



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



Variación espacio-temporal de las propiedades del combustible vivo en Cataluña durante los últimos 25 años

SÁNCHEZ-PINILLOS, M.¹, DE CÁCERES, M.², CASALS, P.³, ÁLVAREZ, A.², BELTRÁN, M.³, PAUSAS, J. G.⁴, VAYREDA, J.² y COLL, L.^{3,5}

¹ ISEM – Univ. Montpellier – CNRS.

² Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF).

³ Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC).

⁴ Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE-CSIC).

⁵ Departament d'Enginyeria Agroforestal (EAGROF). Universitat de Lleida (UdL).

Resumen

A pesar del amplio conocimiento sobre la vulnerabilidad de los bosques mediterráneos a incendios, la variación espacial y temporal de los combustibles sigue siendo una cuestión raramente estudiada. En este estudio, partimos de la hipótesis de que la sensibilidad de los bosques al fuego responde principalmente a la variación en la carga de combustible e inflamabilidad del sotobosque a través del paisaje y a lo largo del tiempo. A partir de la información del Inventario Forestal Nacional, cuantificamos distintas propiedades del combustible, comparamos su variación espacio-temporal en Cataluña en los últimos 25 años y evaluamos el papel del clima en dicha distribución espacial y dinámica temporal. Nuestros resultados mostraron que la inflamabilidad del combustible es fuertemente dependiente de la composición del dosel arbóreo y el sotobosque. Ambos estratos mostraron propiedades significativamente diferentes y poco correlacionadas, así como tasas de cambio muy distintas. Los bosques con mayor inflamabilidad se localizaron en las regiones más secas. Sin embargo, las condiciones climáticas no mostraron una influencia significativa en su tasa de cambio. Estos resultados confirman la importancia de la variación espacio-temporal del combustible independientemente para distintos estratos y aporta información crítica para el desarrollo de planes de prevención de incendios en el Mediterráneo.

Palabras clave

Incendios, inflamabilidad, combustibles de superficie, combustibles de copa, clima.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, muchos ecosistemas forestales están experimentando un aumento en la frecuencia, severidad y superficie quemada como consecuencia de una intensificación de los períodos secos y los cambios de usos a escala de paisaje (PAUSAS & KEELEY, 2014; WESTERLING et al., 2011). Entre los factores que afectan el comportamiento del fuego y, por tanto, la vulnerabilidad de los bosques a incendios, resulta fundamental entender el papel de las variaciones espaciales y temporales de las características de los combustibles forestales (KEANE, 2016). En este sentido, la distribución y características de la biomasa vegetal son los principales factores que determinan los procesos de combustión y pueden ser modificados a través de la gestión forestal.

En los bosques mediterráneos, muchas especies vegetales presentan rasgos morfológicos y fisiológicos que los hacen fácilmente inflamables (SAURA-MAS & LLORET, 2007). Además, la estructura del rodal juega un papel fundamental en el comportamiento del fuego, tanto en su avance a través del paisaje como en el paso de fuegos de superficie a copas. Aunque el fuego constituye un elemento intrínseco de los sistemas forestales mediterráneos, la carga, condición y estructura de los combustibles pueden ser altamente diversos. Así pues, según la combinación de especies y la estructura en los distintos estratos de vegetación, el riesgo de incendio puede variar enormemente a

través del paisaje (dependiendo del clima, factores medioambientales, los usos del suelo y la actividad antrópica) y a lo largo del tiempo (en función de la dinámica forestal) (DIMITRAKOPoulos, 2002; NUNES et al., 2019).

Aunque muchos estudios científicos han abordado los efectos de la composición y estructura del dosel arbóreo y el sotobosque en el riesgo de incendios por separado, pocos estudios hasta la fecha han evaluado en detalle las variaciones geográficas o temporales de las características de los combustibles en ambos estratos, ignorando la influencia que distintas combinaciones dosel-sotobosque pueden tener en el riesgo de incendio y su potencial uso para cartografiar las características del combustible.

2. Objetivos

En este estudio, evaluamos la variación espacial y temporal de los combustibles forestales en el sotobosque (vegetación leñosa con una altura inferior a 2 m) y el estrato arbóreo (vegetación leñosa de más de 2 m de altura) de los bosques más comunes en Cataluña.

En particular, nuestros objetivos fueron los siguientes:

1. Evaluar si las características del sotobosque y del estrato arbóreo están significativamente correlacionadas.
2. Evaluar si la variación espacial y temporal de las características del combustible difiere entre los estratos de sotobosque y dosel arbóreo.
3. Estudiar el papel de las condiciones climáticas en la variación de las características del combustible y sus cambios en el tiempo.

3. Metodología

Área de estudio y fuente de datos

Nuestra área de estudio comprende la superficie forestal de Cataluña (13.080 km²). Se trata de un área muy influenciada por la actividad humana a lo largo de la historia y muy heterogénea en cuanto sus características topográficas, edáficas y climáticas. Esta heterogeneidad da lugar a un amplio rango de formaciones forestales representativas de la cuenca mediterránea. Entre las especies arbóreas más abundantes destacan el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y la encina (*Quercus ilex* L.) en las zonas más secas; el alcornoque (*Q. suber* L.) en zonas silíceas del noreste; el roble pubescente (*Q. pubescens* Willd.), el quejigo (*Q. faginea* Lam.), el pino salgareño (*P. nigra* ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) y el pino silvestre (*P. sylvestris* L.) en áreas de media montaña; el haya (*F. sylvatica* L.) en las zonas más húmedas; y el pino negro (*P. uncinata* Mill.) en las altitudes más elevadas. Entre las especies que abundan en el sotobosque destacan el lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), la coscoja (*Q. coccifera* L.), el durillo (*Viburnum tinus* L.), distintas especies de brezo (*Erica* sp. pl.), *Lamiaceae* y *Cistaceae* en las zonas más secas; enebros (*Juniperus communis* L.), boj (*Buxus sempervirens* L.), el guillomo (*Amelanchier ovalis* Medik.), el sanguino (*Cornus sanguinea* L.) y el barbadejo (*V. lantana* L.) en zonas de media montaña; y el rododendro (*Rhododendron ferrugineum* L.) y el piorno serrano (*Cytisus oromediterraneus* Rivas Mart. et al.) en alta montaña.

Como fuente de datos utilizamos las parcelas permanentes del Inventario Forestal Nacional (IFN) en Cataluña (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1996, 2007; MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2019)(MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2019; MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2007, 1996). En concreto, para evaluar los patrones espaciales, seleccionamos 6.633 parcelas del IFN3 que presentaban estratos de sotobosque y dosel arbóreo de acuerdo a nuestra definición (Figura 1), descartando las parcelas afectadas por perturbaciones naturales y antrópicas severas durante los años de muestreo. Para

evaluar la variación temporal de los combustibles, utilizamos una subselección de 2.856 parcelas muestreadas en los inventarios 2, 3 y 4 (**Figura 1**).

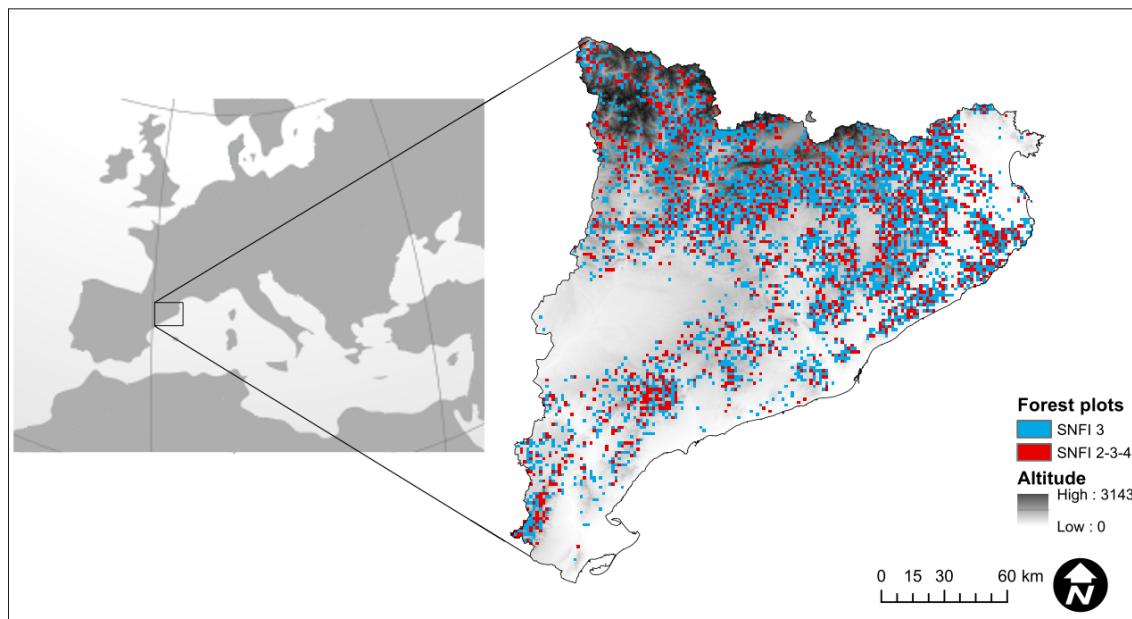


Figura 1. Distribución de las parcelas permanentes del IFN en Cataluña utilizadas para evaluar la variación espacial y temporal de las características del combustible forestal.

Características de combustible, categorías forestales y factores climáticos

Para cada parcela y estrato, consideramos distintas características de la vegetación en función de su relevancia como combustibles y la disponibilidad de datos para calcularlas. En concreto, estimamos la carga de combustible fino (w ; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) a partir de la biomasa de hojas y ramillas de un diámetro inferior a 6,35 mm; la densidad aparente (bd , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), calculada como el ratio entre la biomasa de combustible y el volumen ocupado por cada estrato de vegetación; el ratio entre la superficie y el volumen (σ ; $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$) fue obtenido a partir de fuentes bibliográficas y se trata de un indicador de la superficie de la vegetación disponible para el intercambio de calor durante un incendio; el poder calorífico (h ; $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el contenido mínimo de humedad (FMC ; % peso seco) también fueron obtenidos mediante recursos bibliográficos, complementando la información de FMC con datos recogidos en muestreos de campo; y la diferencia entre la altura del sotobosque y la parte más baja del dosel arbóreo ($uc gap$; m) (ver más detalles en SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2021).

Las parcelas del IFN seleccionadas fueron clasificadas independientemente en función de su composición específica del dosel arbóreo y el sotobosque para facilitar la interpretación de la variación espacial y temporal en la composición específica en ambos estratos. En el caso del dosel, definimos tipologías forestales en función de la dominancia de especies medida en su área basimétrica y densidad relativas. Entre las 51 tipologías definidas, 12 correspondieron a rodales dominados por una especie, destacando por tener más parcelas las masas dominadas por pinares de pino negro, silvestre, salgareño y carrasco, los hayedos, robledales de roble pubescente, alcornocales y encinares.

Para clasificar las parcelas según su sotobosque aplicamos el algoritmo de partición en torno a medoides a una matriz de disimilaridades de Bray Curtis, obteniendo nueve clases: formaciones subalpinas de matorral almohadillado y brezos, formaciones mesófilas sub-mediterráneas, comunidades xerófilas continentales y mediterráneas, comunidades xero-mesófilas continentales y

mediterráneas, formaciones mesófilas, brezales silíceos y un grupo mixto de especies eurosiberianas y mediterráneas.

Entre las variables climáticas consideradas para explicar la variación espacial y temporal de las características de combustible, utilizamos la temperatura media mensual y la precipitación media anual.

Análisis espaciales y temporales de las características de combustible

Para evaluar la relación entre las características de combustible en ambos estratos utilizamos el test no paramétrico de Wilcoxon y el análisis de correlación de Spearman. Un análisis de componentes principales (PCA) fue utilizado para evaluar las correlaciones entre las características del combustible dentro de un mismo estrato de vegetación (i.e. dosel o sotobosque) y entre ambos estratos (e.g. entre la carga de combustible fino en el sotobosque y el dosel). La influencia de las condiciones climáticas en las características de combustible fue evaluada a través de un análisis de redundancia (RDA). Por último, calculamos el ratio de cambio de cada variable de combustible a lo largo de los 25 años entre el IFN2 y el IFN4 y utilizamos un PCA y un RDA de manera análoga a lo descrito anteriormente para las variables estáticas.

4. Resultados

Variación espacial de las características de combustible

Todas las variables de combustible resultaron ser significativamente diferentes entre el dosel arbóreo y el sotobosque (**Tabla 1**). El poder calorífico fue la variable con la correlación positiva más elevada entre ambos estratos, aunque mostró valores más altos en las especies del sotobosque. La carga de combustible fino y la densidad aparente mostraron una correlación negativa entre estratos y las mayores diferencias entre estratos fueron encontradas para el contenido mínimo de humedad, con valores más altos en las especies del dosel.

*Tabla 1. Comparación de las características de combustible (w: carga de combustible fino; bd: densidad aparente; σ: relación superficie-volumen; h: poder calorífico; FMC: contenido mínimo de humedad; uo gap: discontinuidad vertical) entre el dosel arbóreo y el sotobosque. Para cada variable y estrato, la tabla muestra la media, desviación estándar, percentiles 5% y 95%, y el porcentaje de parcelas para las que el valor en el sotobosque es mayor que en el dosel; también se muestra la correlación no-paramétrica de Spearman para cada variable entre ambos estratos (rho, * p-value < 0.001). El test de Wilcoxon entre dos muestras fue significativo para todas las características de combustible (α = 0.001).*

	Dosel arbóreo (D)			Sotobosque (S)			S > D	rho
	Media (sd)	P05	P95	Media (sd)	P05	P95		
w (kg/m ²)	0.66 (0.32)	0.23	1.28	0.46 (0.32)	0.05	1.07	32.7%	-0.28*
bd (kg/m ³)	0.06 (0.04)	0.03	0.14	0.23 (0.17)	0.03	0.55	87.7%	-0.02*
σ (m ² /m ³)	5210.3 (705.3)	4050.0	6050.0	5138.1 (759.6)	4128.9	6460.6	42.8%	0.30*
h (kJ/kg)	20343.8 (828.5)	19317.3	22150.0	20840.4 (794.9)	19783.1	22266.5	71.8%	0.42*
FMC (%) peso seco)	86.38 (15.31)	65.74	110.33	64.2 (10.53)	50.43	86.1	5.86%	0.22*
uo gap (m)	1.20 (2.07)	0.00	5.6					

La carga de combustible fino se correlacionó negativamente con el resto de variables de combustible del dosel, excepto con la densidad aparente que se relacionó positivamente con la carga de combustible en ambos estratos (**Figura 2a**). En particular, los encinares mostraron una alta carga de combustible fino, mientras que los pinares de pino carrasco y los alcornocales se caracterizaron por valores altos del poder calorífico y sotobosques con mucha carga de combustible (**Figura 2a**). En el caso del sotobosque, el contenido mínimo de humedad estuvo negativamente correlacionado con el resto de las variables, indicando que algunas comunidades, como las xerófilas y los brezales, podrían ser altamente inflamables (**Figura 2a**). La discontinuidad vertical se correlacionó positivamente con el contenido mínimo de humedad, particularmente en los bosques de montaña y al contrario que en los alcornocales (**Figura 2a**).

La temperatura y la precipitación se relacionaron positivamente con la carga de combustible fino y la densidad aparente en el dosel arbóreo, mientras que, en el sotobosque, la temperatura y la precipitación tuvieron un efecto positivo y negativo, respectivamente (**Figura 2b**). Estas variables climáticas tuvieron un efecto negativo en el contenido mínimo de humedad y la discontinuidad vertical.

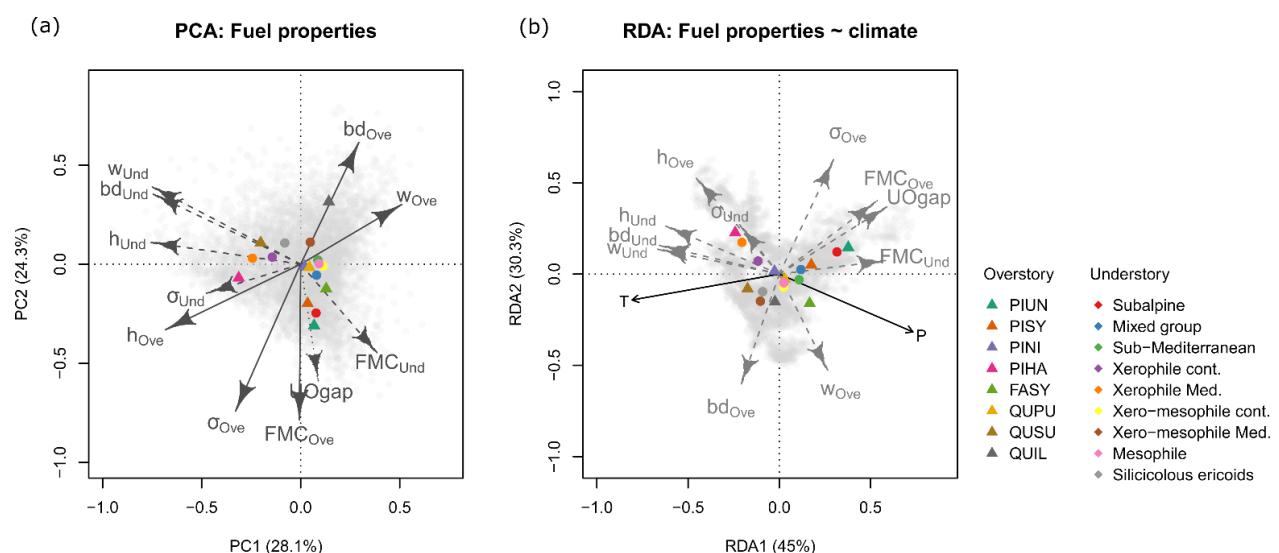


Figura 2. (a) PCA de las características de combustible en el dosel arbóreo (Ove) y el sotobosque (Und): carga de combustible fino (w), densidad aparente (bd), relación superficie-volumen (σ), poder calorífico (h), contenido mínimo de humedad (FMC), separación entre estratos (UO gap). (b) RDA relacionando las características de combustible de ambos estratos con variables climáticas: temperatura (T), precipitación (P). Los puntos grises representan las parcelas del IFN, los triángulos y los círculos coloreados corresponden a las distintas tipologías de dosel (PIUN: *Pinus uncinata*, PISY: *P. sylvestris*, PINI: *P. nigra*, PIHA: *P. halepensis*, FASY: *Fagus sylvatica*, QUPU: *Quercus pubescens*, QUSU: *Q. suber*, QUIL: *Q. ilex*) y sotobosque.

Variación espacial de las características de combustible

En general, ambos estratos de vegetación mostraron patrones de cambio similares en todas las características de combustible (**Tabla 2**). Cabe destacar un aumento significativo de la carga de combustible mayor en el dosel arbóreo que en el sotobosque. El contenido mínimo de humedad disminuyó y el espacio entre los dos estratos aumentó en el periodo temporal considerado. Para el resto de las variables, los cambios fueron en general muy pequeños.

En relación a la comparación entre estratos, los cambios fueron significativamente diferentes. Sin embargo, las diferencias fueron muy pequeñas y las correlaciones entre los ratios de cambio muy débiles para todas las variables de combustible (**Tabla 2**).

Tabla 2. Comparación del ratio de cambio de las características de combustible (*w*: carga de combustible fino; *bd*: densidad aparente; σ : relación superficie-volumen; *h*: poder calorífico; FMC: contenido mínimo de humedad; *uo gap*: discontinuidad vertical) entre el IFN2 y el IFN4 y entre el dosel arbóreo y el sotobosque. Para cada variable y estrato, la tabla muestra la media, desviación estándar, percentiles 5% y 95%, y el porcentaje de parcelas para las que el valor en el sotobosque es mayor que en el dosel; también se muestra la correlación no-paramétrica de Spearman para cada variable entre ambos estratos (*rho*, * *p*-value < 0.001). El test de Wilcoxon fue utilizado para evaluar las diferencias de los valores medios a cero para cada variable y estrato (** $\alpha = 0.001$; * $\alpha = 0.01$). El test de Wilcoxon entre dos muestras fue significativo para todas las características de combustible ($\alpha = 0.001$) excepto FMC.

	Dosel arbóreo (D)			Sotobosque (S)			S > D	<i>rho</i>
	Media (sd)	P05	P95	Media (sd)	P05	P95		
w (kg/m ²)	0.01 (0.012)**	-0.01	0.03	0.005 (0.012)**	-0.01	0.02	41.76%	-0.03
bd (kg/m ³)	5.10-4 (0.002)**	-0.002	0.002	0.002 (0.007)**	-0.01	0.01	66.77%	0.06*
σ (m ² /m ³)	1.40 (16.925)	-22.41	31.70	5.92 (37.163)**	-55.11	66.85	55.51%	0.15**
h (kJ/kg)	-3.08 (13.922)**	-27.80	13.57	-2.45 (31.799)	-57.72	45.81	54.07%	0.12**
FMC (%)	-0.02	-0.42	0.35	-0.06	-0.96	0.55	49.67%	0.01
peso seco)	(0.252)**			(0.461)**				
uo gap (m)	0.01 (0.085)**	-0.12	0.16					

La mayoría de las comunidades del sotobosque mostraron un aumento en las características asociadas a una mayor inflamabilidad y un descenso en el contenido mínimo de humedad (excepto en los brezales y comunidades xero-mesófilas mediterráneas, en las que el contenido de humedad aumentó) (Figura 3a).

En general, las variables climáticas mostraron una capacidad predictiva en las variables de cambio muy débil (Figura 3b).

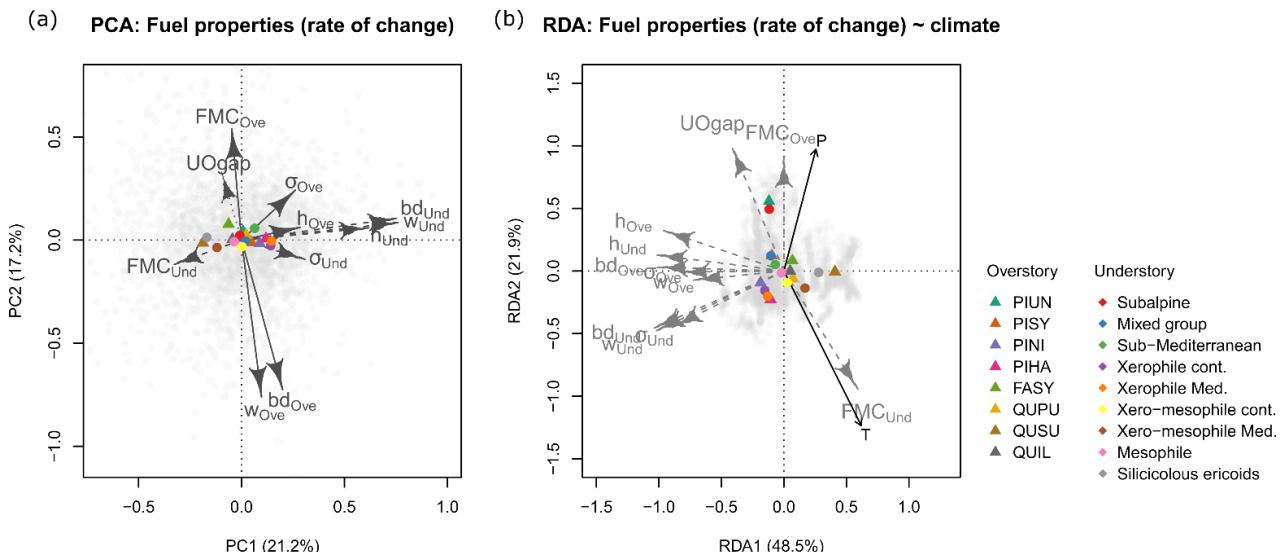


Figura 3. (a) PCA del ratio de cambio de las características de combustible en el dosel arbóreo (Ove) y el sotobosque (Und): carga de combustible fino (*w*), densidad aparente (*bd*), relación superficie-volumen (σ), poder calorífico (*h*), contenido mínimo de humedad (FMC), separación entre estratos (*uo gap*). (b) RDA relacionando el ratio de cambio de las características de combustible de ambos estratos con variables climáticas: temperatura (*T*), precipitación (*P*). Los puntos grises representan las parcelas del IFN, los triángulos y los círculos coloreados corresponden a las distintas tipologías de dosel (PIUN: *Pinus uncinata*, PISY: *P. sylvestris*, PINI: *P. nigra*, PIHA: *P. halepensis*, FASY: *Fagus sylvatica*, QUPU: *Quercus pubescens*, QUSU: *Q. suber*, QUIL: *Q. ilex*) y sotobosque.

5. Discusión

Distribución espacial de las características de combustible en el dosel arbóreo y el sotobosque

Nuestros análisis mostraron que la vulnerabilidad de los bosques a incendios depende fuertemente de las especies que forman cada uno de los estratos de vegetación y, en particular, el sotobosque. En general, el sotobosque mostró valores más altos en las características de combustible asociadas a una mayor inflamabilidad y riesgo de incendio (densidad aparente, poder calorífico y ratio entre la superficie y el volumen). Estas variables se correlacionaron positiva y negativamente con la carga de combustible fino y el contenido mínimo de humedad, respectivamente. Además, un bajo contenido de humedad en el sotobosque también se relacionó con una mayor continuidad vertical del combustible, poniendo de relieve el importante papel del sotobosque en el riesgo de un incendio de copas (NUNES et al., 2019).

Las variaciones espaciales de las características de combustible resultaron, en cierta medida, asociadas a las condiciones climáticas locales. En las regiones más secas de Cataluña, los bosques presentaron características asociadas a una mayor inflamabilidad que en otras áreas. En estas regiones, abundan estructuras forestales abiertas –generalmente, dominadas por pino carrasco– en las que proliferan comunidades arbustivas adaptadas a la sequía, con bajo contenido de humedad, alta carga de combustible fino y elevada relación entre su superficie y volumen (COLL et al., 2011). A pesar de que la baja cobertura arbórea puede dificultar la ocurrencia de incendios de copas (ALVAREZ et al., 2012), la mayor exposición a corrientes de aire explica la alta incidencia de fuegos de superficie muy intensos y rápidos que han ocurrido en estas zonas de Cataluña en las últimas décadas (GONZÁLEZ & PUKKALA, 2007; LECINA-DIAZ et al., 2014) (GONZÁLEZ y PUKKALA, 2007; LECINA-DIAZ et al., 2014).

En zonas bajas y húmedas dominadas por quercíneas perennifolias, el riesgo de incendio dependió en gran medida del cortejo florístico en el sotobosque. Por un lado, los encinares presentaron una gran variabilidad específica en su sotobosque, mostrando análoga variación en sus características de combustible. Por otro lado, los alcornocales estuvieron estrechamente relacionados con sotobosques dominados por brezo arbóreo (*E. arborea*), jaras (*Cistus sp.*) y genistas (*Genista sp.*), cuyas características morfológicas las hacen altamente inflamables (DEHANE et al., 2017), tal como mostraron nuestros resultados.

Las regiones con más precipitación y bajas temperaturas se asociaron a sotobosques con altas cargas de combustible fino y densidad aparente y sotobosques con menor carga de combustible y densidad aparente y mayor contenido de humedad. Contrastan, sin embargo, los bosques de áreas templadas y húmedas del Pirineo y Pre-pirineo, dominados por monte bajo de quercíneas marcescentes, con los pinares monoespecíficos de pino silvestre y pino negro que se encuentran a mayores altitudes y cuya estructura regular facilita la discontinuidad vertical del combustible (SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2019) y limita la ocurrencia de incendios a pequeños fuegos de superficie de escasa relevancia (GONZÁLEZ et al., 2007).

Evolución temporal de las características del combustible

El ratio de cambio en las características de combustible fue significativamente diferente en el dosel arbóreo que en el sotobosque. Sin embargo, para escala temporal utilizada, los cambios resultaron ser muy pequeños en ambos estratos. En general, el aumento de la carga de combustible y densidad aparente se debe al propio desarrollo del bosque en ausencia de perturbaciones. Los procesos de diversificación y la combinación de especies con distintos requisitos fisiológicos contribuyeron al incremento en las cargas de combustible, así como a una mayor continuidad vertical de la vegetación (PRETZSCH, 2014; SÁNCHEZ-PINILLOS et al., 2019). El mayor aumento de la carga

de combustible fino en el dosel que en el sotobosque se asocia a la intercepción de la luz por los estratos más altos, limitando la disponibilidad en el sotobosque y, por tanto, su desarrollo (VALLADARES & GUZMÁN, 2006) (VALLADARES y GUZMÁN, 2006). El aumento en la discontinuidad vertical, sobre todo en pinares de alta montaña, se explica por el crecimiento primario de los arboles en masas, generalmente, monoespecíficas y muy jóvenes.

Aunque el ratio de cambio en las características de combustible estuvo débilmente asociado a las características climáticas locales, no podemos rechazar la posibilidad de que, en el futuro, las diferencias entre distintas regiones se incrementen como consecuencia del calentamiento climático. En este sentido, nuestros resultados sugieren un incremento de la inflamabilidad de los bosques asociado a la reducción en las precipitaciones anuales, promoviendo el desarrollo de especies xerófilas con menores contenidos de humedad.

6. Conclusiones

Nuestros resultados mostraron que los combustibles forestales pueden ser muy diferentes entre los estratos de vegetación y en grandes escalas espaciales, resaltando la importancia de los combustibles en el sotobosque en el riesgo de incendio del rodal. De esta forma, resulta esencial considerar la variabilidad espacial del combustible para distintos estratos, evitando asociar características globales del combustible forestal en función de las especies dominantes del dosel arbóreo.

Aunque la gestión forestal reconoce ampliamente la importancia del sotobosque en la vulnerabilidad del rodal a incendios forestales, nuestros resultados sugieren promover entre propietarios y gestores forestales el uso de guías de gestión que recomiendan distintos tratamientos selvícolas en función de las características de combustible de cada estrato de vegetación (PIQUÉ et al., 2017). Como norma general, las cortas selectivas y las claras de baja intensidad deberían ser priorizadas para evitar el desarrollo de sotobosques densos, dominados por especies intolerantes a la sombra y altamente inflamables. Estas prácticas pueden complementarse con otras frecuentemente utilizadas, como las podas y los desbroces, sobre todo en las regiones más secas donde nuestros resultados mostraron un mayor riesgo de incendio.

7. Agradecimientos

Este estudio ha recibido financiación por parte del MINECO vía los proyectos DRESS (CGL2017-89149-C2-2-R), ForRes (RTI2018-098778-B-I00), UMBRALCLIM (PID2019- 111781RB-I00) e INMODES (CGL2017-89999-C2-1-R).

8. Bibliografía

ALVAREZ, A., GRACIA, M., RETANA, J., 2012. Fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests. Eur. J. For. Res. 131, 463–474. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0520-6>

COLL, L., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R., MOLA-YUDEGO, B., PUKKALA, T., MESSIER, C., 2011. Predicting understory maximum shrubs cover using altitude and overstory basal area in different Mediterranean forests. Eur. J. For. Res. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0395-y>

DEHANE, B., HERNANDO, C., GUIJARRO, M., MADRIGAL, J., 2017. Flammability of some companion species in cork oak (*Quercus suber* L.) forests. Ann. For. Sci. 74, 60.

<https://doi.org/10.1007/s13595-017-0659-5>

DIMITRAKOPoulos, A.P., 2002. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *Int. J. Wildl. Fire* 11, 127–130.

GONZÁLEZ, J.R., PUKKALA, T., 2007. Characterization of forest fires in Catalonia (north-east Spain). *Eur. J. For. Res.* 126, 421–429. <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0164-0>

GONZÁLEZ, J.R., TRASOBARES, A., PALAHÍ, M., PUKKALA, T., 2007. Predicting stand damage and tree survival in burned forests in Catalonia (North-East Spain). *Ann. For. Sci.* 64, 733–742. <https://doi.org/10.1051/forest:2007053>

KEANE, R.E., 2016. Spatiotemporal variability of wildland fuels in US Northern rocky mountain forests. *Forests* 7. <https://doi.org/10.3390/f7070129>

LECINA-DIAZ, J., ALVAREZ, A., RETANA, J., 2014. Extreme Fire Severity Patterns in Topographic, Convective and Wind-Driven Historical Wildfires of Mediterranean Pine Forests. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085127>

MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2019. Cuarto inventario Forestal Nacional (IFN4).

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2007. Tercer inventario Forestal Nacional (IFN3). Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid, Spain.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1996. Segundo inventario Forestal Nacional (IFN2). Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid, Spain.

NUNES, L., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J., ALBERDI, I., SILVA, V., ROCHA, M., REGO, F.C., 2019. Analysis of the occurrence of wildfires in the Iberian Peninsula based on harmonised data from national forest inventories. *Ann. For. Sci.* 76, 27. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0811-5>

PAUSAS, J.G., KEELEY, J.E., 2014. Abrupt Climate-Independent Fire Regime Changes. *Ecosystems* 17, 1109–1120. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9773-5>

PIQUÉ, M., VERICAT, P., BELTRÁN, M., 2017. ORGEST: Regional guidelines and silvicultural models for sustainable forest management. *For. Syst.* Vol 26, No 2 (2017) DOI - 10.5424/fs/2017262-10627 26.

PRETZSCH, H., 2014. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *For. Ecol. Manage.* 327, 251–264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.027>

SÁNCHEZ-PINILLOS, M., CÁCERES, M. DE, AMEZTEGUI, A., COLL, L., 2019. Temporal dimension of forest vulnerability to fire along successional trajectories. *J. Environ. Manage.* 248, 109301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109301>

SÁNCHEZ-PINILLOS, M., DE CÁCERES, M., 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. *For. Ecol. Manage.* 490. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119094>

SAURA-MAS, S., LLORET, F., 2007. Leaf and shoot water content and leaf dry matter content of Mediterranean woody species with different post-fire regenerative strategies. *Ann. Bot.* 99, 545–554. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl284>

VALLADARES, F., GUZMÁN, B., 2006. Canopy structure and spatial heterogeneity of understory light in an abandoned Holm oak woodland. *Ann. For. Sci.* 63, 749–761.

WESTERLING, A.L., BRYANT, B.P., PREISLER, H.K., HOLMES, T.P., HIDALGO, H.G., DAS, T., SHRESTHA, S.R., 2011. Climate change and growth scenarios for California wildfire. *Clim. Change* 109, 445–463. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0329-9>