



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-378

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Actuaciones selvícolas en zonas estratégicas para la prevención de incendios en bosques de *Pinus nigra*: tratamientos mecánicos y quemas prescritas.

DOMÈNECH, R.¹, PIQUÉ, M.¹, BELTRÁN, M.¹, CERVERA, T.², LARRAÑAGA, A.³

¹ Área de Gestión Forestal Sostenible. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.

² Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació. Generalitat de Catalunya.

³ Bombers. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya.

Resumen

Los bosques de pino laricio de Cataluña son un hábitat prioritario en Europa. Éstos han sido gestionados tradicionalmente por entresaca y hoy en día presentan, en general, estructuras forestales con una elevada continuidad vertical de vegetación y acumulación de combustible en el sotobosque, estructuras muy vulnerables a generar fuegos de copas de alta intensidad, como los sucedidos en la zona en las últimas décadas.

En el marco del proyecto Life+Pinassa se definen puntos estratégicos de gestión y se realizan actuaciones selvícolas para reducir la acumulación de combustible y promover estructuras resistentes al paso del fuego y de mayor vitalidad. Los tratamientos se diseñan en base a Orientaciones de gestión establecidas y se realizan usando dos técnicas: tratamientos mecánicos convencionales y quemas prescritas, con el objetivo de evaluar la eficiencia de ambas técnicas en la prevención de incendios. Se presentan los resultados sobre las condiciones iniciales y finales de los rodales según el tipo de tratamiento (mecánicos o con fuego), en relación a las características dasométricas, sotobosque y carga de combustibles, así como la eficiencia de los diferentes tratamientos en la prevención de incendios forestales, mediante el uso de simuladores del comportamiento del fuego.

Palabras clave

Laricio, estructura forestal, punto estratégico de gestión, simulación fuego, efectividad tratamientos.

1. Introducción

Los pinares de pino laricio (también conocidos como *pinassa* o pino negral) ocupan más de 120.000 hectáreas en Cataluña (CREAF, 2007), entre bosques puros y mixtos, y están considerados dentro de la Directiva Hábitats como hábitat prioritario y de interés comunitario. En Cataluña, se distribuyen principalmente en los Prepirineos y en puntos montañosos de las sierras pre litorales, así como en las montañas meridionales (BELTRÁN et al., 2012).

El pino laricio tiene una gran relevancia económica y social en Cataluña, y es uno de los pinos con mayor contribución al mercado de la madera catalán (20%, detrás del pino silvestre y del pino carrasco). En las últimas décadas, la superficie y calidad de los pinares de laricio ha sufrido una regresión importante en Cataluña, y son considerados un hábitat especialmente vulnerable al cambio climático. Hoy en día presentan, en general, estructuras forestales con una elevada continuidad vertical de vegetación y acumulación de combustible en el sotobosque, estructuras muy vulnerables a incendios forestales.

De los diferentes tipos de incendios forestales posibles, los incendios de copas, a menudo intensos y de propagación rápida, son los que representan una mayor amenaza y, a la vez reto, para los equipos de extinción y gestores. La continuidad vertical en los montes forestales facilita considerablemente que el fuego alcance las copas, y a partir de ahí, extenderse de copa en copa de una manera activa. Por lo tanto, si se rompe esta continuidad estructural, se espera una disminución en la vulnerabilidad a los incendios activos (FULÉ et al., 2001; BROWN et al., 2004, AGEE & SKINNER, 2005, JOHNSON et al., 2007).

La interacción entre la meteorología, la topografía y la vegetación (denominada como combustible) determina como se propaga un incendio y si este puede convertirse en un gran incendio forestal (ROTHERMEL, 1983). De estos parámetros, la vegetación es el único sobre el cual es posible actuar directamente, con el objetivo de influir en la propagación del fuego. El uso de actuaciones selvícolas estratégicas a nivel de rodal dirigidas a aumentar la altura de la base de la copa, a reducir la carga de combustible superficial y/o a reducir la densidad de árboles deberían disminuir la vulnerabilidad de los rodales forestales y hacer las tareas de extinción mucho más fáciles (GRAHAM et al., 2004).

Para potenciar el efecto preventivo de un determinado tratamiento selvícola en un rodal, es clave la localización paisajística de dicho tratamiento. La planificación a nivel paisajístico permite construir paisajes "inteligentes contra incendios" con estructuras forestales y patrones de distribución espacial que contribuyen a dificultar la propagación de los incendios de copas activos y facilitar la extinción de incendios forestales (FERNANDES, 2013). En este sentido, se definen los *Puntos Estratégicos de Gestión* (PEG), localizaciones clave que condicionan el movimiento y alcance de los incendios a nivel territorial y que permiten al sistema de extinción concentrar recursos de forma más segura y eficaz. Estos se delimitan según las características y el patrón de propagación de los diferentes tipos de incendios que pueden ocurrir en un área, especialmente los más peligrosos (COSTA et al., 2011).

La evaluación de la efectividad de los tratamientos selvícolas en la reducción del riesgo de incendio forestal se realiza frecuentemente con herramientas de simulación que permiten predecir el comportamiento de un eventual incendio (FULÉ et al., 2001, 2002; SCOTT, 2006; MANSON et al., 2007). En las simulaciones, a partir de la caracterización de la vegetación y del conocimiento de determinados factores ambientales y topográficos, se obtiene información sobre el comportamiento de un incendio (velocidad de propagación, intensidad, calor liberado, longitud de la llama o tipo de fuego, entre otras). Dentro de la extensa variedad de simuladores de incendios forestales existentes actualmente, los basados en el modelo de propagación *Rothermel* (ROTHERMEL, 1972) son los más extensamente usados para la evaluación de la efectividad de los tratamientos selvícolas (DOMÈNECH, 2011).

En este marco se inició el proyecto Life+PINASSA el año 2015 para mejorar la conservación de los bosques de pino laricio (*Pinus nigra subsp. salzmannii*) de la red Natura 2000 de Cataluña mediante actuaciones de gestión forestal. El proyecto incluye actuaciones selvícolas estratégicas para la prevención de grandes incendios forestales, que consiste en la implementación de tratamientos selvícolas de prevención y quemas prescritas en PEGs, y tienen por objetivo generar estructuras de bosque de laricio resistentes y resilientes a grandes incendios forestales y que, sobretodo, incidan en la reducción de la intensidad de los incendios que puedan darse en la zona.

2. Objetivos

El objetivo principal es reducir el riesgo de un Gran Incendio Forestal (GIF) en el hábitat del pino laricio a través de actuaciones en localizaciones PEG. La estructura forestal resultante ha de garantizar un comportamiento de fuego asequible para el sistema de extinción actual, facilitar su control y evitar la generación de fuegos de alta intensidad en estas localizaciones estratégicas, de manera que se aumenta la resistencia del paisaje a los grandes incendios forestales.

La generación de estructuras forestales menos vulnerables a GIF tiene los siguientes objetivos concretos:

1. Reducir la carga de combustible vivo y muerto de los estratos inferiores de vegetación, principalmente arbustivo.

2. Aumentar la distancia entre el dosel arbóreo y los estratos inferiores para dificultar que un fuego de superficie propague hacia las copas.
3. Dosificar la competencia entre estratos y dentro de cada estrato de vegetación para promover estructuras más resistentes al estrés hídrico y por tanto menos vulnerables a los episodios de sequía.

Las actuaciones consisten en la eliminación de parte del material vegetal que conforma los diferentes estratos de combustible en las proporciones especificadas, mediante medios mecánicos o bien mediante quemas prescritas.

3. Metodología

Los rodales seleccionados se encuentran en el ámbito Prepirenaico, dentro del espacio Natura 2000 'ES5130029 Serres de Queralt i els Tossals-Aigua d'Ora', en una finca forestal de la comarca del Solsonès (Cataluña), donde predomina el pino laricio con un sotobosque dominado por boj común (*Buxus sempervirens*).

La localización de los puntos estratégicos de gestión (PEG) se realiza en base al estudio de incendios históricos, que permite establecer los incendios tipo que pueden afectar a cada macizo forestal, determinando los patrones de propagación más probables y el comportamiento de fuego esperado. En base a este análisis se identifican aquellos lugares que permitirán desplegar maniobras de extinción para limitar la magnitud de los incendios esperados, en base a una estrategia predefinida y acorde con las posibilidades del sistema de extinción.

En dichas zonas (PEG) se han aplicado dos tratamientos diferentes, quemas prescritas (B) y tratamiento mecánico (M) (Figura 1).

Los tratamientos han sido ejecutados en marzo de 2016. Antes (enero de 2016) y después (mayo 2016) se han realizado muestreos para evaluar el cambio generado, que han consistido en la caracterización del estrato de copas y de superficie mediante inventarios dasométricos, transectos de vegetación y muestreos destructivos.

Las quemas prescritas (13,14 ha) han consistido en la eliminación del sotobosque (estrato herbáceo, matorral y árboles pequeños) mediante la aplicación de fuego por parte de personal especializado, para reducir la acumulación de combustible forestal.

El tratamiento mecánico (12,85 ha) se ha diseñado conforme al modelo Pn08 de las orientaciones de gestión forestal de Cataluña (BELTRÁN et al., 2012) y ha consistido en una clara por lo bajo, un desbroce selectivo y una poda baja de frondosas. Concretamente se ha reducido la densidad arbórea de 2.300 a 1.500 pies/ha, manteniendo siempre una FCC superior a 75% con el fin de no promover la proliferación del sotobosque por obertura del dosel de copas. La cobertura de matorral se ha reducido hasta el 25%, e incluye la eliminación de árboles menores con continuidad vertical con la copa de árboles grandes. En el desbroce se han respetado prioritariamente las especies leñosas protegidas y de interés biogeográfico y las productoras de fruto carnoso. Los restos generados se han troceado, extendido en el suelo y repartido homogéneamente, evitando en todo caso acumulaciones de más de 0,5 m de altura.

Para el inventario dasométrico se han seleccionado tres parcelas circulares (300 m²) por rodal donde se han determinado diferentes características arbóreas como el diámetro, altura, altura de la primera rama viva, diámetro de copa de los árboles y la densidad arbórea, entre otros. Asimismo, se han marcado dos transectos permanentes de sotobosque de 10 x 0,5 m por parcela. Cada transecto se ha dividido en 10 cuadrículas de 50 x 50 cm, y se ha anotado la cobertura relativa y altura máxima de cada especie arbustiva y arbórea (si altura <1,3 m) y la cobertura relativa del estrato herbáceo, de musgo, de restos leñosos y de rocas. Además, en cada rodal se han realizado 5 muestreos

destructivos de sotabosque de 1*1m. El material se ha separado entre vivo (arbustivo o herbáceo) y muerto (según clase diametral; 0-0,6 cm, 0,6 a 2,5 cm, 2,5 a 7,6 cm) y se ha determinado su peso en seco, para después obtener la carga de combustible por rodal (t/ha).



Figura 1. Fotografías de los rodales antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar las quemas controladas (superior) o tratamiento mecánico (inferior).

Para evaluar la efectividad de los diferentes tratamientos ante un incendio forestal se han realizado simulaciones con el programa NEXUS.2.1 (SCOTT, 1999) según tres escenarios meteorológicos (normal, severo y extremo) obtenidos a partir del cálculo de percentiles (percentiles 50, 75 y 99, respectivamente) de los datos meteorológicos diarios de los últimos 20 años de la estación meteorológica más próxima. Para ello, previamente se han seleccionado aquellos datos meteorológicos que coincidían con los incendios históricos de la zona (incendios topográficos de viento de poniente) (DOMÈNECH, 2011). La humedad del combustible muerto se ha calculado según el modelo de ROTHERMEL (1983) y la humedad del combustible vivo a partir de datos del *Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural* de la *Generalitat de Catalunya*.

4. Resultados

Los resultados que se presentan se agrupan inicialmente en la descripción de la caracterización de los rodales tanto a nivel del estrato de superficie como el de copas antes y después de los tratamientos. A continuación, se evalúa la efectividad de los tratamientos en la reducción del riesgo a incendios forestales mediante la herramienta de simulación Nexus.

Caracterización del rodal

A continuación, se presentan las principales características del estrato de superficie (carga, recubrimiento y altura máxima) para los rodales antes (B_pre, M_pre) y después (B_post, M_post) de realizar el tratamiento. La carga de combustible se diferencia por combustible muerto (1h, 10h y 100h) y vivo (herbáceo y arbustivo) (Tabla 1 y Figura 2).

Tabla 1. Características del estrato de superficie de los rodales antes y después de los tratamientos

Rodal	W _T (t/ha)	W _{1h} (t/ha)	W _{10h} (t/ha)	W _{100h} (t/ha)	W _{Lh} (t/ha)	W _{Lw} (t/ha)	W _D (%)	W _L (%)	Rec. (%)	H _s (cm)
B_pre	35,78 (25,94)	14,41 (2,69)	3,49 (1,70)	3,72 (7,40)	0,12 (0,07)	14,04 (14,87)	60	40	29 (17)	91,67 (18,87)
B_post	25,31 (11,54)	21,40 (8,92)	2,25 (1,38)	1,33 (2,19)	0,33 (0,26)	0,00 (0,00)	99	1	2 (4)	40,00 (69,28)
M_pre	40,63 (11,56)	12,82 (4,91)	4,02 (1,27)	0,00 (0,00)	0,06 (0,12)	23,73 (11,09)	41	59	43 (16)	106,67 (21,86)
M_post	46,71 (6,29)	32,03 (6,50)	6,09 (2,94)	6,15 (4,04)	0,16 (0,17)	2,29 (1,66)	95	5	9 (3)	43,00 (14,53)

W_T Carga de combustible total; W_{1h}, Carga de combustible de 1h (diámetro inferior a 6mm); W_{10h}, Carga de combustible de 10h (diámetro de 6 a 25 mm); W_{100h}, Carga de combustible de 100h (diámetro de 25 a 76 mm); W_{Lh}, Carga de combustible herbáceo vivo; W_{Lw}, Carga de combustible leñoso vivo; W_D, Porcentaje de carga de combustible muerto; W_L, Porcentaje de carga de combustible vivo. Rec; Recubrimiento; H_s, Altura máxima del combustible de superficie. Entre paréntesis, la desviación estándar.

Les quemas prescritas disminuyen en 10 t/ha la cantidad total de combustible de superficie respecto la situación inicial, reduciendo el material vivo leñoso totalmente. El combustible muerto pasa de un 60% antes de la quema a representar un 99% después. El combustible muerto fino (1h y 10h) incrementa 6 t/ha (de 18 a 24 t/ha) debido a que la intensidad de la quema no es suficientemente alta para consumirlo totalmente y la mayor parte de combustible vivo leñoso se convierte en muerto.

El tratamiento mecánico incrementa la cantidad total de combustible de superficie en 6 t/ha respecto la situación inicial. El combustible muerto pasa de 41% a 95%. Concretamente, el tratamiento mecánico genera una elevada cantidad de restos muertos finos de 1h, pero también de 10 y 100 h. Todo lo que antes de aplicar el tratamiento formaba parte del combustible vivo leñoso (59% de la carga total de combustible), en los rodales tratados pasa a ser casi inexistente (5%) y la mayor parte es combustible fino (que incrementa de 17 a 38 t/ha).

El recubrimiento y la altura máxima del estrato de superficie también presentan cambios considerables con el tratamiento aplicado. Ambas variables se reducen con ambos tratamientos. El recubrimiento se reduce considerablemente para los dos tratamientos y representa menos del 10%

en ambos casos. La altura máxima se reduce un 44% en las quemas prescritas y 40% en el tratamiento mecánico. Cabe destacar que la altura del estrato de superficie en las quemas hace referencia a material muerto, en cambio en el tratamiento mecánico se refiere tanto al combustible herbáceo o leñoso que ha quedado vivo en pie como al muerto. Por tanto, cabe esperar que con el tiempo esta altura en los rodales quemados se disminuirá considerablemente.

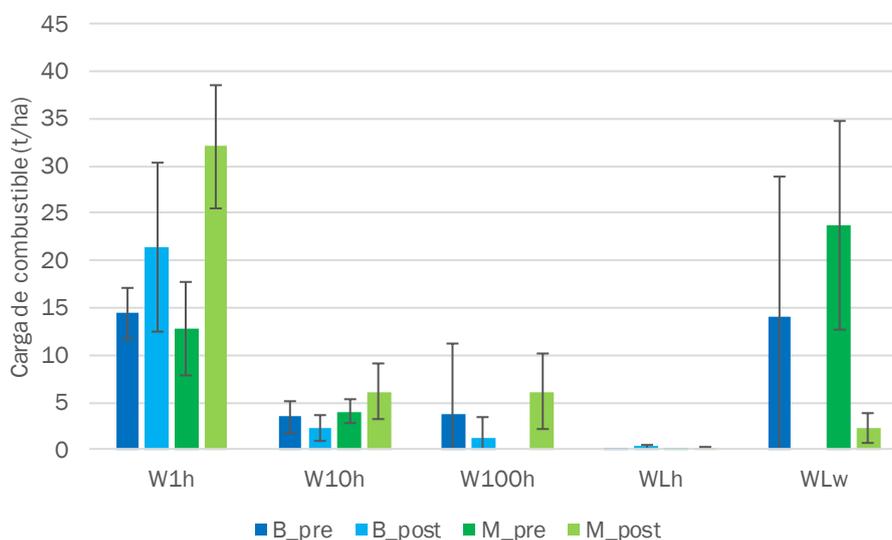


Figura 2. Carga de combustible por clase y tratamiento.

W_{1h}, Carga de combustible de 1h (diámetro inferior a 6mm); W_{10h}, Carga de combustible de 10h (diámetro de 6 a 25 mm); W_{100h}, Carga de combustible de 100h (diámetro de 25 a 76 mm); WL_h, Carga de combustible herbáceo vivo; WL_w, Carga de combustible leñoso vivo.

A continuación, se presentan las principales variables dasométricas y descriptoras de las copas y se destacan aquellas que tienen más importancia en el inicio y propagación de un incendio de copas (Tabla 2). Son la altura de la primera rama viva (CBH, m) y la densidad aparente disponible de copas (ACBD, kg/m³). El CBH determina cuando un incendio podrá subir a las copas y la ACBD nos da una idea de cuánto combustible fino existe en las copas, y, por tanto, es importante para entender la propagación una vez el incendio ha saltado a copas. El ACBD incluye únicamente el combustible disponible de copas (STOCKS et al., 2004) y se ha calculado a partir de las acículas (KOUKOULOMATIS et al., 2007).

Tabla 2. Características selvícolas de los rodales antes y después del tratamiento

Rodal	FFA	CE	FCC (%)	Dg (cm)	Do (cm)	AB (m ² /ha)	Hm (m)	Ho (m)	Vcc (m ³ /ha)	Edad (años)	ACBD (kg/m ³)	CBH (m)
B_pre	PnPre	B	91	13,13 (1,03)	23,93 (1,86)	25,53 (6,00)	9,28 (0,50)	12,17 (0,83)	120,66 (36,46)	40-60	0,30 (0,09)	4,60 (0,33)
B_post	PnPre	B	86	13,23 (1,31)	24,03 (2,14)	25,00 (5,54)	9,34 (0,59)	12,60 (0,42)	120,66 (36,46)	40-60	0,30 (0,07)	4,87 (0,32)
M_pre	PnPre	B	93	12,67 (1,07)	23,73 (2,12)	34,77 (7,67)	9,17 (0,42)	12,88 (0,36)	172,33 (35,94)	40-60	0,44 (0,14)	4,70 (0,24)
M_post	PnPre	B	83	14,93 (1,54)	23,73 (0,95)	29,93 (1,71)	9,99 (0,58)	12,88 (0,20)	145,42 (9,84)	40-60	0,29 (0,04)	5,17 (0,38)

FFA, Formación forestal arbolada; CE, Calidad de estación (PIQUÉ et al., 2014); FCC, Fracción de cabida cubierta; Dg, Diámetro cuadrático medio; Do, Diámetro medio de los 100 árboles más grandes por ha; AB, Área basal; Hm, Altura media; Ho, Altura dominante; Vcc, Volumen con corteza; Edad, Edad promedia de los árboles; ACBD, Densidad aparente disponible de copas; CBH, Altura de la primera rama viva.

La densidad aparente disponible de copas (ACBD, kg/m^3) no varía antes y después de las quemas ya que estas no afectan el dosel arbóreo. En cambio, se reduce considerablemente en el caso del tratamiento mecanizado (de 0,44 a 0,29 kg/m^3) ya que se ha reducido también la densidad arbórea (2.300 a 1.500 pies/ha). La altura de la primera rama viva (CBH, m) incrementa poco tanto para los rodales quemados (de 4,6 a 4,9 m) como para los que se ha aplicado el tratamiento mecánico (de 4,7 a 5,2 m). Asimismo, la separación entre el combustible de superficie y el de copas, es decir, la distancia entre la parte superior del combustible de superficie (Hs) y la parte inferior del de copas (CBH) también ha incrementado poco tanto en las quemas (en 0.55 m) como en el tratamiento mecánico (1.10 m).

Simulaciones de incendios

Los resultados se muestran para los tres escenarios meteorológicos calculados (Tabla 3). El escenario normal corresponde a una situación que se puede dar de forma corriente en la zona, y destaca por la velocidad del viento media de 7 km/h (velocidad máxima de 34 km/h) y humedad del combustible muerto de 1h de 7%. El escenario severo corresponde a una situación poco frecuente con velocidad del viento media de 9 km/h (velocidad máxima de 40 km/h) y humedad del combustible muerto de 1h de 6%. Por otro lado, el escenario extremo corresponde a una situación excepcional, como podría ser la que se sucedió durante el gran incendio que afectó a la comarca del Solsonès en el año 1998, y se caracteriza por la velocidad del viento media de 14 km/h (velocidad máxima de 62 km/h) y humedad del combustible muerto de 1h de 5%. Todas las simulaciones se han realizado con una pendiente del 30%, considerada como representativa de la zona.

Tabla 3. Variables meteorológicas para los diferentes escenarios

Escenario	Tmax (°C)	HRmin (%)	Vvm (km/h)	Rachas (km/h)	M _{1h} (%)	M _{10h} (%)	M _{100h} (%)	M _{Lh} (%)	M _{Lw} (%)
Normal	29,5	29,0	7,5	33,7	7	8	9	100	110
Severo	32,0	24,0	9,1	40,3	6	7	8	50	98
Extremo	38,0	13,0	14,1	62,3	5	6	7	30	72

Tmax, Temperatura máxima; HRmin, Humedad relativa mínima; Vvm, Velocidad media del viento medida a 6 metros; Rachas; Velocidad máxima del viento; M_{1h}, Humedad del combustible muerto de 1h, M_{10h}, Humedad del combustible muerto de 10h; M_{100h}, Humedad del combustible muerto de 100h; M_{Lh}, Humedad del combustible vivo herbáceo; M_{Lw}, Humedad del combustible muerto leñoso. Datos meteorológicos diarios facilitados por el *Servei de Meteorologia de Catalunya* para los años 1996-2015 de las estaciones de Clariana de Cardener y de Solsona. El escenario normal corresponde al percentil 50, el severo al percentil 75 y el extremo al percentil 99 de los datos meteorológicos típicos de incendios.

Las principales variables descriptoras del comportamiento de un incendio son la velocidad de propagación (R, km/h), la longitud de llama (FL, m), el calor liberado (HPUA, BTU/ft²) y el tipo de fuego (Superficie, Pasivo o Activo) (Tabla 4). Se muestran los resultados para los rodales antes y después del tratamiento y también se introduce un nuevo rodal para las simulaciones, el rodal quemado cuando el combustible muerto se ha compactado (B_postC), en el que las hojas de los arbustos muertos se caerán al suelo, y se prevé que la altura del combustible de superficie (Hs) se reduce de 0,40 a 0,10 m. No sucede lo mismo con el rodal donde se ha aplicado el tratamiento mecánico ya que en este caso continúa habiendo combustible leñoso vivo en pie, y aunque se compacten los restos, la altura máxima del estrato continúa dependiendo principalmente del combustible vivo en pie.

Los resultados muestran poca diferencia en la velocidad de propagación antes y después para todos los escenarios meteorológicos y tratamientos (velocidades de propagación entre 0,20 -0,25, 0,23-0,27 y 0,47-0,50 km/h, en los escenarios normal, severo y extremo, respectivamente). No obstante, se observa una diferencia considerable para las otras variables. El calor liberado por un eventual incendio antes y después de las quemas prescritas se reduce 2.800 BTU/ft² (escenario normal), 2.200 BTU/ft² (escenario severo) y 1.800 BTU/ft² (escenario extremo). En el caso del tratamiento mecánico se reduce 4.300 BTU/ft² (escenario normal), 3.900 BTU/ft² (escenario severo) y 2.200 BTU/ft² (escenario extremo). La longitud de la llama disminuye también considerablemente, reduciéndose entre 2,8-2,2 m (escenario normal y extremo) en las quemas prescritas y entre 4,1-3,4 m (escenario normal y extremo) en el tratamiento mecánico. El tipo de incendio para el escenario normal es pasivo antes de aplicar ambos tratamientos y de superficie después. A medida que las condiciones se hacen más severas, tanto antes como después del tratamiento, los incendios pueden torcheo y finalmente en condiciones más extremas después de las quemas sigue siendo pasivo, pero en el rodal en el que se aplica el tratamiento mecánico pasa de un incendio activo antes a pasivo después.

Tabla 4. Variables descriptoras del comportamiento del fuego para los diferentes tratamientos y escenarios.

Escenario	Escenario Normal				Escenario Severo				Escenario Extremo			
	R (km/h)	HPUA (BT/ft ²)	FL (m)	ToF	R (km/h)	HPUA (BT/ft ²)	FL (m)	ToF	R (km/h)	HPUA (BT/ft ²)	FL (m)	ToF
B_pre	0,22	5.072	5,21	P	0,27	5.485	6,46	P	0,49	6.180	11,61	P
B_post	0,25	2.275	2,44	S	0,26	3.260	4,05	P	0,50	4.423	9,45	P
B_postC	0,04	568	0,55	S	0,05	593	0,61	S	0,05	625	0,64	S
M_pre	0,20	7.092	6,52	P	0,25	7.479	8,14	P	0,49	7.493	13,56	A
M_post	0,21	2.827	2,47	S	0,23	3.553	3,51	P	0,47	5.320	10,15	P

R, Velocidad de propagación; FL, Longitud de llama; HPUA, Calor liberado; ToF, Tipo de fuego (S, Superficie; P, Pasivo; A, Activo)

Cuando se incluyen en los resultados las simulaciones con el rodal quemado y el material muerto de superficie ya compactado (B_postC), los efectos de las quemas se resaltan. Tanto la velocidad de propagación como el calor liberado y altura de la llama se reducen considerablemente para todos los escenarios. Los incendios resultantes para los diferentes escenarios son muy lentos, no superan los 0,05 km/h, y no liberan suficiente calor (máximo de 625 BTU/ft²) para generar un GIF. La longitud de la llama está alrededor de medio metro, altura insuficiente para alcanzar las copas, con una altura de la primera rama viva de 4,9 m, razón por la cual el incendio resultante es de superficie en todos los escenarios.

5. Discusión

En la Figura 3 se presenta el tipo de fuego según la velocidad del viento para cada escenario y tratamiento. Para las quemas prescritas, la única diferencia que se observa antes y después de aplicar el tratamiento es que en condiciones normales y a velocidades del viento inferiores a 17 km/h, el incendio es de superficie, pero el tratamiento no modifica el comportamiento del incendio en peores escenarios, y el incendio es activo en el mismo momento.

En el caso del tratamiento mecanizado ocurre una situación parecida en condiciones normales, dónde se da un incendio de superficie con velocidades del viento inferiores a 22 km/h, aunque igualmente en peores condiciones el incendio es pasivo des de un principio. Aquí pero el tratamiento además es capaz de retrasar la propagación activa en copas (de 17 a 23, 15 a 21 o de 12 a 17 km/h en condiciones normales, severas y extremas, respectivamente), ya que se ha reducido la cantidad de combustible arbóreo.

El rodal M_pre presenta una situación de partida más favorable para propagar en copas, ya que, en las mismas condiciones meteorológicas, se generan fuegos de copas activos antes que en B_pre (en condiciones normales se generan a una velocidad del viento de 17 km/h a M_pre y a 23km/h en B_pre). Aun así, después de aplicar el tratamiento (B o M) los dos rodales llegan a unas condiciones similares, con una diferencia en el momento en que el incendio es activo inferior a 1 km/h, en cualquier de los escenarios definidos.



Figura 3. Tipo de incendio por tratamiento y escenario para diferentes velocidades del viento.

En el caso de las quemas con el lecho de combustible compactado, la efectividad es alta ya que el fuego no puede alcanzar las copas, y propaga por la superficie en todos los escenarios. El incendio no puede subir a las copas porque el combustible de superficie tiene un índice de compactación superior (la misma cantidad de combustible se encuentra compactada en 0,10 m en B_postC y en 0,40 m en B_post), y esto produce un doble efecto. Al estar más compactado el combustible muerto en B_postC, la velocidad de propagación es menor (hay menos oxígeno disponible) y las llamas que se generan no son suficientemente altas para subir a copas ya que además se ha incrementado la distancia entre los dos estratos.

Otro efecto en B_postC es que, aunque tiene la misma cantidad de combustible de copas que la situación previa al tratamiento o inmediatamente después, el incendio de superficie que genera es incapaz de sustentar un incendio de copas, así que, aunque este se iniciara fuera del rodal una vez

alcanzara el tratamiento B_postC bajaría a superficie porque no tendría la energía suficiente para propagarse.

Otra manera de evaluar la efectividad de los tratamientos es relacionando la velocidad de propagación y el calor liberado por cada tratamiento en cada escenario (Figura 4). Se observa como los rodales no tratados presentan unas condiciones peores que los tratados. El caso dónde se logra un mayor efecto es en B_postC, que dará más oportunidades para atacar el fuego. El efecto del tratamiento es más efectivo para condiciones normales, y a medida que las condiciones se aproximan a las extremas el efecto de los tratamientos es menor. En el caso de B_postC, el tratamiento es efectivo en todos los escenarios, se homogeneiza la efectividad.

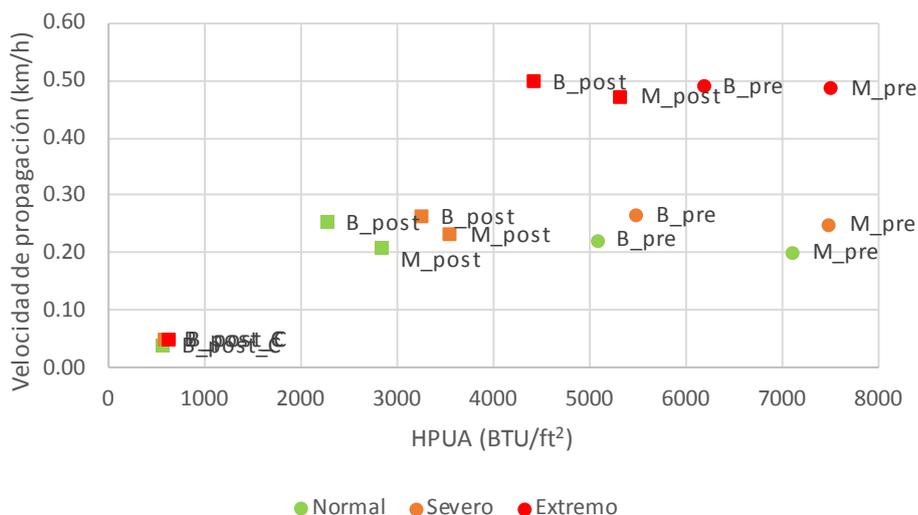


Figura 4. Velocidad de propagación y calor liberado para los diferentes escenarios y tratamientos

6. Conclusiones

La cantidad total de combustible de superficie se reduce después de las quemas e incrementa después de los tratamientos mecánicos. Aunque todos los rodales después de aplicarse el tratamiento (B o M) presentan una cantidad de combustible muerto fino de superficie superior.

Todos los tratamientos disminuyen la altura del lecho de combustible y alcanzan alturas superficiales finales máximas parecidas. Con el tiempo la altura del lecho de combustible de los restos muertos se espera se reduzca considerablemente y, como consecuencia, en los rodales tratados con quemas, donde la totalidad del combustible de superficie está muerto (B_post), se estima que la altura del estrato de superficie se reducirá.

Las quemas a menudo provocan la muerte del matorral, pero hace falta esperar un tiempo a que el lecho del combustible se compacte. Una vez pasado este periodo el tratamiento es especialmente efectivo. La compactación del material muerto producido en las quemas reduce la distancia entre los estratos de superficie y copas y a la vez reduce la velocidad de propagación de un eventual incendio. Los rodales quemados con restos compactados representarían una mejora respecto la situación de partida, ya que ofrecen oportunidades de extinción en situaciones que sin el tratamiento no se darían. En estos rodales se estima prácticamente improbable que se genere un incendio de copas, ya que no tienen suficiente combustible de superficie o escala para que el incendio suba a las copas.

En ambas actuaciones realizadas en el marco del proyecto el dosel arbóreo después de los tratamientos presenta un aumento insuficiente en la altura de la primera rama para evitar un incendio pasivo o activo, pero sí que se reduce la cantidad de combustible de copas para los tratamientos mecánicos.

Los tratamientos eliminan combustible vivo, pero lo acumulan en forma de combustible muerto en superficie. Si el tratamiento no es lo suficientemente intenso, es decir, genera gran cantidad de material muerto o no elimina bastante combustible vivo en pie, puede que no tenga ningún efecto en la reducción del riesgo de incendio o incluso un efecto contrario al esperado al generar material muerto disponible.

Después de cualquier tratamiento (B o M) la efectividad del mismo dependerá de la disponibilidad del material muerto que se genera y de su compactación. Cuando las quemas prescritas son suficientemente intensas para consumir la mayor parte del combustible de superficie, la efectividad del tratamiento está garantizada. Sin embargo, si la quema es menos intensa y el material queda muerto sin consumirse en la superficie, hará falta que pase un tiempo para que el tratamiento sea especialmente eficaz, con el fin de que el material fino muerto (hojas de los arbustos) caigan, y se reduzca la distancia con las copas.

Para los tratamientos mecánicos también es clave la compactación del material muerto, pero en este caso, si existe aún material vivo en pie que produzca una continuidad vertical con las copas, en condiciones meteorológicas severas, el fuego alcanzará las copas y su intensidad y velocidad serán altas. Si el tratamiento mecánico disminuye también la cantidad de combustible de copas, será más difícil que el fuego inicie la propagación en copas.

7. Agradecimientos

Agradecimientos al programa LIFE por la financiación del proyecto LIFE+PINASSA (LIFE13NAT/ES/000724).

8. Bibliografía

AGEE, J.K.; SKINNER, C.N. 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 211 (1-2), 83-96.

BELTRÁN, M.; VERICAT, P.; PIQUÉ, M.; CERVERA, T. 2012. Models de gestió per als boscos de pinassa (*Pinus nigra* Arn.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya,. 152 p. Barcelona.

BROWN, R.T.; AGEE, J.K.; FRANKLIN, J.F. 2004. Forest restoration and fire: Principles in the context of place. *Conservation Biology*, 18 (4), 903-912.

COSTA, P.; CASTELLNOU, M.; LARRAÑAGA, A.; MIRALLES, M.; KRAUS, D. 2011. La prevención de los Grandes Incendios Forestales adaptada al Incendio Tipo. Unitat Tècnica dels GRAF. Divisió de Grups Operatius Especials. Direcció General de Prevenció, Extinció d'Incendis i Salvaments. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya, 87 p. Barcelona.

CREAF. 2007. Mapa de cobertes del sòl de Catalunya v3. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Departaments d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi

BIBLIOGRAFIA CITADA 145 Natural, Interior i Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya. Disponible a: <http://www.creaf.uab.es/MCSC/>

DOMÈNECH, R. 2011. Efectivitat dels tractaments d'aclarida en la reducció del risc de propagació d'incendis en regenerats de pi blanc. Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya. Tesi doctoral, 244 p. Barcelona.

FERNANDES, P.M., 2013. Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning*, 110, 175-182

FULE, P.Z.; WALTZ, A.E.M.; COVINGTON, W.W.; HEINLEIN, T.A. 2001. Measuring forest restoration effectiveness in reducing hazardous fuels. *Journal of Forestry*, 99 (11). 24-29.

FULÉ, P.Z.; COVINGTON, W.W.; SMITH, H.B.; SPRINGER, J.D.; HEINLEIN, T.A.; HUISINGA, K.D.; MOORE, M.M. 2002. Comparing ecological restoration alternatives: Grand Canyon, Arizona. *Forest Ecology and Management*, 170, 19-41.

GRAHAM, R.T.; MCCAFFREY, S.; JAIN, T.B., 2004. Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. General Technical Report. (RMRS-GTR-120). USDA Forest Service. 43 p. Fort Collins, CO, U.S

JOHNSON, M.C.; PETERSON, D.L.; RAYMOND, C.L. 2007. Guide to fuel treatments in dry forests of the Western United States: assessing forest structure and fire hazard. General Technical Report (PNW-686). USDA Forest Service, 322 p. Portland, OR, U.S.

KOUKOULOMATIS, K.D.; MITSOPOULOS, I.D. 2007 Crown fuel weight estimation of black pine (*Pinus nigra*) plantations in southern Bulgaria. *Silva Balcanica*, 8(1), 57-65.

PIQUÉ, M.; VERICAT, P.; CERVERA, T.; BAIGES, T.; FARRIOL, R. 2014. Tipologies forestals arbrades. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya. 341 p. Barcelona.

MANSON, G.; BAKER, T.; CRAM, D.; BOREN, J.; FERNALD, A.; VANLEEUEWEN, D. 2007. Mechanical fuel treatment effects on fuel loads and indices of crown fire potential in a south central New Mexico dry mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 251, 195-204.

ROTHERMEL, R. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper (INT-115). USDA Forest Service, 40 p. Ogden, UT, U.S.

ROTHERMEL, R.C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires General Technical Report (INT-143). USDA Forest Service, 161 p. Ogden, UT, U.S.

SCOTT, J.H. 2006. Comparison of crown fire systems used in three fire management applications. Research Paper (RMRS-RP-58). USDA Forest Service, 25 p. Fort Collins, CO, U.S.

SCOTT, J.H. 1999. NEXUS: A system for assessing crown fire hazard. *Fire Management Notes*, 59 (2), 20-24.