorias climáticas bajo los RCP 4.5 y 8.5 son marcadamente distintas (Tabla 1). La temperatura muestra una clara tendencia al calentamiento, siendo especialmente intenso en el RCP 8.5. Se prevé que la precipitación media anual y la humedad relativa muestren una tendencia a la

baja. Una vez más, el cambio más pronunciado se prevé con el RCP 8.5. La velocidad del viento es el único factor climático que permanecería estable independientemente del escenario climático.

Estas tendencias climáticas se traducen en condiciones meteorológicas cada vez más peligrosas en términos de humedad del combustible (Figura 1). Se espera que las tasas de FFMCI y DC aumenten bajo cualquiera de los escenarios climáticos. En el RCP 4.5 ambos componentes del FWI aumentan hasta mediados de siglo, seguidos de un paréntesis de aproximadamente 40 años (hasta alrededor de 2080) pero aumentando de nuevo hacia el 2100. El RCP 8.5 muestra un aumento constante y sostenido a lo largo del siglo, alcanzando condiciones de peligro muy alto en 2100 ($FFMC \geq 93$ y $DC \geq 794,5$ según el Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales, EFFIS). En consecuencia, las tendencias temporales en los componentes de humedad del FWI son significativas ($p < 0,05$) sólo bajo las condiciones previstas en el RCP 8.5.

Tabla 1. Resultados de la prueba de la pendiente de Mann-Kendall y Sen para una tendencia lineal en el periodo 2020-2100 sobre el área de estudio para los valores medios anuales de variables climáticas y de humedad del combustible DC y FFMCI. Color rojo indica tendencia positiva significativa $p < 0,05$; Color azul indica tendencia negativa significativa $p < 0,05$.

	Temperatura (°C)		Precipitación (mm)		Velocidad de viento (km/h)		Humedad relativa (%)		DC		FFMC	
RCP	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
MK (p-valor)	<0.01	<0.01	0.71	0.02	0.14	0.27	0.15	<0.01	0.96	0.01	0.40	<0.01
Sen	0.02	0.050	0.33	-1.76	-0.01	-0.01	-0.01	-0.08	0.03	2.12	0.01	0.03

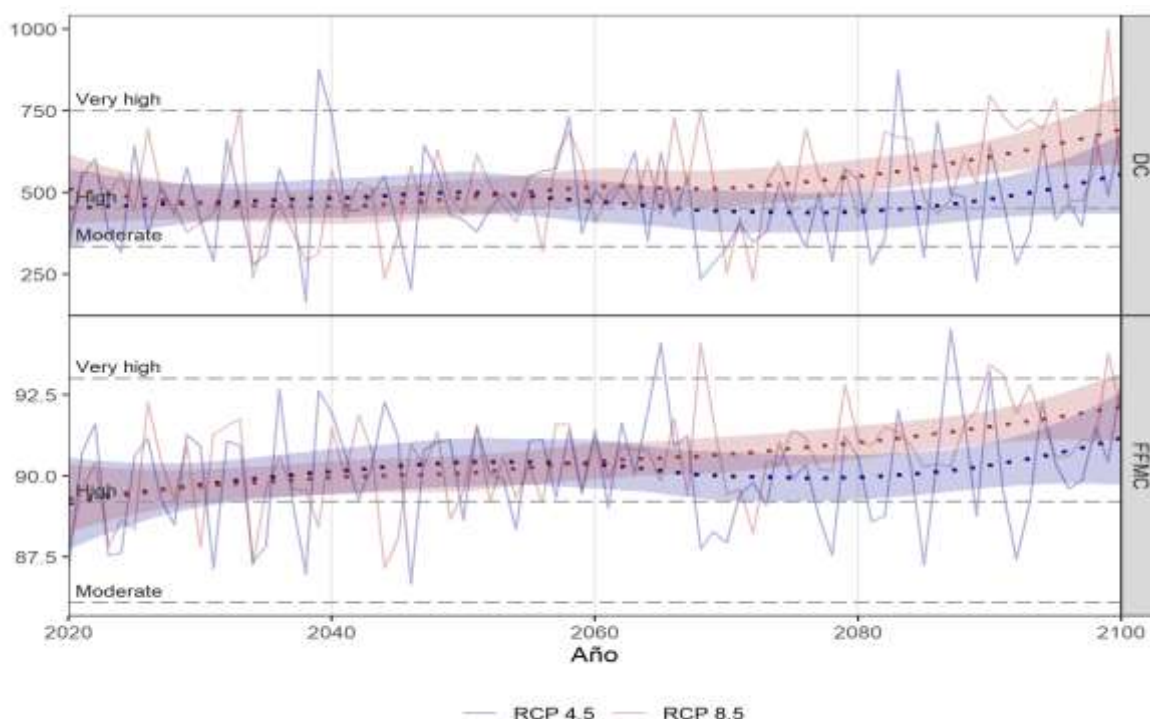


Figura 1. Cambios proyectados en la media anual de DC y FFMCI sobre el área de estudio para el periodo 2020-2100 bajo RCP 4.5 y RCP 8.5. Las líneas claras sólidas representan los valores medios de todas las parcelas; las líneas sólidas representan la tendencia con el enfoque de suavización de dispersión estimada localmente (LOESS); el halo transparente

delinea el rango de variabilidad del perfil LOESS; las líneas punteadas indican los umbrales de peligro de incendio para FFMC y DC según el EFFIS.

Trayectorias de comportamiento del fuego

Los índices de probabilidad de incendios de copa son similares para todas las alternativas de gestión al principio del periodo de estudio (año 2020), divergiendo después de 2040 y haciéndose cada vez más diferentes desde mediados de siglo para ciertos escenarios (Figura 2). Bajo ambas trayectorias climáticas, el escenario de "biomasa" alcanzaría las mayores tasas de CFII, situándose incluso por encima de la situación "actual". El escenario de gestión con las tasas más bajas difiere entre los escenarios de emisión de CO₂. En el caso del RCP 4.5, el escenario de "carbono" presenta el menor potencial, seguido por el de "adaptación", intercambiando posiciones en el RCP 8.5. Sin embargo, cabe señalar que el CFII en el escenario de "adaptación" muestra un aumento repentino después de 2080 que no se prevé para el de "carbono". No obstante, en ambos casos se espera una tendencia decreciente y significativa ($p < 0,05$). En el escenario "actual", el CFII permanece estable independientemente del RCP (Tabla 2).

Las predicciones para el ROS de los incendios de copa difieren en función de la gestión forestal y los escenarios climáticos (Fig. 2). Para ambas vías climáticas, los valores más altos de ROS se dan en el escenario "actual" mientras que los valores absolutos más bajos se obtuvieron para "biomasa". El escenario menos peligroso en el RCP 8.5 alterna entre la o promoción de la "biomasa" y la "adaptación", siendo este último más eficiente hacia el final del siglo. La tasa de ROS de incendios de copas en la alternativa de almacenamiento de "carbono" varía significativamente entre RCPs. Bajo el RCP 4.5 se mantiene cerca de "adaptación" (igual que lo esperado en el CFII), pero bajo el RCP 8.5 mostraría un aumento sostenido que pasaría de 17 m/min en 2020 a 25 m/min en 2100, siendo el más cercano a las condiciones de la situación "actual". El análisis de tendencias indica que el RCP 4.5 puede considerarse invariable independientemente del escenario, aunque la situación sería muy diferente bajo el RCP 8.5 (Tabla 2), en el que todos los escenarios prevén una tendencia creciente salvo el de "adaptación" que apunta a una disminución constante del ROS.

La consideración conjunta de CFII y ROS revela que la gestión para "adaptación" es la alternativa más segura en términos de mitigación del peligro de incendio (Figura 3). Este escenario proporciona un buen equilibrio entre la disminución del potencial de fuego de copa y el mantenimiento del ROS no sólo bajo sino decreciente a lo largo del siglo. Bajo el RCP 4.5 se acerca al almacenamiento de "carbono" e incluso puede considerarse más eficiente que la "biomasa", que es más alta en términos de CFII, pero más baja en ROS. Sin embargo, bajo el RCP 8.5 es claramente el mejor candidato ya que minimiza ambas métricas. En términos de variabilidad temporal es el más estable, lo que garantiza que la producción de fuego no escalará ni alcanzará su punto máximo en ningún momento. No obstante, cualquier escenario de gestión mejoraría la situación "actual".

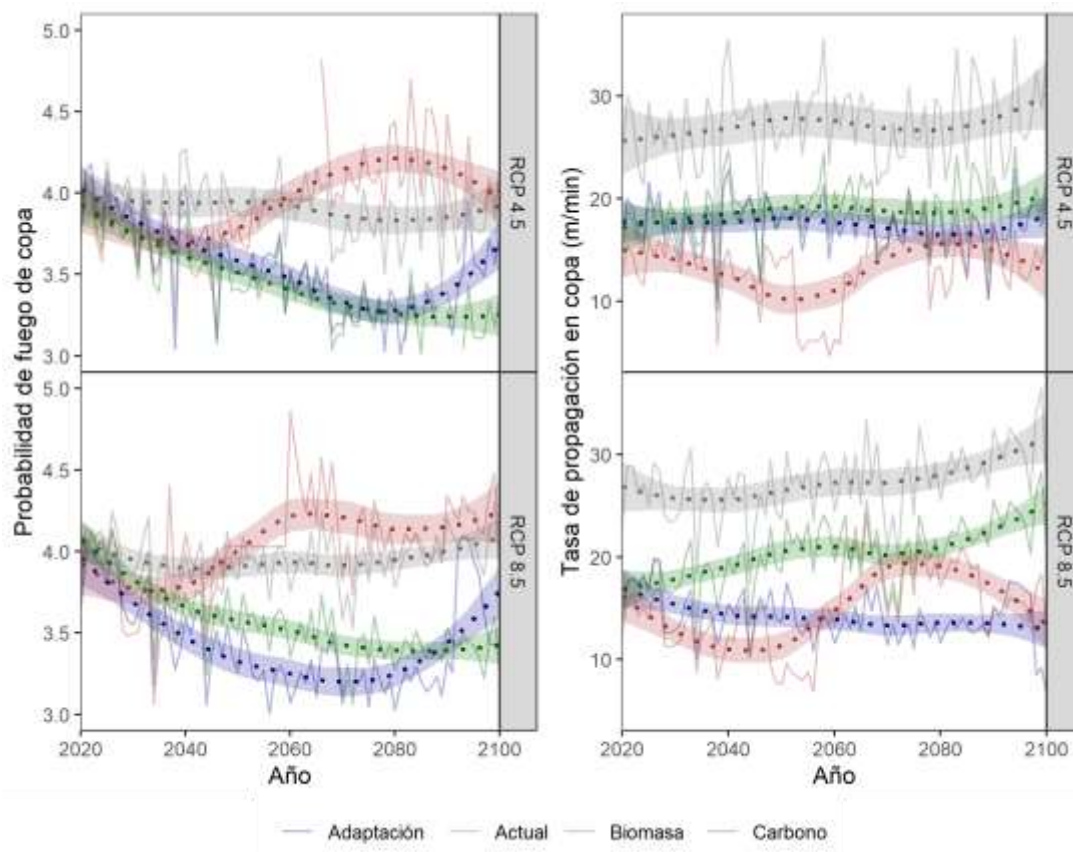


Figura 2. Cambios previstos en el comportamiento del fuego. Izquierda: índice medio anual de iniciación de probabilidad de fuego de copa. Derecha: índice medio anual de propagación de incendios de copa. Las líneas continuas representan los valores medios de todas las parcelas; las líneas punteadas representan la tendencia con el enfoque de suavización de dispersión estimada localmente (LOESS); el halo transparente delinea el rango de variabilidad del perfil LOESS.

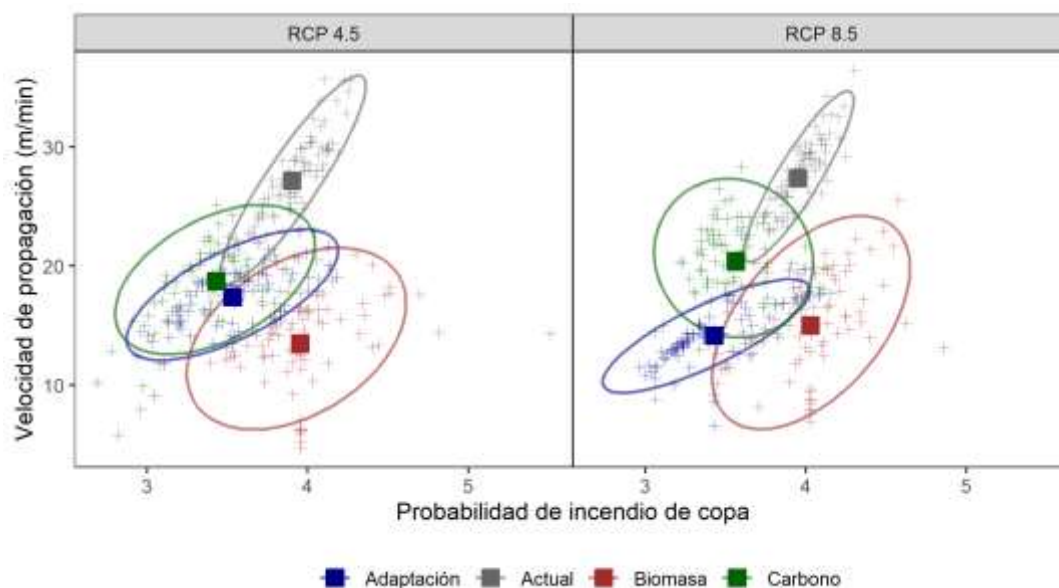


Figura 3. Comparación de alternativas de gestión bajo los escenarios de concentración de emisiones RCP 4.5 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha) en función del índice de probabilidad de incendio de copas y la velocidad de propagación.

Tabla 2. Resultados de la prueba de la pendiente de Mann-Kendall y Sen para una tendencia lineal en el periodo 2020-2100 en la zona de estudio para la mediana anual del índice de iniciación de incendios de copa y el índice de propagación de incendios de copa por escenario de gestión forestal y RCP. Color rojo indica tendencia positiva significativa $p < 0,05$; Color azul indica tendencia negativa significativa $p < 0,05$.

Parámetro	RCP	Escenario gestión	MK p-valor	Sen
Índice de probabilidad de incendio de copa	RCP 4.5	Adaptación	<0.001	-0.008
		Actual	0.067	0.067
		Biomasa	0.001	0.006
		Carbono	<0.001	-0.009
	RCP 8.5	Adaptación	<0.001	-0.009
		Actual	0.269	0.0007
		Biomasa	0.001	0.006
		Carbono	<0.001	-0.007
Velocidad de propagación (m/min)	RCP 4.5	Adaptación	0.262	-0.014
		Actual	0.217	0.024
		Biomasa	0.441	0.012
		Carbono	0.130	0.021
	RCP 8.5	Adaptación	0.015	-0.029
		Actual	<0.001	0.059
		Biomasa	<0.001	0.063
		Carbono	<0.001	0.081

5. Discusión

Este estudio propone y ejemplifica un marco de modelización integrador que considera la influencia del clima, la dinámica forestal y la gestión en el comportamiento de los incendios forestales. Los escenarios de gestión forestal analizados se basan en las estrategias forestales de la UE para las necesidades futuras del sector forestal. Nuestra metodología puede ayudar a identificar y comprender cómo funcionan las estrategias de gestión para, en última instancia, encontrar el mejor enfoque que tenga en cuenta las necesidades futuras de los bosques y que, al mismo tiempo, mantenga nuestros bosques resilientes frente a perturbaciones y cambio climático.

Los planes de gestión forestal poseen un gran potencial para modular los cambios inducidos por el clima en la dinámica de la vegetación y, por tanto, en el comportamiento de los incendios. Una gestión forestal adecuada puede reducir la velocidad de propagación (JOHNSTON et al., 2021; PALMERO-INIESTA et al., 2017; PIQUÉ & DOMÈNECH, 2018), aunque su eficacia depende de varios factores, como la intensidad del tratamiento (COCHRANE et al., 2012) o la interacción con el sotobosque (MADRIGAL et al., 2017). Nuestros resultados apoyan la gestión forestal como un factor clave en la iniciación de los incendios de copa, trazando trayectorias desiguales en función de la alternativa de gestión. La reducción de la espesura mediante claras fuertes parece ser la estrategia más eficaz. Los escenarios que implementan dicho tratamiento con la suficiente intensidad (por ejemplo, los de "adaptación" y "biomasa") alcanzan el mayor potencial para reducir la actividad de los incendios de copa (JOHNSTON et al., 2021). Sin embargo, tal y como demostraron CRUZ et al. (2014), el potencial de fuego de copa depende sobre todo de la altura de la base del dosel (es decir, el espacio entre el sotobosque y el dosel), lo que puede explicar algunas de las diferencias entre los escenarios (CARVALHO et al., 2010). Por otra parte, el estrato arbustivo determina en gran medida la inflamabilidad, la cantidad de combustible, el ROS en superficie y el potencial de coronación a través de las escaleras de combustible. Sin embargo, este estudio no pudo incluir la dinámica de los arbustos al no ser soportada por la versión actual de SORTIE. Por lo tanto, la composición y la estructura de los arbustos se mantuvieron constantes a lo largo de todo el estudio, lo cual es una suposición poco realista. Por lo tanto, reconocemos que hay margen de mejora en la determinación del CFII.

La vía de emisión de carbono ejerce una gran influencia en la velocidad de propagación (ROS). Bajo el RCP 8.5 la influencia de la gestión forestal fue especialmente clara y cada escenario de gestión siguió su propia trayectoria. Sin embargo, la "adaptación" fue el único escenario que redujo el ROS de los incendios de copa durante todo el periodo de simulación. JIMÉNEZ et al. (2016) descubrieron que el valor del ROS de la copa se reduce tras aplicar un tratamiento silvícola (en los montes del Teleno; León, España), pero su efecto solo duró entre 3 y 5 años. Esto sugiere que la gestión aplicada para la "adaptación" puede perdurar durante más tiempo. Por el contrario, los ROS de copa más elevados se obtuvieron en el escenario de mantenimiento de la situación "actual", seguido del almacenamiento de "carbono", mientras que la "adaptación" y la "biomasa" tuvieron los valores más bajos (RCP 8.5). Asimismo, los tratamientos que interrumpen la continuidad horizontal del dosel pueden limitar el ROS de la copa o proporcionar una oportunidad de extinción (ÁLVAREZ et al., 2012). Los escenarios "actual" y "carbono" implican cortas de menor intensidad y frecuencia, que pueden conducir a una mayor continuidad horizontal del bosque. En particular, el escenario "actual" comprende cortas por huroneo cada 15 o 20 años, lo cual fomenta una alta continuidad de la masa en todo momento. Por otro lado, la "adaptación" y la producción de "biomasa" implican claras más intensas y tempranas, conduciendo los rodales hacia estructuras de baja densidad, dificultando así la propagación de los incendios en el dosel.

6. Conclusiones

Según nuestras estimaciones la temperatura seguirá aumentando hasta final de siglo, mientras que tanto la humedad relativa como las precipitaciones probablemente disminuirán. En estas condiciones, se espera que el contenido de humedad de los combustibles disminuya, empeorando las condiciones de peligro de incendio. La gestión forestal puede modular dichas condiciones conduciendo a futuros muy diferentes en función del objetivo a alcanzar (promoción de la biomasa, adaptación al cambio o almacenamiento de carbono). En general, el mantenimiento de las prácticas actuales daría lugar a las mayores tasas de actividad de los incendios de copa. Nuestros resultados subrayan la importancia de diseñar un plan de gestión adecuado y evidencian cómo centrarse en una narrativa forestal concreta puede llevar a situaciones muy contrastadas. La contabilización conjunta de CFII y ROS revela que la "adaptación" es la alternativa de gestión más sólida debido a su capacidad para minimizar y reducir la iniciación de fuego de copa al tiempo que se mantiene la velocidad de propagación no sólo más baja, sino decreciente a lo largo del siglo.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos UMBRACLIM "Caracterización de umbrales climáticos para la dinámica de la regeneración post-incendio en pinares mediterráneos" (PID2019-111781RB-I00) y FIREPATHS "Trayectorias de peligro de incendio bajo escenarios de cambio climático y de gestión" (PID2020-116556RA-I00),

8. Bibliografía

- ÁLVAREZ, A.; GRACIA, M.; RETANA, J.; 2012. Fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests. *Eur J Forest Res* 131, 463–474.
- AMEZTEGUI, A.; CABON, A.; DE CÁCERES, M.; COLL, L.; 2017. Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: A modelling approach. *Ecol Modell* 356, 141–150.
- BARBERO, R.; CURT, T.; GANTEAUME, A.; MAILLÉ, E.; JAPPIOT, M.; BELLET, A.; 2019. Simulating the effects of weather and climate on large wildfires in France. *Nat Hazard Earth Sys* 19, 441–454.

BEDIA, J.; HERRERA, S.; CAMIA, A.; MORENO, J.M.; GUTIÉRREZ, J.M.; 2014. Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change* 122, 185–199

C3S, 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).

CALHEIROS, T.; PEREIRA, M.G.; NUNES, J.P.; 2021. Assessing impacts of future climate change on extreme fire weather and pyro-regions in Iberian Peninsula. *Sci Total Environ* 754, 142233.

CARVALHO, A.; FLANNIGAN, M.D.; LOGAN, K.A.; GOWMAN, L.M.; MIRANDA, A.I.; BORREGO, C.; 2010. The impact of spatial resolution on area burned and fire occurrence projections in Portugal under climate change. *Climatic Change* 98, 177–197.

COCHRANE, M.A.; MORAN, C.J.; WIMBERLY, M.C.; BAER, A.D.; FINNEY, M.A.; BECKENDORF, K.L.; EIDENSHINK, J.; ZHU, Z.; 2012. Estimation of wildfire size and risk changes due to fuels treatments. *Int. J. Wildland Fire* 21, 357. .

CRUZ, M.; ALEXANDER, M.; DAM, J.; 2014. Using Modeled Surface and Crown Fire Behavior Characteristics to Evaluate Fuel Treatment Effectiveness: A Caution. *For Sci* 60.

DANSON, F.M.; BOWYER, P.; 2004. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sens Environ* 92, 309–321. .

DE CÁCERES, M.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; COLL, L.; LLORENS, P.; CASALS, P.; POYATOS, R.; PAUSAS, J.G.; BROTONS, L.; 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. *Agr Forest Meteorol* 213, 77–90.

DE CÁCERES, M.; MENCUCCINI, M.; MARTIN-STPAUL, N.; LIMOUSIN, J.-M.; COLL, L.; POYATOS, R.; CABON, A.; GRANDA, V.; FORNER, A.; VALLADARES, F.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 2021. Unravelling the effect of species mixing on water use and drought stress in Mediterranean forests: A modelling approach. *Agr Forest Meteorol* 296, 108233.

DUANE, A.; AQUILUÉ, N.; CANELLES, Q.; MORÁN-ORDOÑEZ, A.; DE CÁCERES, M.; BROTONS, L.; 2019. Adapting prescribed burns to future climate change in Mediterranean landscapes. *Sci Total Environ* 677, 68–83.

JIMÉNEZ, E.; VEGA-NIEVA, D.; REY, E.; FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J.A.; 2016. Midterm fuel structure recovery and potential fire behaviour in a *Pinus pinaster* Ait. forest in northern central Spain after thinning and mastication. *Eur J Forest Res* 135, 675–686.

JOHNSTON, J.D.; OLSZEWSKI, J.H.; MILLER, B.A.; SCHMIDT, M.R.; VERNON, M.J.; ELLSWORTH, L.M.; 2021. Mechanical thinning without prescribed fire moderates wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. *Forest Ecol Manag* 501, 119674.

JURDAO, S.; CHUVIECO, E.; AREVALILLO, J.M.; 2012. Modelling Fire Ignition Probability from Satellite Estimates of Live Fuel Moisture Content. *Fire Ecol* 8, 77–97.

KENDALL, M.G.; 1975. Rank correlation methods, 4th ed. London.

LAHAYE, S.; CURT, T.; FRÉJAVILLE, T.; SHARPLES, J.; PARADIS, L.; HÉLY, C.; 2018. What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *Int. J. Wildland Fire* 27, 155.

MADRIGAL, J.; FERNÁNDEZ-MIGUELÁÑEZ, I.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; VEGA-NIEVA, D.J.; TOLOSANA, E.; 2017. Does forest biomass harvesting for energy reduce fire hazard in the Mediterranean basin? a case study in the Caroig Massif (Eastern Spain). *Eur J Forest Res* 136, 13–26.

MANN, H.B.; 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13, 245–259.

MATTHEWS, S.; 2014. Dead fuel moisture research: 1991–2012. *Int. J. Wildland Fire* 23, 78.

MITSOPOULOS, I.; MALLINIS, G.; KARALI, A.; GIANNAKOPOULOS, C.; ARIANOUTSOU, M.; 2016. Mapping fire behaviour under changing climate in a Mediterranean landscape in Greece. *Reg Environ Change* 16, 1929–1940.

MOLINA, J.R.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2019. Potential Effects of Climate Change on Fire Behavior, Economic Susceptibility and Suppression Costs in Mediterranean Ecosystems: Córdoba Province, Spain. *Forests* 10, 679.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; AMEZTEGUI, A.; DE CÁCERES, M.; DE-MIGUEL, S.; LEFÈVRE, F.; BROTONS, L.; COLL, L.; 2020. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosyst Serv* 45, 101174.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; RAMSAUER, J.; COLL, L.; BROTONS, L.; AMEZTEGUI, A.; 2021. Ecosystem services provision by Mediterranean forests will be compromised above 2°C warming. *Glob Change Biol* 27, 4210–4222.

MORENO, M.V.; CONEDERA, M.; CHUVIECO, E.; PEZZATTI, G.B.; 2014. Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environ Sci Policy* 37, 11–22.

NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP, 2021a. Dead Fuel Moisture.

NATIONAL WILDFIRE COORDINATING GROUP, 2021b. Live Fuel Moisture.

PALMERO-INIESTA, M.; DOMÈNECH, R.; MOLINA-TERRÉN, D.; ESPELTA, J.M.; 2017. Fire behavior in *Pinus halepensis* thickets: Effects of thinning and woody debris decomposition in two rainfall scenarios. *Forest Ecol Manag* 404, 230–240.

PASTOR, E.; ÀGUEDA, A.; ANDRADE-CETTO, J.; MUÑOZ, M.; PÉREZ, Y.; PLANAS, E.; 2006. Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing. *Fire Safety J* 41, 569–579.

PIQUÉ, M.; DOMÈNECH, R.; 2018. Effectiveness of mechanical thinning and prescribed burning on fire behavior in *Pinus nigra* forests in NE Spain. *Sci Total Environ* 618, 1539–1546.

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 (No. PNW-GTR-887). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.

R DEVELOPMENT TEAM CORE, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

RODRIGUES, M.; JIMÉNEZ-RUANO, A.; DE LA RIVA, J.; 2020. Fire regime dynamics in mainland Spain. Part 1: Drivers of change. *Sci Total Environ* 721, 135841.

SÁNCHEZ-PINILLOS, M.; CÁCERES, M.D.; CASALS, P.; ALVAREZ, A.; BELTRÁN, M.; PAUSAS, J.G.; VAYREDA, J.; COLL, L.; 2021. Spatial and temporal variations of overstory and understory fuels in Mediterranean landscapes. *Forest Ecol Manag* 490, 119094.

SCOTT, J.H.; BURGAN, R.E.; 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model (No. RMRS-GTR-153). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ft. Collins, CO.

SEN, P.K.; 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall ' s Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379–1389.

SYPHARD, A.D.; SHEEHAN, T.; RUSTIGIAN-ROMSOS, H.; FERSCHWEILER, K.; 2018. Mapping future fire probability under climate change: Does vegetation matter? *PLoS ONE* 13, 1–23.

VIEGAS, D.X.; PIÑOL, J.; VIEGAS, M.T.; OGAYA, R.; 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *Int. J. Wildland Fire* 10, 223.

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. *Ecol Process* 6, 5.

WOTTON, B.M.; 2009. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environ Ecol Stat* 16, 107–131.