



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-377

---

---

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Fuegos experimentales como medio para la modelización del comportamiento del fuego y la eficacia de los escenarios de combate para los medios terrestres

MOLINA MARTÍNEZ, J.R.<sup>1</sup> y RODRÍGUEZ Y SILVA F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales. 14071, Córdoba

### Resumen

La velocidad con que se desarrollan los acontecimientos en los grandes incendios forestales condicionan la disponibilidad de información fidedigna acerca del comportamiento del fuego (velocidad e intensidad del fuego de superficie, transición del fuego de superficie a fuego de copas y propagación por estas) y la seguridad de los medios terrestres en los diferentes escenarios de combate. La realización de quemas controladas de alta intensidad en coníferas (*Pinus halepensis*, *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*) y frondosas (*Quercus suber* y *Eucalyptus camaldulensis*), junto a tratamientos preventivos, permitió identificar el comportamiento del fuego, la eficacia de los tratamientos y las condiciones de seguridad de los medios terrestres. Aunque en los fuegos experimentales realizados se registraron longitudes de llama superiores a los 17 m (propagación por copas de *P.halepensis*) y velocidades de propagación superiores a los 40 m/min (propagación en interfaz agrícola-forestal), se realizó un análisis de incendios reales, con idea de ampliar el rango de tamaño del frente. A modo de ejemplo, fue evaluada la eficacia de tratamientos perimetrales en áreas de interfaz agrícola-forestal desde el punto de vista de la contención del frente, la mitigación del comportamiento del fuego, el salto de focos secundarios y la posibilidad de ataque directo en el interior del tratamiento preventivo, encontrando diferencias significativas en base al tratamiento realizado y al comportamiento del fuego.

### Palabras clave

Tratamiento preventivo, velocidad de propagación, intensidad del fuego, calor emitido, rendimiento medios terrestres

### 1. Introducción

El abandono paulatino de los usos tradicionales del monte y la mayor disponibilidad del combustible a arder, como consecuencia del cambio climático, están conformando un paisaje potencial para la ocurrencia de Grandes Incendios Forestales (GIF). Los GIF queman aproximadamente el 33% de la superficie anual en la Península Ibérica (JEMES & ENRÍQUEZ, 2015). El comportamiento en este tipo de incendios, en muchos casos con propagación por las copas del arbolado, es muy extremo y con gran complejidad para las labores de extinción (WERTH ET AL., 2016). Ante esta nueva perspectiva de ocurrencia de GIF con mayor frecuencia y potencial convectivo, la disponibilidad de zonas de seguridad adquiere una gran importancia. Dichas zonas deberán ser correctamente dimensionadas de acuerdo al combustible circundante, la velocidad del viento y la pendiente (BUTLER, 2014).

Los simuladores de comportamiento del fuego, como Farsite, FlamMap, Visual Cardin o Wildfire Analyst (FINNEY, 2004), han sido ampliamente utilizados para el estudio del comportamiento del

fuego y el diseño de infraestructuras preventivas. Sin embargo, la complejidad para la realización de experimentaciones con fuego de alta intensidad, y la escala de las existentes, provoca una mala modelización en el comportamiento del fuego bajo condiciones extremas (ALEXANDER & CRUZ, 2016) y un desconocimiento acerca de la eficacia de las labores de combate. En España, la primera experimentación con fuego de alta intensidad en una masa arbolada se desarrolló en el año 2012, bajo el proyecto de investigación INFOCOPAS (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2017). Esta experimentación junto a la observación empírica de fuegos reales en Andalucía permitió la obtención de una formulación matemática para la progresión energética del fuego por las copas del arbolado bajo condiciones del ambiente mediterráneo.

El estudio del comportamiento potencial del fuego permite el diseño y la evaluación de alternativas de manejo del combustible forestal, con objeto de la mitigación de los impactos derivados de la ocurrencia de un incendio. Dada la limitación presupuestaria existente, la optimización espacial de las actuaciones es una de las tareas fundamentales en la ordenación preventiva (AGER ET AL., 2012). Existen diversas tipologías de tratamientos selvícolas para la creación de discontinuidades horizontales y verticales del combustible: desbroce, roza, quema, poda y clara. Incluso en algunos paisajes mediterráneos se ha identificado que son necesarios tratamientos combinados del combustible superficial y aéreo para la mitigación del comportamiento del fuego (MOLINA ET AL., 2011). En el caso de incendios originados en áreas de interfaz agrícola-forestal, de gran velocidad en su avance hacia el monte, las fajas perimetrales sin vegetación de 5-20 m de anchura son el tratamiento más habitual.

El índice de dificultad de extinción (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014) es un evaluador de las complejidades de los escenarios de combate de incendios forestales en base a la progresión energética del fuego, la facilidad para la accesibilidad y movilidad de los medios, la velocidad de apertura de líneas de defensa y la eficacia de los medios aéreos. Una modificación de la cobertura vegetal o del modelo de combustible conlleva un cambio en la movilidad y el rendimiento de apertura de líneas de defensa (CHICO, 2004; BROYLES, 2011) y, en la eficacia o necesidades de autobombas y medios aéreos, debido a las menores necesidades por unidad de superficie para la sofocación del incendio (RODRÍGUEZ Y SILVA, 2004). Estas nuevas necesidades incrementan las posibilidades de combate, pudiendo optar por descargas más largas y de menor anchura. Por tanto, los tratamientos preventivos suavizan o disminuyen la dificultad de extinción, siendo la importancia relativa de este descenso un proceso de análisis de los cambios experimentados en el comportamiento y avance de los medios de extinción bajo las pautas de seguridad determinadas por BUTLER (2014).

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la evaluación de la eficacia de diferentes tratamientos selvícolas en base a fuegos experimentales de alta intensidad (que permiten disponer de información acerca del calor y tiempo de exposición de los combatientes) y de incendios reales (que permiten disponer de una muestra con un mayor rango de tamaño del frente). Dada la limitación espacial de las Actas de este Congreso, se analizará con profundidad uno de las tipologías de incendio más extendidas: incendio originado a principios de verano por una cosechadora en un área de interfaz agrícola-forestal. El análisis incorporará una visión desde el punto de vista de su eficacia para la contención del frente, dado el cambio experimentado en la dificultad de extinción, el rendimiento de los medios de extinción y la seguridad de los combatientes.

## 3. Metodología

*Parcelas de experimentación*

Las parcelas de experimentación con fuego de alta intensidad se localizan en las provincias de Córdoba ("Las Traviesas", "Rabanales 1" y "Rabanales 2"), Jaén ("El Cambrón"), Cádiz ("El Cinchado") y Ciudad Real ("El Tolmo"). A continuación se resumen algunas de las características más destacadas de las parcelas seleccionadas:

- Parcela "Las Traviesas": parcela de 1,65 ha de *Pinus pinea* en estado latizal con un sotobosque denso (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2017). Se produjeron tres carreras de fuego de copas en la parte inferior, inducidas por un encendido simulando una progresión ascendente del fuego desde la parte inferior de la ladera. En la parte superior, existía un área preventiva de defensa, no existieron problemas para su control dada la baja disponibilidad del sotobosque.

- Parcela "El Cambrón": parcela de 1,2 ha situada en una isla sin quemar del gran incendio de Quesada (2016), dominada por esparto con arbolado irregular de *Pinus halepensis*. El esparto se encontraba muy disponible produciendo eventos de carreras de copa y fenómenos de fuego pasivo de copas. El encendido emuló el comportamiento del incendio (en base a las fotografías disponibles del fuego en ese sector), con entrada del frente de forma lateral y caída masiva de focos secundarios en la parte inferior o fondos de barranco que provocaron una succión virulenta del fuego y, en consecuencia, un comportamiento virulento con subida a las copas y salto de focos secundarios.

- Parcela "El Cinchado": parcela de 0,5 ha, compuesta por una masa pura de *Quercus suber*, la cual sufrió un incendio en el año 2004, con un sotobosque continuo principalmente de brezo, jara, genista, torvisco y lentisco. Se produjeron intentos de transición al arbolado y un gran soflamado de copas, si bien dada la alta humedad foliar (148,72%) y la altura a la primera rama, solo los pies menores fueron entorchados. El encendido se realizó con fajas paralelas en la parte inferior con objeto de simular un incendio ascendente con progresión energética hacia el tratamiento preventivo.

- Parcela "El Tolmo": parcela de 0,2 ha de *Pinus pinaster* con un sotobosque dominado por restos y jara. En esta parcela, se utilizó el agua en los puntos críticos de transición a copas, con objeto de evitarla, si bien el comportamiento del fuego de superficie fue libre. El encendido se realizó en base a una progresión a favor de viento y pendiente. Un cambio en la intensidad del viento modificó el comportamiento inicial del fuego, incrementando la velocidad de propagación y, en consecuencia, el ángulo de inclinación de la llama.

- Parcela Rabanales 1: parcela de 0,4 ha de siembra de cereal, con objeto de la producción y cosechado del mismo. Se dispusieron pies aislados de *Pinus pinaster* pero sin afección ni incidencia en el comportamiento del fuego, dada la velocidad de propagación y el tiempo de residencia de la llama. El encendido se realizó en forma de un frente de 50 m de longitud, a favor del viento, con idea de la simulación de un incendio de una cosechadora en zonas de interfaz agrícola-forestal.

- Parcela Rabanales 2: parcela de 0,4 ha de pastizal de alta talla de diferentes especies, si bien predominaba la cebada y la avena. Se dispusieron cepas de eucalipto a modo de una zona de transición agrícola-forestal, o una zona de un cultivo abandonado junto a un eucaliptal. El encendido se realizó en forma de un frente de 20 m de longitud, a favor del viento, con idea de emular un incendio de una cosechadora en zonas de interfaz agrícola-forestal.

En todas las parcelas seleccionadas, se realizó un inventario del combustible, tanto a nivel de superficie como a nivel aéreo. A nivel de superficie, se utilizaron los modelos de combustible UC040 (RODRÍGUEZ Y SILVA & MOLINA, 2012), realizando un muestreo por la metodología de los rangos con parcelas destructivas de 1 m<sup>2</sup> mediante transectos lineales. En el caso de los inventarios arbóreos, se contó con inventarios destructivos en las parcelas de "Las Traviesas", "El Cinchado" y, una estimación mediante ecuaciones alométricas para el caso de "El Cambrón".

Los tratamientos preventivos a testar en cada parcela experimental fueron seleccionados en base a las actuaciones tradicionalmente realizadas para cada modelo de combustible. En este sentido, en modelos de interfaz agrícola-forestal se utilizaron franjas sin combustible (decapado y/o desbrozado mecánico) y en los modelos arbolados superficies de mayor tamaño (líneas de defensa, camino y/o área preventiva de defensa). En el caso de la parcela de "El Cambrón", al estar situada dentro de un incendio, no fue necesario ningún tratamiento en su borde superior o punto crítico.

#### *Comportamiento del fuego en las parcelas de experimentación*

El inventario de campo durante la ejecución de las quemas se desarrolló mediante una matriz de 40 termopares tipo k de 1,5 mm, complementada por jalones, cámara térmica y cámaras de video. La matriz se diseñó con idea de conocer las condiciones del fuego en el borde o área colindante de cada tratamiento propuesto. Se analizarán las siguientes variables: velocidad de propagación, longitud de llama, intensidad del frente, calor por unidad de superficie y tiempo de residencia. La velocidad de propagación y el tiempo de residencia de la llama (temperatura > 285°C) fueron identificadas mediante el registro de temperatura para cada segundo proporcionado por la matriz de termopares. La longitud de llama será estimada mediante la altura de llama y ángulo de inclinación de la llama, identificados mediante cámara térmica para cada uno de los jalones de referencia, distribuidos por línea de máxima pendiente. La intensidad del frente de llama y el calor por unidad de superficie se estimaron en base al combustible disponible (combustible previo a la quema - combustible remanente) y a la velocidad de avance (ecuaciones 1 y 2).

$$I = (18.500 * Cd * Vp) / 60$$

Eq.1

$$H = 4.500 * Cd$$

Eq.2

donde "I" es la intensidad del frente de llama (kW/m), "Cd" es la carga de combustible disponible (kg/m<sup>2</sup>), "Vp" es la velocidad de propagación (m/min) y "H" es el calor por unidad de superficie (kcal/m<sup>2</sup>). El calor de combustión para el material vegetal fue fijado en 18.500 (Albini, 1976). La conversión a unidades internacionales se realiza mediante la división en 60 segundos. Por su parte, el poder calorífico para las especies mediterráneas se establece en un valor medio de 4.500 kcal/kg (HERNANDO, 2009).

#### *Análisis de los escenarios de combate para los medios terrestres*

La evaluación de los escenarios de trabajo se realiza en base al comportamiento del fuego y a las condiciones de trabajo en el área tratada. Dada la limitación impuesta por el número de quemas de alta intensidad y el tamaño del frente de llama, se realizó un estudio del comportamiento de tratamientos preventivos en 30 incendios reales acontecidos en Andalucía, complementando la visión de las condiciones de trabajo monitoreadas en las quemas de alta intensidad anteriores. La variable más beneficiada con esta integración fue el tamaño del frente, el cual amplió su rango desde 20-1000 m de longitud, lo cual influye de forma directa en el calor emitido y en el rendimiento de los medios a la hora de confinar o cortar el avance. A mayor tamaño del frente, mayor tiempo y/o mayor cantidad de medios son requeridos para el control.

En un primer lugar, se evaluó la modificación de la dificultad de extinción (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014) en base a la realización de cada una de las actuaciones propuestas. Para ello, se calculó el valor pre y post- actuación del índice de dificultad de extinción (Ecuación 3), siendo la diferencia entre ellos expresada como un valor porcentual.

$$I_{dex} = I_{ce} / (I_m + I_a + I_p + I_{ap} + I_{ma})$$

Eq.3

donde "I<sub>dex</sub>" es el índice de dificultad de extinción, "I<sub>ce</sub>" es el índice de comportamiento energético, "I<sub>m</sub>" es el índice de movilidad, "I<sub>a</sub>" es el índice de accesibilidad, "I<sub>p</sub>" es el índice de

penetrabilidad, "lap" es el índice apertura de líneas de defensa y "Ima" es el índice de eficacia de medios aéreos. El índice de comportamiento energético es fruto del producto entre la longitud de llama categorizada ( $FL_i$ ) y el calor por unidad de superficie ( $HUA_i$ ), ambas variables categorizadas en diez intervalos (Ecuación 4 y RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014). El índice de movilidad y accesibilidad adopta valores entre 1-10 en base a la presencia de infraestructura lineal (se trata de 10 intervalos en orden ascendente cada 100 m). El índice de penetrabilidad depende del modelo de combustible ( $d_i$ ), el suelo ( $sh_i$ ), la pendiente ( $s_i$ ) y la existencia de sendas precombate ( $pt$ ) (Ecuación 5 y RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014). El índice de apertura de líneas de defensa adopta valores categorizados de rendimientos operacionales en una escala categorizada de 1-10, ponderada en base a la pendiente. El índice de de eficacia de medios aéreos adopta valores entre 1-10 para cada una de las tipologías de aeronaves en base a la frecuencia de descargas en función de la distancia a puntos de agua óptimos para la carga de cada aeronave (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014).

$$I_{ce} = \sum (2 * FL_i * HUA_i) / (FL_i + HUA_i) * (A_i/A_t) \quad \text{Eq.4}$$

$$I_p = \sum [(s_i * d_i * sh_i * e_i) / pt] * (A_i/A_t) \quad \text{Eq.5}$$

En segundo lugar, se evaluaron los rendimientos operacionales (m/min) de los medios presentes en cada quema o incendio. Especial hincapié se realizará a la relación de estos rendimientos con el comportamiento del fuego y con el tamaño del frente, el cual limita los trabajos en el centro del frente, sin asegurar los flancos, dado el potencial de atrapamiento.

Finalmente, para las parcelas de quema experimentales se diseñó una matriz de termopares tipo k en el interior de las actuaciones preventivas. Los termopares en este caso se situaron a 1,20 m de altura respecto del suelo y a una distancia de 1-15 m del borde o punto de contacto del modelo original en la dirección de avance del fuego. Este monitoreo recopilará información acerca del calor recibido por hipotéticos brigadistas trabajando a diferentes distancias del frente, así como su tiempo de exposición, con idea de testar la "safe separation distance" (SSD) o distancia de seguridad (ataque directo o indirecto). Se parte de la consideración de que se producen daños respiratorios con exposiciones durante más de 3 min a 203°C, y que, temperaturas por encima de 120°C pueden causar dificultad a la hora de la respiración y de la ejecución de los trabajos de combate (BUTLER, 2014).

Dada la limitación de espacio de la Actas de este Congreso, se analizará la eficacia de los escenarios de combate para únicamente una tipología de incendio: el incendio que se origina en la interfaz agrícola-forestal adquiriendo grandes velocidades de propagación (velocidades superiores a los 30 m/min), propagándose rápidamente hasta territorio forestal si el ataque en la zona de transición no es contundente. La consecución de esta contundencia o el incremento de la probabilidad de éxito se ve condicionada por la existencia de infraestructura de anclaje de los trabajos en los primeros momentos.

#### 4. Resultados

##### *Parcelas de experimentación*

El inventario de las seis parcelas de experimentación identificó seis modelos UCO40 (RODRÍGUEZ Y SILVA Y MOLINA, 2012) (Tabla 1). Se pudieron diferenciar tres tipologías de quema: carreras por copa ("Las Traviesas" y "El Cambrón"), entorchamientos puntuales de pies menores ("El Cinchado" y "Rabanales 2") y fuego de superficie ("El Tolmo" y "Rabanales 1"). Cabe destacar que la parcela de "El Cambrón" se caracterizó como un modelo de pastizal-matorral (PM3), debido a la baja carga de hojarasca. La densidad aparente de copas osciló entre 0,10-0,39 kg/m<sup>3</sup>. Los tratamientos fueron diversos, utilizando tratamientos lineales para el grupo de modelos de pastizal ("P") y de restos ("R") y áreas preventivas de defensa para los modelos arbolados.

Tabla 1. Caracterización del modelo de combustible, densidad aparente de copas y tratamiento para cada una de las parcelas experimentales

Parcela	Modelo	Propagación	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Tratamiento o actuación preventiva
Las Traviesas	HPM5	Carrera copas	0,22 - 0,24	Area Preventiva de Defensa de 50 m (borde superior parcela)
El Cambrón	PM3	Carrera copas	0,29 - 0,39	Zona quemada (borde superior y oriental parcela) a modo de un tratamiento
El Cinchado	HPM2	Entorchamiento puntual pies menores	0,14 - 0,18	Línea perimetral (20 m) en el extremo occidental y área preventiva de defensa (40 m) en el borde superior
El Tolmo	R1	Superficie (se uso agua para evitar entorchamientos)	-	Línea a dos pies con quema (2 m) y tendido de mangueras en una terraza en el borde superior
Rabanales 1	P8	Superficie	-	Desbroce de 7 m en el borde superior
Rabanales 2	P7	Entorchamiento puntual pies menores	0,10 - 0,12	Desbroce de 7 m en el borde superior. Apoyado en este tratamiento se realizó una quema de ensanche de 4 m

\* información referida al comportamiento activo o pasivo del fuego y no únicamente a superficie

### Comportamiento del fuego

La velocidad de propagación fluctuó entre 2,5 m/min ("El Tolmo") y 41,09 m/min ("Rabanales 1") (Tabla 2). La longitud de llama varió entre 0,8 m ("El Tolmo") y 17,75 m ("El Cambrón"). Por su parte, la intensidad del frente de llama osciló entre 1.302 - 40.644 kW/m y el calor por unidad de superficie entre 3.060 - 17.565 kcal/m<sup>2</sup>. El tiempo de residencia presentó diferencias muy significativas, comprendidas entre 8 s ("Rabanales 1") y 712 s ("El Tolmo").

Tabla 2. Comportamiento del fuego en las parcelas de experimentación de alta intensidad

Parcela	Velocidad de propagación (m/min)	Longitud de llama (m)	Intensidad del frente (kW/m)	Calor por unidad de superficie (kcal/m <sup>2</sup> )	Tiempo de residencia (s)
Las Traviesas	8 -21*	8,6 - 11*	1.678-6.605	3.060-4590	35-145

El Cambrón	23,92-33,5*	16,01-17,75*	26.633-40.644	16.020-17.565	132-173
El Cinchado	2,61-7,1*	5,5 - 6*	968 -4816	3.888-4.860	32-74
El Tolmo	2,5-16,7	0,8 - 2,5	1.302-9.988	6.300-7.650	125-712
Rabanales 1	20,35-41,09	1,4 - 5,1	9.457-19.095	6.203-6.851	8-14
Rabanales 2	22,01-25,01	2,5 - 5,7*	3.854-4.380	2.439 2.587	13-15

\* información referida al comportamiento activo o pasivo del fuego y no únicamente a superficie



Figura 1. Comportamiento del fuego en las parcelas de experimentación. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: "Las Traviesas", "El Cambrón", "El Cinchado", "El Tolmo", "Rabanales 1" y "Rabanales 2"

### Análisis de los escenarios de combate para los medios terrestres

Tal como se ha comentado con anterioridad, se analizó a modo de ejemplo la eficacia de los escenarios de combate para los incendios que se originan en la interfaz agrícola-forestal, utilizando para ellos las quemas experimentales "Rabanales 1" y "Rabanales 2" y seis incendios que tocaron o afectaron actuaciones selvícolas en el perímetro de terreno forestal durante el período 2013-2015 (Tabla 3). Se apreciaron tres actuaciones ineficaces y cinco con efectividad, de acuerdo a las dimensiones de cada una de ellas, al comportamiento del fuego contiguo y a los medios de extinción disponibles.

Tabla 3. Análisis de los diferentes escenarios de combate en incendios de interfaz agrícola-forestal

Tipología	Tamaño frente (m)	Tratamiento preventivo	Comportamiento actuación	Efectividad
Quema experimental "Rabanales 2"	20	Línea sin vegetación de 4 m y franja desbrozada mecánicamente de 7,5 m	Vp = 22-25 m/min LI = 2,5 - 5,7 m La presencia de la línea decapada permitió incrementar el rendimiento de la brigada	Sí (contención del frente sin salto de focos secundarios fuera de actuación)
Incendio interfaz agrícola-forestal 1	20	Línea sin vegetación de 4 m de anchura	Vp = 1-2 m/min LI = 0,3-1 m La línea permitió el ataque directo (brigada y medio aéreo)	Sí (no se produjeron saltos secundarios debido a la baja disponibilidad del combustible)
Quema experimental "Rabanales 1"	50	Franja desbrozada mecánicamente de 7,5 m	Vp = 20-40 m/min LI = 1,5-5 m La intensidad del frente y el rendimiento de una brigada no permitieron el control	No (dada la velocidad no se pudo contener todo el frente que tocó la actuación)
Incendio interfaz agrícola-forestal 2	100	Línea de defensa de 20 m de anchura	Vp = 20-30 m/min LI = 1-3 m El cortafuegos permitió el ataque directo mediante 3 brigadas y 3 autobombas con apoyo de un	Sí (aunque se produjo un salto masivo de focos secundarios entre 5-25 m)

			helicóptero y un avión de carga en tierra	
Incendio interfaz agrícola-forestal 3	150	Carretera de 47 m de anchura	Vp = 20-30 m/min LI = 2-3 m La carretera permitió el ataque directo apoyado en avión de carga en tierra y un helicóptero (3 autobombas y tres brigadas)	Sí (aunque se produjeron saltos de focos secundarios hasta 109 m)
Incendio interfaz agrícola-forestal 4	300	Línea perimetral sin vegetación de 20 m de anchura	Vp = 32-35 m/min LI = 2-4 m Dos aviones carga en tierra, 1 medio aéreo y tres brigadas	No (el incendio saltó la actuación sin poder contener el frente, hasta la segunda descarga de los aviones fuera de la actuación)
Incendio interfaz agrícola-forestal 5	900	Línea decapada de 7 m y área preventiva de defensa de 50 m de anchura	Vp = 10-15 m/min LI = 1,5 - 3 m La línea decapada fue superada pero el APD permitió el trabajo (2 aviones, 3 helicópteros, 1 BRICA, 1 Kamov, 3 brigadas y una autobomba)	Sí, tanto en flanco como en cabeza se produjeron dos focos secundarios fuera de la actuación. los medios aéreos posibilitaron el control de estos focos
Incendio interfaz agrícola-forestal 6	1000	Línea perimetral de 15 m de anchura	Vp = 20-30 m/min LI = 3-5 m Dos aviones carga en tierra, 4 helicópteros, 1 Kamov, 1 BRICA, 3 brigadas y 3 autobombas no permitieron el control	No (el fuego saltó rápidamente al matorral provocando un incendio de gran intensidad)

La dificultad de extinción en los escenarios de combate (RODRÍGUEZ Y SILVA ET AL., 2014) desarrolló un papel fundamental en las labores de control del fuego. La realización de tratamientos perimetrales, a modo de actuaciones lineales desbrozadas, disminuyó la dificultad del combate un 15,68%. Sin embargo, si este tratamiento perimetral es acompañado de un área preventiva o banda colindante la dificultad de extinción experimentó un descenso del 27,76-65,92%, en base a la dimensión y tipología del tratamiento.

Los rendimientos operacionales también se vieron afectados por la realización de actuaciones perimetrales o en la zona de contacto entre los cultivos y el monte. En este sentido, se identificaron unas diferencias comprendidas entre los de 5,6 m/min a 11,5 m/min en la contención del frente con ayuda de medios aéreos y, una menor necesidad de agua para la sofocación, oscilando las necesidades hídricas entre 0,40 l/m<sup>2</sup> y 1,22 l/m<sup>2</sup>. La SSD disminuyó considerablemente de 4 a 25 m, a tenor del comportamiento del fuego desarrollado por este tipo de actuaciones.

En cuanto a las condiciones de trabajo de los combatientes, las dos quemas experimentales aportaron información bajo condiciones de intensidad del frente muy diferentes (Tabla 2). Se pudo constatar la gran ventaja de disponer una franja sin vegetación junto a un área preventiva de defensa (Figura 2). La franja decapada permitió el trabajo en el borde del área preventiva o preventiva en las condiciones de fuego de "Rabanales 2" (puesto que el calor a esa distancia fue inferior a 7 kW/m<sup>2</sup>). Sin embargo, a pesar de la existencia de esta línea decapada en las condiciones de fuego de "Rabanales 1" no se podría haber trabajado en el borde del área desbrozada sin apoyo de medio aéreo (en Figura 2 se puede apreciar como el calor recibido es superior a los 7 kW/m<sup>2</sup> a 4 m del frente de llama).

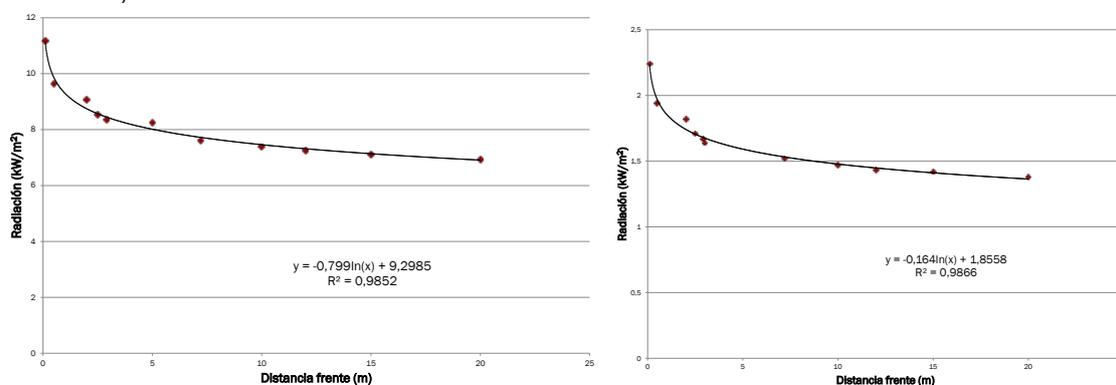


Figura 2. Calor hipotético recibido por los combatientes en el área desbrozada de las parcelas de experimentación "Rabanales 1" y "Rabanales 2" de acuerdo a las condiciones del fuego y a la distancia al frente de fuego

## 5. Discusión

El comportamiento del fuego resulta esencial para identificar la respuesta de una actuación preventiva (MOLINA ET AL., 2011; AGER ET AL., 2012), no sólo en cuanto a la velocidad de propagación y longitud de llama se refiere, sino también en cuanto al tamaño del frente, a los medios de extinción requeridos y a las condiciones de seguridad de los combatientes. Las parcelas de quema dispusieron de unas condiciones similares a un incendio en la interfaz agrícola-forestal, con velocidades de propagación de hasta 41 m/min y longitudes de llama de hasta 5,7 m. Sin embargo, no se alcanzaron tamaños de frente tales como los registrados en algunos incendios acontecidos en Andalucía (Tabla 3). El análisis de la efectividad de los trabajos preventivos requiere de la consideración de un tamaño de frente mayor al de las parcelas experimentales. En este sentido, un análisis de la efectividad a dos escalas (quemadas controladas e incendios reales) supone una aproximación complementaria e integral a la problemática considerada.

El rendimiento operacional de los medios de extinción depende del modelo de combustible, la pendiente y el cansancio (CHICO, 2004; BROYLES, 2011). La modificación del modelo de combustible, anclado en un camino a modo de tratamiento preventivo en la zona de contacto de cultivos y monte, supone ventajas desde el punto de vista de la movilidad y penetrabilidad para los medios terrestres y de eficacia en las labores de combate de autobombas, bulldozers y medios aéreos

(Rodríguez y Silva, 2004). De igual forma, un tratamiento anclado en un camino supone una mejora desde el punto de vista de la seguridad de los medios terrestres, tanto por la disminución de las necesidades de la "safe separation distance" (BUTLER, 2014) como por su empleo como ruta de escape o zona de seguridad ante una emergencia. No obstante, el calor recibido por combatientes en un área tratada preventivamente puede ser superior a  $7 \text{ kW/m}^2$ , no pudiendo desarrollar ataque directo en el borde de la actuación con el área testigo (Figura 2). En estas situaciones o ante este comportamiento del fuego, es necesario la realización de tratamientos adicionales de carácter preventivo para facilitar el trabajo en el área tratada, a modo de banda colindante o de un dimensionamiento transversal superior de la zona de la actuación. A modo de ejemplo, la presencia de un área decapada (creada o construida mediante una quema de ensanche), previa a un área desbrozada posibilitó el trabajo de los medios de extinción en ataque directo. No obstante, esta información debe manejarse con la cautela de la consideración del tamaño del frente y de los medios de extinción disponibles para las labores de extinción.

El análisis de los escenarios de combate en la interfaz agrícola-forestal arroja como normal general eventos de gran velocidad y un bajo tiempo de residencia, por lo que la anchura del frente de llama no es muy elevada. Por tanto, adopta un papel esencial la longitud del frente de llama. En ataque incipiente, con fuegos de menos de 20 m de frente e intensidades menores a  $4500 \text{ kW/m}$ , el ataque con una brigada con apoyo de una autobomba o un helicóptero resulta eficaz para el control del fuego previo a la llegada al monte. Con tamaños de 50 m del frente e intensidades superiores a los  $10000 \text{ kW/m}$ , estos medios no son efectivos, puesto que no se puede trabajar a menos de 7 m del frente (calor recibido por los combatientes superior a  $7 \text{ kW/m}^2$ ) y el rendimiento no permite el cierre del perímetro a tiempo ( $1,28 \text{ m/min} \cdot \text{operario}$ ). Con frentes de llama de 100-200 m se requirió el empleo de medios aéreos que mitigarán la progresión dinámica y energética del fuego a su llegada al tratamiento. En este sentido, la labor del avión en carga en tierra resultó fundamental para la eficacia de las labores de combate. La dimensión transversal de la zona sin vegetación (20-47 m) no fue tan limitante, y fue más determinante la presencia de autobombas, con objeto del cierre del perímetro antes de que el fuego reviviera. Con frentes de llama con tamaño superior a 900 m, el trabajo de los aviones de carga en tierra también fue fundamental, si bien en esta ocasión el tratamiento preventivo adoptó un papel fundamental. Con el mismo equipo de trabajo (brigadas, aviones, helicópteros y autobombas), en dos incendios de similares características, la existencia de una línea decapada o sin vegetación, y a continuación, un área preventiva con un camino para la accesibilidad del personal, resultó clave para el control del incendio. El tamaño de la línea de vegetación efectiva dispuso de la mitad de la anchura que en la línea no efectiva (7 contra 15 m), por lo que el área preventiva resultó clave. Finalmente, resulta de interés destacar que ante frentes de este tamaño, los helicópteros también adquieren su protagonismo, tanto para la reducción de la progresión energética del fuego para la mejora del rendimiento terrestre como para el control de focos secundarios. Este último hecho se puso de manifiesto con el control de focos secundarios de gran potencial que cayeron a más de 100 m en fondos de barranco, y los cuales fueron neutralizados rápidamente por dos helicópteros de pequeña capacidad.

## 6. Conclusiones

El análisis del comportamiento del fuego y de la resistencia o contacto del fuego con los tratamientos preventivos, constituyen una herramienta de indudable interés para la optimización y eficacia en el diseño de los programas de defensa contra incendios forestales. No obstante, todos estos análisis deben realizarse considerando el tamaño del frente, las condiciones de seguridad y trabajo de los combatientes en las zonas propuestas ante la llegada de un incendio y las combinaciones de medios que hacen eficaz la contención del frente y el salto de focos secundarios.

## 7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06-03) por la financiación prestada para la realización de los trabajos, así como al Centro Operativo Provincial del Plan INFOCA de la provincia de Córdoba por la información facilitada para este estudio.

## 8. Bibliografía

AGER, A.A.; VAILLANT, N.M.; OWENS, D.E.; BRITAIN, S.; HAMANN, J.; 2012. Overview and example application of the Landscape Treatment Designer. General Technical Report *PNW-GTR-859*. 11 pp. USDA Forest Service. Portland.

ALBINI, F.A.; 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Res Pap INT-30. 92 pp. USDA Forest Service. Ogden.

ALEXANDER, M.E., CRUZ, M.G.; 2016. Crown fire dynamics in conifer forests. En: WERTH, P.A. et al. (eds.). Synthesis of knowledge of extreme fire behaviour: Volume 2 for fire behaviour specialists, researchers, and meteorologists. General Technical Report *PNW-GTR-891*. 163-258. USDA Forest Service. Portland.

BROYLES, G.; 2011. Fireline production rates. 19 pp. National Technology & Development Program. USDA Forest Service. San Dimas.

BUTLER, B.; 2014. Wildland firefighter safety zones: a review of past science and summary of future needs. *I.J. Wildland Fire* 23 295-308.

CHICO, F.; 2004. Evaluation of air resources use in wildland fire suppression and methods for measuring their performance. En: GONZÁLEZ, A.; RIBAS, I. (eds.). I Symposium International Air Resources in the Defense against Forest Fires. 195 - 208. Imprenta Enrique Reca. Jaén.

FINNEY, M.A.; 2004. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4. 47pp. Ogden.

HERNANDO, C.; 2009. Combustibles forestales: inflamabilidad En: VÉLEZ, R. (ed.). La Defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. 123-130. McGraw-Hill. Madrid.

JEMES, V.; ENRÍQUEZ, E.; 2015. Experiencias grandes incendios forestales 2010-2013. Perspectiva de la coordinación nacional. En: RODRÍGUEZ Y SILVA, F. (ed.). II Taller Lecciones Aprendidas en Incendios Forestales. 78-87. Universidad de Córdoba. Córdoba.

MOLINA, J.T.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; HERRERA, M.A.; 2011. Potential crown fire behavior in *Pinus pinea* stands following different fuel treatments. *Forest Syst* 20 266-277.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2004. Capitalizing the use of aerial resources experience in forest fire suppression and research. En: GONZÁLEZ, A.; RIBAS, I. (eds.). I Symposium International Air Resources in the Defense against Forest Fires. 167- 184. Imprenta Enrique Reca. Jaén.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA, J.R.; 2012. Modeling Mediterranean forest fuels by integrating field data and mapping tools. *Eur J For Res* 131 571 - 582.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA, J.R.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; 2014. A methodology for determining operational priorities for prevention and suppression of wildland fires. *I.J. Wildland Fire* 24 544-554.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; GUIJARRO, M; MADRIGAL, J; JIMÉNEZ, E; MOLINA, J.R.; HERNANDO, C.; VÉLEZ, R.; VEGA, J.A.; 2017. Assessment of crown fire initiation and spread models in Mediterranean conifer forest by using data from field and laboratory experiments. *Forest Syst* (In Press).

WERTH, P.A.; POTTER, B.E.; ALEXANDER, M.E.; CRUZ, M.G.; CLEMENTS, C.B.; FINNEY, M.A.; FORTHOFFER, J.M.; GOODRICK, S.L.; HOFFMAN, C.; JOLLY, W.M.; MCALLIESTER, S.S.; OTTMAR, R.D.; PARSONS, R.A.; 2016. Synthesis of knowledge of extreme fire behaviour: Volume 2 for fire behaviour specialists, researchers, and meteorologists. General Technical Report *PNW-GTR-891*. 258 pp. USDA Forest Service. Portland.