



2022  
Lleida

27 · 1  
junio · juny  
juliol · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

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

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

## **“Diseño de áreas cortafuego según las Distancias de Separación Segura en función de la radiación emitida por el combustible existente”**

SAMPER SANCHEZ, D.<sup>1</sup>

1 Técnico Forestal del Consorcio Provincial Bomberos de Valencia.

### **Resumen**

De forma tradicional se han calculado las anchuras de las áreas cortafuego a partir de la longitud de llama multiplicado por un factor determinado según el tipo de área cortafuego. Actualmente las áreas cortafuego se plantean como zonas de oportunidad donde los bomberos forestales puedan realizar sus tácticas de la forma más segura posible. Con este objetivo, se propone que el cálculo de la anchura del área cortafuego se base en la distancia de separación segura (DSS). Esta distancia es aquella en la que el cuerpo del bombero forestal correctamente equipado soportaría una radiación térmica asumible que no le pudiera provocar daños en su cuerpo. Al mismo tiempo, se debe de plantear que el diseño de las áreas cortafuego debe de orientarse a la mejora de la seguridad de los bomberos forestales y realizarse con objetivos de eficiencia, eficacia y durabilidad.

### **Resum**

De forma tradicional s'han calculat les amplàries de les àrees tallafocs a partir de la longitud de la flama multiplicada per un factor determinat segons el tipus d'àrea tallafoc. Actualment les àrees tallafocs es plantegen com zones d'oportunitat on els bombers forestals poden executar les seves tàctiques de la manera més segura possible. Amb este objectiu, es proposa que el càlcul de l'amplària del àrea tallafoc es base en la distancia de separació segura (DSS). Aquesta distancia es aquella en la que el cos del bomber forestal correctament equipat pot suportar una radiació tèrmica assumible que no li pugui provocar danys en el seu cos. Al mateix temps, es deu de plantejar que els treballs d'execució de les àrees tallafocs deuen d'orientar-se en la millora de la seguretat dels bombers forestals i realitzar-se amb objectius d'eficiència, eficàcia i durabilitat.

### **Palabras clave**

Distancia de separación segura, modelo de combustible, radiación térmica, prevención incendios forestales, extinción incendios forestales, seguridad.

## **1. Introducción**

En el mundo forestal de sobra es conocido el triángulo del Incendio Forestal, en el que cada lado representa una componente con gran peso sobre el comportamiento del fuego (VÉLEZ et al 2000) Este comportamiento del fuego deriva de unas condiciones meteorológicas dinámicas sobre una topografía en la que se establecen los diferentes modelos de combustibles.

En lo referente a los combustibles forestales, cabe decir que desde la década de los cuarenta del pasado siglo la superficie forestal española no ha dejado de crecer llegando a tener una tasa de crecimiento anual entre 1990 y 2005 del 2,19% (“Situación de Los Bosques y Del Sector Forestal En España-ISFE 2010” 2010) y un crecimiento del 1,2% entre 2004 y 2018 con una superficie forestal del 55,2% respecto al total (CACHÓN DE MESA et al., 2018).

El Cambio Climático es un hecho contrastado que ya está afectando de forma negativa al estado de las masas forestales a nivel global, modificando la calidad de la estación en amplias zonas, exponiéndolas a condiciones más secas y cálidas, que se traduce en que las masas forestales, tal como la conocemos hasta ahora, estén sufriendo un cambio, por la aparición del proceso de la seca en la vegetación, proliferación de enfermedades y plagas, y la alta

disponibilidad del combustible vivo o acumulación de combustible muerto también muy disponible (QUÍLEZ R., 2020). Desde el punto de vista meteorológico, se ha quedado patente que existe un cambio climático que provoca datos extremos de las variables meteorológicas que se vienen sufriendo en los últimos años (BOSCA et al. 2012). Se batieron récords año tras año de máximas temperaturas, velocidades de viento y grandes nevadas en diferentes temporales de consideración que han dañado grandes masas forestales (aumentando el combustible muerto disponible), sequías estivales mucho más acusadas, etc., que configuran una de las peores situaciones atmosféricas en lo referente a incendios forestales (GREENPEACE ESPAÑA, n.d.)

Respecto a las áreas cortafuego, históricamente se han diseñado como zonas donde se pretendía que el fuego se pudiera detener de forma pasiva sin prácticamente la intervención de los medios de extinción de incendios forestales, pero la realidad siempre ha sido muy distinta (QUÍLEZ R. 2016). El Cortafuego (firebreak) es una parcela de terreno, de forma lineal, donde los combustibles son eliminados totalmente hasta suelo mineral mediante una combinación de tratamientos físicos, mientras que el área cortafuego (Fuelbreak) es una parcela de terreno lineal o areal cubierta de vegetación donde los combustibles han sido reducidos tanto en volumen como en inflamabilidad mediante tratamientos físicos y gestión del territorio como el pastoreo, el uso del fuego prescrito, o tratamientos silvícola favoreciendo una vegetación menos inflamable y con menos carga que hace que los incendios forestales puedan ser controlados de forma más segura y efectiva (SIETTOS, C. et al 2018).

Este nuevo concepto supone que los cortafuegos no tienen como función frenar el avance del fuego sino servir como elemento para que los equipos de extinción ataquen con mayor seguridad y eficacia al fuego forestal más de una forma activa, a través de tácticas que en los momentos necesarios aumenten la anchura efectiva del área cortafuego, normalmente mediante contrafuegos o cualquier otro sistema (VIGNOTE et al., 2007). En algunos incendios descritos en Australia, debido a la capacidad que tiene la corteza del eucalipto, las pavesas son capaces de trasladarse a grandes distancias (mayores de 20 km), transportadas por corrientes potentes de viento en altura, que luego precipitan a superficie generando nuevos incendios forestales (QUÍLEZ R., 2013). Llegados a este punto está claro que el concepto tradicional del cortafuego pasivo no tiene sentido y que el concepto de seguridad de los medios de extinción debe de primar frente a otro concepto de eficiencia o eficacia.

La zona de seguridad y la distancia de seguridad son conceptos idénticos, definiéndola a partir de ahora en este trabajo como la "Distancia de Separación Segura" (DSS) en base a lo propuesto por Butler y Parsons (BUTLER et al., 2015a). El Servicio Forestal de los Estados Unidos define una zona de seguridad como "un área planificada previamente de tamaño suficiente y adecuada, que se espera que proteja al personal de bomberos de peligros conocidos sin utilizar refugios contra incendios" (NWCG n.d.). El término "zona de seguridad" aparece por primera vez en la literatura oficial en los Estados Unidos a raíz del incendio de Inaja donde murieron 11 bomberos (SCHOROEDER, M.J. & TAYLOR 1968; ZIEGLER 2007). El Servicio Forestal de los Estados Unidos emitió un informe que destacó la necesidad de una mejor capacitación recomendando que todos los bomberos identifiquen zonas de seguridad en todo momento al combatir incendios forestales (MCARDLE 1957). Este documento derivó en las "The ten Standard Firefighting Orders" (NWCG n.d.), conocidas en España como "las 10 normas en el combate contra los incendios forestales".

Se han realizado muchos trabajos de diferentes autores para determinar las zonas de seguridad de los bomberos forestales (BUTLER et al., 2015a; BUTLER et al., 2004; BUTLER & COHEN, 1998; BUTLER & COHEN, 2000; ZÁRATE et al., 2008) tanto con modelos empíricos como con modelos matemáticos, pero ha sido habitual que para el diseño de las anchuras de las áreas cortafuego se sigan metodologías como la propuesta por Velasco (VELEZ et al, 2000) en las que las medidas definitivas son resultado de la longitud de la llama obtenido en el programa informático Behave multiplicado por un factor según el orden del área cortafuego. Como ejemplo los **factores de multiplicación (Tabla 1)** usados en las planificaciones regionales de la Comunidad Valenciana y Castilla la Mancha.

*Tabla 1 Factores de multiplicación para obtener anchuras de cortafuego.*

Región	Factor de multiplicación		
	1er orden	2º orden	3er orden
Comunidad Valenciana	10	4	2
Castilla la Mancha	8	4	

Por el contrario, no se ha encontrado ninguna publicación en la se hayan realizado planificaciones de anchuras de áreas cortafuego en función de la radiación máxima emitida por un determinado modelo de combustible que pueda soportar un bombero forestal completamente equipado con su equipo de protección individual.

## 2. Objetivos

Actualmente en la Comunidad Valenciana sigue vigente el Plan de Selvicultura Preventiva (PSP) de Incendios Forestales redactado en el año 1996. Debido al tiempo transcurrido, es necesario un nuevo cálculo de las áreas cortafuego, pero implementando nuevas metodologías basadas en las DSS de los modelos de combustible existentes. A esta conclusión se llega debido a:

- Se ha publicado en el año 2019 un nuevo modelo de combustibles de la Comunidad Valenciana mucho más exacto con una resolución de 10x10 metros de píxel, y aplicando los modelos de combustible de Scott & Burgan (SCOTT & BURGAN 2005).
- Actualmente la vasta red de estaciones meteorológicas existentes de los diferentes organismos oficiales (Aemet, etc.) así como de organismos no gubernamentales sin ánimo de lucro (Avamet, etc.) hace que se dispongan de muchos más datos y más cercanos a las zonas donde se planificarán las áreas cortafuego (AACC).
- Se pueden aplicar algoritmos más exactos que los aplicados en el PSP para determinar la distancia a la que un medio de extinción llega al límite máximo admisible de exposición a calor radiante de un frente de llamas.
- Se dispone de un histórico de incendios forestales más amplio, con datos mucho más exactos de la meteorología de cada incendio, vectores de propagación, comportamientos extremos, etc.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es la determinación de las diferentes anchuras de las áreas cortafuegos en una parcela de los montes de la Comunidad Valenciana en base a la distancia de separación segura (DSS) según el modelo de combustible existente.

## 3. Metodología

El cálculo de las anchuras de las áreas cortafuegos se va a determinar mediante el cálculo de la distancia separación segura (DSS), que es aquella a la que un bombero forestal completamente equipado con su equipo de seguridad con la cabeza y cuello protegido puede soportar la radiación que un posible incendio forestal emita justo cuando llegue al borde del área cortafuego.

El modelo de zona de seguridad presentado por Butler y Cohen en 1998 (BUTLER & COHEN, 1998) asume una temperatura de llama constante de 1200 K y una anchura de llama constante de 20 metros. El modelo predice que la distancia mínima necesaria entre un bombero forestal y la llama para prevenir quemaduras de segundo grado equipado con prendas Nomex es una función de la altura de llama. Existe una regla de este trabajo en la que se asume que la distancia de seguridad debe de ser 4 veces la altura de la llama para estar por debajo del umbral

de 7 kW/m<sup>2</sup> de radiación recibida por el bombero forestal (umbral de supervivencia). Este estudio sólo contempla el calor por radiación y no tiene en cuenta el calor convectivo.

Se pueden observar **los diferentes efectos según el umbral de radiación recibida en la Tabla 2.**

*Tabla 2 Efectos de la radiación térmica en función del umbral. Extraído de Zárate et al (ZÁRATE et al 2008).*

Radiación térmica (kW/m <sup>2</sup> )	Efectos
1,4	Radiación inofensiva para personas sin especial protección
1,7	Mínimo requerido para causar daño
2,1	Mínimo requerido para causar daño tras 60 segundos
4	Causa quemaduras de primer grado tras una exposición de 20 s
4,7	Causa daño en 15-20 segundos y quemaduras después de 30 s
7	Máximo valor tolerable para bomberos forestales completamente cubiertos con ropa de protección especial con Nomex (BUTLER & COHEN 1998)
10	Determinados polímeros pueden entrar en ignición (LILLEY 2012)
11,7	Acero fino parcialmente aislado puede perder integridad mecánica
12,6	Madera puede entrar en ignición tras una larga exposición; 100% letal (CROCKER & NAPIER, n.d.)
25	Acero fino totalmente aislado puede perder integridad mecánica
37,5	Daños y colapso de estructuras.

En el presente trabajo se asume como dato válido la radiación soportada de **7 kW/m<sup>2</sup>**, a esta intensidad se puede soportar durante un máximo de 90 segundos sin sufrir quemaduras de segundo grado (BRAUN et al., 1980). Además, al igual que Zárate et al (ZÁRATE et al., 2008) se asume que el cuerpo de las llamas son un cuerpo gris que únicamente emiten calor de radiación por su superficie y no por el total de cuerpo de las llamas.

### 3.1. Consideraciones geométricas

Se toma un frente de llamas rectangular de 20 metros de anchura, mientras que la altura de las llamas es un parámetro derivado de las características de cada modelo de combustible y de las condiciones ambientales (humedad, temperatura y velocidad de viento, principalmente). Siendo la longitud de las llamas del frente uno de los parámetros obtenidos en el programa informático BehavePlus.

El objeto receptor de la radiación emitida por el frente de llamas es un rectángulo superpuesto al cuerpo de un bombero forestal (**Figura 1**).



Figura 1 Superposición de rectángulo sobre bombero forestal. Imagen del autor.

En el estudio de radiación se establece que no hay ningún objeto que interfiere entre la posición del rectángulo del frente radiante y el rectángulo del receptor.

### 3.2. Parámetros meteorológicos y de los modelos de combustible

Se pueden observar los parámetros ambientales y de los combustibles establecidos para en este trabajo en la

**Tabla 3.** Estos datos están extraídos del cálculo de la “peligrosidad” y del documento “metodología de Peligrosidad” del Plan de Prevención de Incendios Forestales de la Demarcación de Alcoi (*METODOLOGÍA PELIGROSIDAD. PLAN PREVENCIÓN INCENDIOS FORESTALES DEMARCACIÓN DE ALCOI*, n.d.). Los modelos de combustibles utilizados en el presente trabajo son los utilizados en la nueva capa de modelos de combustible de la Comunidad Valenciana publicada en 2019 (GENERALITAT VALENCIANA y SERVEI DE PREVENCIÓ D'INCENDIS FORESTALS, 2020), modelos basados en el trabajo de Scott y Burgan (SCOTT & BURGAN 2005). De este documento se obtienen las características propias de cada modelo de combustible.

Respecto a la pendiente del terreno, se parte de que está situado en un terreno llano, ya que a posteriori se modificarán los resultados de la DSS según el factor pendiente (Fp) en cada zona.

Tabla 3 Parámetros ambientales y de los combustibles aplicados.

Parámetro	Dato
Temperatura (°C)	40
Humedad relativa (%)	15
Velocidad del viento (km/h)	45
Humedad combustible muerto 1 h (%)	6
Humedad combustible muerto 10 h (%)	8
Humedad combustible muerto 100 h (%)	10
Humedad herbáceas vivas (%)	80

Humedad leñosas vivas (%)	117
---------------------------	-----

### 3.3. Método del factor vista para el cálculo de la DSS

Tras obtener los diferentes datos básicos que componen el algoritmo de calor recibido, se procede a la obtención de la DSS según el modelo del cuerpo sólido (ARNALDOS et al., 2004), obteniendo la distancia “x” para la que la intensidad térmica de radiación sea como máximo de 7 kW/m<sup>2</sup> ya que el cálculo de la radiación recibida es función de la distancia x entre la fuente emisora y el receptor. Para ello, se ha utilizado el método del Yellow book, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (“YELLOW BOOK”. 1997) cuyo cálculo es poco complejo y la situación planteada se asemeja en gran medida a la situación real de un bombero forestal que está situado a cierta distancia de un frente de llamas cuyos parámetros ya se han preestablecido y expuesto (Figura 2).

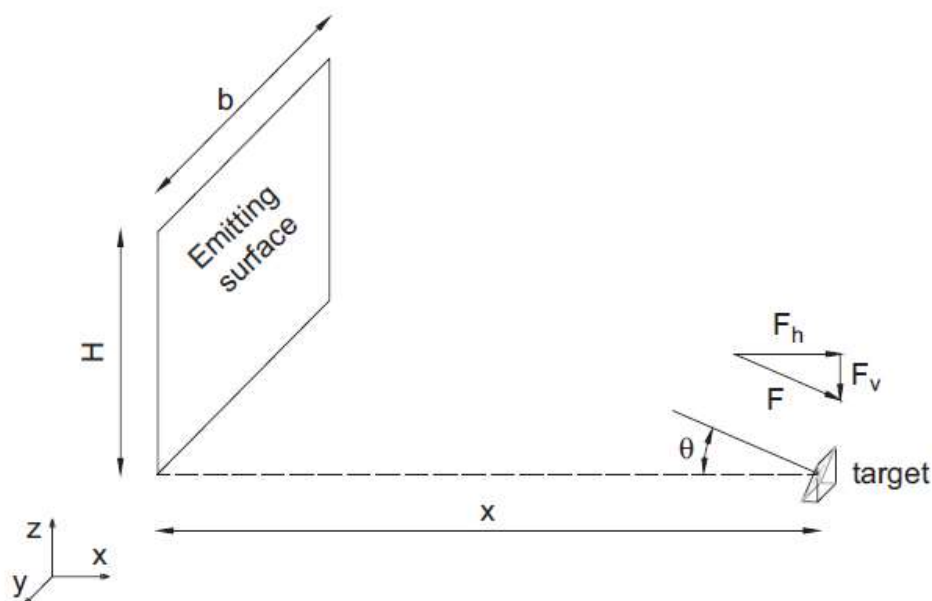


Figura 2 Disposición geométrica considerada para la determinación del factor de vista extraído de Zárate et al (ZÁRATE et al 2008).

### 3.4. Ámbito geográfico de aplicación

El ámbito geográfico de cálculo de las anchuras cortafuego realizado en este trabajo se circunscribe al Parque Natural de Mariola (Figura 3) situado entre las provincias de Alicante y Valencia. La aplicación de las distancias de separación segura se calculará sobre los ejes de los cortafuegos previstos por los planes de prevención de incendios forestales de las demarcaciones forestales de Alcoi y de Xàtiva.





Figura 3. Zonas del ámbito del estudio. Parque Natural de Mariola (Alicante-Valencia).

### 3.5. Material utilizado. Modelo del Cuerpo Sólido.

El modelo del cuerpo sólido suele ser uno de los más utilizados para el cálculo de la DSS entre una fuente emisiva y un cuerpo receptor. Este modelo se sustenta en las siguientes premisas:

- Una geometría de llama tridimensional sencilla (rectángulo o cilindro, comúnmente).
- El calor emitido por radiación se emite por la superficie de la llama (no por el total de la llama).
- El calor recibido ( $Q_r$ ) por el cuerpo receptor se calcula a través de la ecuación (1).

$$Q_r = E_f \cdot \tau \cdot F \quad (1)$$

Donde:

$Q_r$  = Flujo de calor incidente ( $W/m^2$ )

$E_f$  = Poder emisivo de la llama ( $W/m^2$ ) (ver punto 3.5.1.)

$\tau$  = Transmisividad atmosférica (adimensional) (ver punto 3.5.2)

$F$  = Factor de vista (adimensional) (ver punto 3.5.3)

#### 3.5.1. Poder Emisivo de la llama.

El poder emisivo de la llama se calcula a partir de las siguientes fórmulas:

$$E_f = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_f^4 \quad (2)$$

Donde:

$E_f$  = Poder emisivo de la llama ( $W/m^2$ )

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $W/mK^4$ )

$\varepsilon$  = Emisividad ( $W/m^2$ )

$T_f^4$  = Temperatura de las llamas (K)

En el presente estudio se toma el valor de 1200 K (926,85 °C) al igual que Butler y Cohen (BUTLER & COHEN, 1998).

La Emisividad se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-k \cdot S_f) \quad (3)$$

Donde:

$k$  = Coeficiente de extinción (adimensional) que en este trabajo será igual a 0.8 para combustibles forestales (HURLEY, M.J., et al 2016)



$S_f$  = Anchura de la llama (m) que se calcula con la fórmula de Simard (SIMARD et al., 1989) que ha sido respaldada por autores diversos (BROWN et al., n.d.)(ANDERSON & ROTHERMEL, 1966) según el algoritmo:

$$S_f = \sqrt{L_f^2 - H^2} \quad (4)$$

Donde:

$L_f$  = Longitud de la llama (m) obtenida de Behave plus

$H$  = Altura de llama (m) que se calcula de la siguiente manera (ALEXANDER M.E., 1982)

$$H = \sin\varphi \cdot L_f \quad (5)$$

Donde:

$\varphi$  = ángulo de la llama respecto al suelo

$L_f$  = Longitud de la llama (m)

Para el cálculo del ángulo de llama respecto del suelo se utilizará la fórmula planteada Putnam (PUTNAM A., 1965):

$$\varphi = \arctg \left[ 2.24 \cdot \left( \frac{L_f}{u_w^2} \right)^{0.5} \right] \quad (6)$$

Donde:

$u_w$  = velocidad del viento (m/s)

$L_f$  = Longitud de la llama (m)

### 3.5.2. Transmisividad atmosférica

Debido al fenómeno de la transmisividad atmosférica, se debe tener en cuenta que la atmosfera situada entre la llama emisora y el cuerpo receptor absorberá parte de la radiación emitida. El valor de este componente del cálculo del flujo de calor incidente dependerá lógicamente de la distancia entre la llama emisora y el receptor, pero también depende de la humedad relativa del aire y de la proporción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

La **ecuación (7)** es del TNO modificado (SATYANARAYANA et al., 1991) para el cálculo de la transmisividad atmosférica:

$$\tau = 2.02(P_w \cdot x)^{-0.09} \quad (7)$$

Dónde:

$x$  = stancia del receptor a la llama emisora (m)

$P_w$  = Presión parcial del vapor de agua (Pa)

La Presión parcial se obtiene con la **ecuación (8)** de Mudan y Croce (BEYLER C.L., 2016):

$$P_w = 101325 \cdot (H_r) \cdot e^{\frac{14.4114 \cdot 5328}{T_{amb} + 273.5}} \quad (8)$$

Dónde:

$H_r$  = humedad relativa del aire (%)

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente (°C)

El valor máximo de la transmisividad atmosférica será de 1, siendo este el valor para una situación hipotética que no habría humedad en el ambiente ni elementos que pudieran absorber parte de la radiación de la llama emisora, llegando al receptor completamente la radiación emitida por la llama.

### 3.5.3. Factor vista.

Por otro lado, el factor de vista se calcula a partir de las ecuaciones del Yellow book del TNO (BOSCH C., 1997). En el presente trabajo se asume una geometría rectangular cuyas llamas tienen una altura y anchura finita, el cuerpo receptor (bombero forestal) está situado paralelo al rectángulo y a la misma altura que la base del frente de llamas emisor según se puede observar en la **Figura 2**.

El factor de vista se calcula a partir de la **ecuación (9)** :

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[ h_r \cdot A \cdot \arctg A + \left( \frac{B}{h_r} \right) \cdot \arctg B \right]$$

$$x_r = \frac{x}{b} h_r = \frac{L}{b}$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}} B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r^2}} \quad (9)$$

Donde:

x corresponde a la distancia entre la fuente emisora y la fuente receptora

b es la anchura de la fuente emisora (frente de llamas)

L es la altura de la fuente emisora (llama)

Al estar el objeto receptor (bombero forestal) en posición vertical cuyo rectángulo circunscrito a su cuerpo es paralelo al rectángulo del frente de llamas (**Figura 1**), únicamente se calcula el factor de vista vertical ( $F_v$ ).

El flujo de calor incidente sobre el receptor (bombero forestal) que ha sido emitido por el frente de llama (incendio forestal) es función de x, de forma que por cada modelo de combustible (y diferentes distancias) se obtiene un algoritmo logarítmico (con la  $R^2$  lo más cercana a 1) que representa la curva de los datos entre x (distancia entre frente de llamas y bombero) y el flujo de calor recibido ( $Q_r$ ). Como se puede observar en el **Diagrama 1**, se puede determinar a través de la fórmula el valor de "x" para que  $Q_r$  sea igual a 7 kW/m<sup>2</sup>, que es la máxima radiación admisible límite propuesta por este trabajo. En el caso del logaritmo ejemplo, para un "y" igual a 7 kW/m<sup>2</sup>, la distancia a la que el bombero forestal se tiene que situar es de "x" igual 31,43 metros.

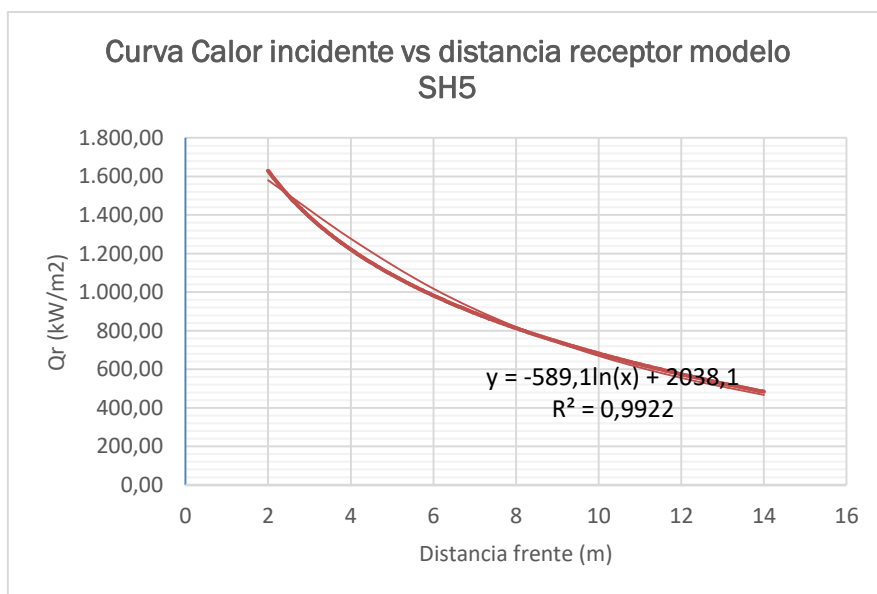


Diagrama 1 Ejemplo de Curva entre la distancia y el de calor recibido para el modelo de combustible SH5.

### 3.6. Coeficiente de pendiente

Como se ha expuesto, la DSS se ha calculado en terreno llano con las peores condiciones de viento, temperatura y humedad relativa observadas en los últimos GIF, pero las ubicaciones de las AACC se encuentran ubicadas en muchos casos en lugares con pendientes considerables, tanto longitudinalmente como transversalmente al área cortafuego. Además, el resultado de la DSS sólo contempla el calor de la radiación, pero no contempla la convección. Está demostrado que el calor de convección puede afectar en gran medida al bombero forestal (BUTLER 2014; BUTLER et al 2015; CAMPBELL et al 2017)

Pocos estudios han intentado caracterizar el flujo de calor convectivo en un ambiente de incendio forestal debido a la inherente complejidad de cálculo y dificultad de medición. Otros estudios también han demostrado que el flujo convectivo puede provocar calentamientos y enfriamientos debido a las succiones de viento debido a la baja presión de la corriente convectiva, a los combustibles, al viento y a las condiciones del terreno (FRANKMAN et al., 2013). Por otro lado, otros autores mayoran el resultado de las DSS con un 20% para tener en cuenta el flujo convectivo adicional (ZÁRATE et al., 2008).

Diferentes trabajos (CAMPBELL et al., 2017; *FIREFIGHTER SAFETY, MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY*, n.d.) determinan que la exposición a vientos fuertes y ubicación en pendientes pronunciadas tiene el potencial de transferir calor de flujo convectivo hasta dos o tres veces la longitud de la llama por delante del frente del fuego. Estos autores propusieron ajustar la DSS utilizando un factor de Viento y pendiente a partir de una sencilla **ecuación (10)** que multiplica por 8 la altura de la vegetación y un factor “viento pendiente”.

$$SSD = 8xH_v \times \Delta \quad (10)$$

Tabla 4 Factor viento-pendiente (*FIREFIGHTER SAFETY, MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY*, n.d.)

Factor viento-pendiente ( $\Delta$ )				
	Pendiente (%)			
Velocidad del viento (m/s)	llano (<20%)	21-30%	31-50%	>50%
suave (0-3)	1	1	3	5
Moderado (4-7)	1,5	2	4	6
Fuerte (8-13)	3	3	6	7,5
Muy Fuerte (>13)	4,5	5	7	9

El presente trabajo contempla una velocidad de **viento fuerte** de 45 km/h (12.5 m/s) según la

**Tabla 4.** Debido a que el viento ya está integrado en el cálculo de Behave Plus, no se debería de mayorar en función del viento, pero sí en función de la pendiente. Por lo que se va a tomar como referencia los parámetros establecidos como vientos “fuertes” y se va a dividir cada factor entre 3 para únicamente obtener el **factor de mayorado de la pendiente (Fp)** según se observa en la **Tabla 5**

Tabla 5 Factor de mayorado según rango de pendiente.

Pendiente (%)	<30%	31-50%	>50%
Factor pendiente (Fp)	1	2	2,5

Como se puede observar, para un rango de pendiente menor al 30% no se mayor la DSS, entre el rango comprendido entre 31 a 50% de pendiente se dobla la DSS, mientras que para pendientes superiores al 50% se aumenta la DSS en 2,5 veces. El resultado de las diferentes DSS modificadas por el Factor pendiente se denominará a partir de ahora DSS\_Fp.

### 3.7. Aplicación de la DSS mediante un SIG (Sistema de Información Geográfica)

Tras haber determinado la DSS para cada modelo de combustible, se asigna a cada modelo de combustible mediante la ayuda de un SIG en la parcela de estudio. Dicho SIG también se utilizará para realizar los buffers, intersecciones, reclasificaciones y diferentes procesos necesarios para obtener como resultado una capa de anchuras de cortafuegos en función de la DSS\_Fp.

## 4. Resultados

Los datos obtenidos del programa Behave Plus según los parámetros de salida establecidos en la

**Tabla 3** para cada modelo de combustible son los que se pueden observar en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Datos obtenidos del Behave Plus. Intensidad lineal de llama (Int. Llama), velocidad de propagación (Vp) y longitud de llama (Lf)

Mod_Com b	Int. Llama kW/m	Vp m/min	Lf m	Mod_Com b	Int. Llama kW/m	Vp m/min	Lf m
gr2	875	20	1,7	sh5	43.355	131,9	10,5
gr4	9.432	110,2	5,2	sh9	76.520	101,2	13,7
gr7	72.065	237,6	13,3	tu1	226	3,3	0,9
gr8	65.739	139,6	12,7	tu2	3.190	36,1	3,2
sh1	8	0,5	0,2	tu3	12.104	72,4	5,9
sh3	779	7,1	1,7	tu5	11.479	21,5	5,7
sh4	6.446	60,3	4,4	sb3	47.595	154,2	11

A partir de estos datos y aplicando los algoritmos del cálculo establecidos en la metodología para determinar la DSS, se obtiene la fórmula logarítmica para cada modelo de combustible que es función de la distancia entre el foco emisor y el receptor. Para cada una de las fórmulas se obtiene la distancia a la que se obtiene una radiación máxima de 7 kW/m<sup>2</sup>. A esta distancia se le suma la anchura del frente de llamas obtenida según la **ecuación (4)** ya que

se establece que la radiación es emitida por la pantalla exterior del frente de llamas y no por toda la anchura de las llamas al igual que Butler y Cohen (BUTLER & COHEN, 1998). Finalmente, por motivos de aumento de seguridad de los bomberos forestales y fácil utilización del dato obtenido, se redondea la cifra al número natural superior **Tabla 7**.

*Tabla 7 Resultados de la DSS para cada modelo de combustible (todos los parámetros en metros)*

Modelo	Regresión logarítmica	Distancia para máxima radiación igual a 7 kW/m <sup>2</sup> (m)	Anchura de las llamas (m)	DSS (m)
gr2	$y = -279,3\ln(x) + 454,91$	4,97	1,65	7
gr4	$y = -520,9\ln(x) + 1496,6$	17,46	4,78	23
gr7	$y = -694,7\ln(x) + 2437,6$	33,07	10,99	45
gr8	$y = -11,99\ln(x) + 41,67$	18,02	10,57	29
sh1	$y = -2,317\ln(x) + 3,9702$	0,27	0,20	1
sh3	$y = -252,6\ln(x) + 445,94$	5,68	1,65	8
sh4	$y = -585,5\ln(x) + 1391,3$	10,64	4,10	15
sh5	$y = -589,1\ln(x) + 2038,1$	31,43	8,98	41
sh9	$y = -563,7\ln(x) + 2129,8$	43,20	11,27	55
tu1	$y = -38,42\ln(x) + 90,529$	8,79	0,89	10
tu2	$y = -386,2\ln(x) + 937,08$	11,11	3,04	15
tu3	$y = -630,3\ln(x) + 1709,3$	14,89	5,37	21
tu5	$y = -624,1\ln(x) + 1674,6$	14,47	5,21	20
sb3	$y = -586,5\ln(x) + 2059$	33,07	9,35	43

Aplicando la DSS mediante un SIG se van obteniendo las diferentes capas de información de modelos de combustible, anchuras de pista forestal, etc. Según se observa en la **Figura 4**.



Figura 4 Imagen de una zona en la que se observan los ejes de las AACC (líneas roja y verde claro), el ancho de la pista forestal (en azul), el ancho del buffer de 65 m (verde oscuro) y los puntos de los centroides de cada píxel del modelo de combustible (colores según modelos).

El resultado de multiplicar la DSS por el Fp es de 34 anchuras diferentes de DSS\_Fp según lo reflejado en la **Tabla 8** por lo que en aras de facilitar una mejor gestión y ejecución de las AACC además de un aumento de la seguridad de los bomberos forestales, se decide reclasificar las medidas de DSS\_Fp a 17 rangos unificando al múltiplo de 5 superior según se observa en la **Figura 5**.

Tabla 8 Resultados de cada DSS\_Fp según modelo de combustible y rango de pendientes establecidos (los porcentajes son sobre el total de centroides)

Pendiente		0%-30%			31%-50%			>50%		
Mod Comb	DSS (m)	1 (Factor pendiente)			2 (Factor pendiente)			2,5 (Factor pendiente)		
		DSS_Fp	puntos	%	DSS_Fp	puntos	%	DSS_Fp	puntos	%
gr2	7	7	6277	5,42%	14	898	0,78%	17,5	32	0,028%
gr4	23	23	211	0,18%	46	62	0,05%	57,5	12	0,010%
gr7	45	45	560	0,48%	90	155	0,13%	112,5	15	0,013%
gr8	29	29	32	0,03%	58	6	0,01%	72,5	0	0,000%
sh1	1	1	5473	4,73%	2	745	0,64%	2,5	119	0,103%
sh3	8	8	24034	20,76%	16	1148	0,99%	20	46	0,040%
sh4	15	15	24252	20,95%	30	2147	1,85%	37,5	60	0,052%
sh5	41	41	4018	3,47%	82	654	0,56%	102,5	46	0,040%



sh9	55	55	6393	5,52%	110	389	0,34%	137,5	21	0,018%
tu1	10	10	661	0,57%	20	133	0,11%	25	5	0,004%
tu2	15	15	26875	23,22%	30	2908	2,51%	37,5	106	0,092%
tu3	21	21	5605	4,84%	42	665	0,57%	52,5	17	0,015%
tu5	20	20	604	0,52%	40	365	0,32%	50	6	0,005%
sb3	43	43	3	0,003%	86	2	0,002%	107,5	0	0,000%

Tras aplicar un buffer correspondiente a la DSS\_Fp (**Figura 5**) de cada centroide, se obtiene tras una intersección de los bordes de pista con el buffer DSS\_Fp, la capa lineal que contiene en cada tramo de las pistas los diferentes DSS\_Fp que se intersectan.



*Figura 5 Buffer de la DSS\_Fp (m) para cada uno de los centroides del modelo de combustible. En negro se observan las líneas de los bordes de las pistas forestales.*

Seguidamente, al aplicar un buffer dinámico a un lado con la información de la DSS\_Fp que contiene cada tramo de la capa lineal de borde de pista se obtiene la capa de anchuras de las AACC como se puede comprobar en la **Figura 6**. En algunos tramos como se han intersectado diferentes DSS\_Fp (colores superpuestos) de varios centroides se observan diferentes anchuras, siendo la mayor de las DSS\_Fp la que debe de ser elegida. Para ello mediante el GIS se disuelven los buffers para obtener el resultado final de las anchuras definitivas para cada tramo del área cortafuego y se recortan las zonas donde son coincidentes con superficies clasificadas Non Burning (**Figura 7**).



*Figura 6 Diferentes anchuras del área cortafuego en función de las DSS\_Fp que han intersectado con el borde de la pista forestal.*



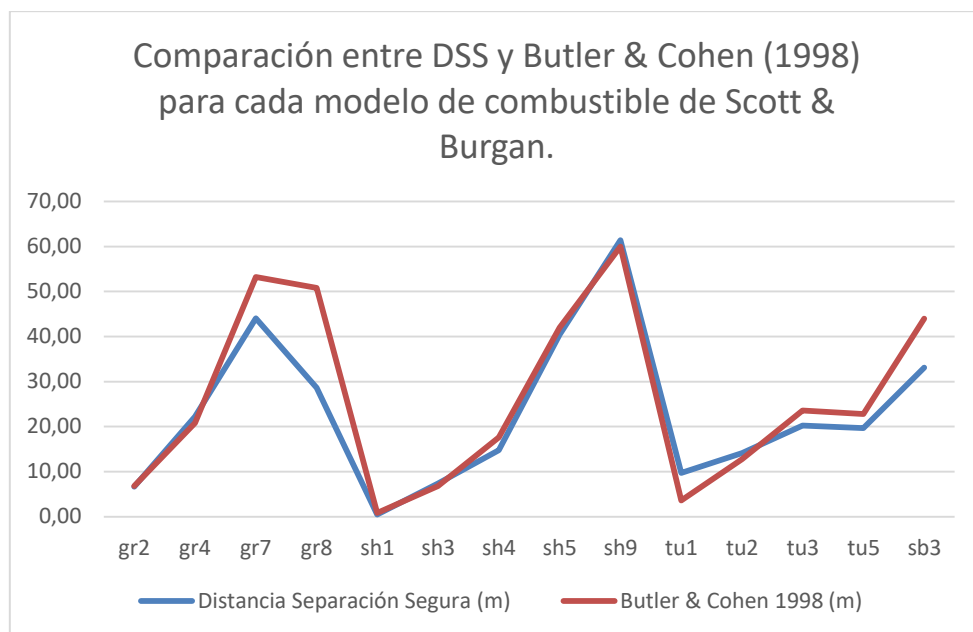
*Figura 7 Resultado de las anchuras de las áreas cortafuego.*

## 5. Discusión

### 5.1. Validación del modelo de cálculo de la DSS

Para testear y validar los resultados obtenidos de las DSS en el presente trabajo de cada modelo de combustible se compara con los resultados obtenidos en Butler y Cohen (BUTLER & COHEN, 1998) en el que se multiplica la longitud de llama de cada modelo de combustible multiplicado por cuatro. Esta comparativa indica una muy buena correlación, como se observa en

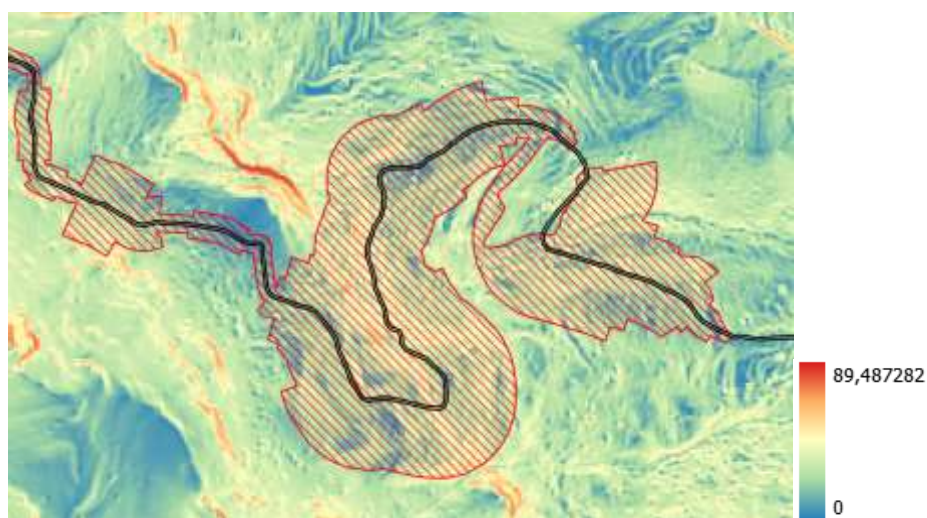
el **Diagrama 2**, a excepción de los modelos más emisivos del grupo de los pastos, GR7 y GR8, de carrizales y cañaverales respectivamente. Esta buena correlación, hace validar el procedimiento de obtención de la DSS.



*Diagrama 2 Comparación entre la DSS y el método de Butler & Cohen*

## 5.2. Mayorado según pendientes

El aumento de la DSS según la pendiente se ha basado en el trabajo de Campbell et al (CAMPBELL et al., 2017) y ha mostrado unos resultados mejor adaptados a las situaciones hipotéticas de un incendio forestal. Esto significa que en aquellas zonas donde la pista forestal se encuentra con pendientes superiores al 30% se dobla la anchura de la DSS, mientras que a pendientes superiores al 50% se mayor en dos veces y media. Como ejemplo, en aquellas zonas que la pendiente es superior al 50% con modelos de combustible (SH9) que emiten una alta radiación térmica, las AACC han aumentado hasta los 140 metros de distancia a cada lado de la pista forestal (**Figura 8**) obteniéndose zonas seguras de 300 metros dentro del área cortafuego.



*Figura 8 AACC (en rayado rojo) sobre superficies con pendientes superiores al 50% (colores verdosos a rojizos).*



### 5.3. AACC apoyadas en pistas forestales.

El presente trabajo ha tomado como supuesto que todas las áreas cortafuego están apoyadas en pistas forestales. Esto en la realidad no es cierto y muchas de las zonas que se han contemplado como pistas no lo son como tal, o siquiera existe una accesibilidad a tales zonas.

Es por ello por lo que plantear zonas seguras en los ejes de las AACC sin pistas forestales no tiene sentido cuando el bombero forestal no puede acceder rápidamente a ellas o peor aún, no puede escapar con la suficiente ligereza en el caso de una situación de atrapamiento.

### 5.4. Interfases Urbano-Forestales

Hay que tener en cuenta que en las planificaciones planteadas no se tienen en cuenta las áreas cortafuego de interfase urbano-forestal. Este aspecto se podría insertar en el mismo procedimiento, pero con unas modificaciones sobre las radiaciones máximas admitidas ya que las estructuras pueden soportar más radiación antes de entrar en ignición.

### 5.5. Capa de los modelos de combustible.

La capa de modelos de combustible que se ha utilizado fue publicada a finales del 2019. Esta capa que abarca a toda la superficie de la Comunidad Valencia, y es una capa ráster cuyo tamaño de píxel es de 10x10 metros. Aunque la resolución es muy buena, se queda algo grande para calcular de forma más eficaz las anchuras de las AACC en función de la DSS\_FP ya que en un píxel de 10 metros de lado el modelo de combustible puede cambiar sustancialmente.

Para futuros trabajos de actualización de la capa de modelos de combustible, sería aconsejable el aumentar la resolución del píxel sobre todo en las zonas circundantes a las AACC. Esto haría mejorar el cálculo, pero teniendo en cuenta que ralentizaría los procesos en el SIG debido a que se multiplicaría la información a manejar.

## 6. Conclusiones

Se pueden calcular anchuras de áreas cortafuegos en función de la radiación térmica que pueden producir los diferentes modelos de combustibles situados en los perímetros de estas. De esta manera se consigue dimensionar adecuadamente la AACC en función del principio de seguridad de los bomberos forestales por encima de todo y para que su trabajo se pueda realizar en las condiciones más adecuadas. Por ello, si se trabaja en una zona que se establece como segura a priori y esto es conocido por todo el dispositivo de extinción, se aumenta la eficacia y la eficiencia de sus acciones ya que se reduce mucho la incertidumbre de saber si se está o no en una zona segura.

El cálculo de la radiación recibida por un cuerpo a determinada distancia del frente de llamas en un incendio forestal es de elevada complicación y se tienen que realizar planteamientos de diferentes parámetros (anchura de frente, forma de las llamas, etc.) que tienden a ser muy cercanos a la realidad. Pese a esto, no se contemplan otros parámetros como la propagación del calor de forma convectiva y cómo puede afectar al cuerpo receptor debido a la complejidad del cálculo matemático. Aunque en el presente trabajo se ha tendido a realizar una aproximación del calor convectivo en base a trabajos de otros autores, queda muy lejos de ser un cálculo fiable y con una adecuada base matemática. Por ello se deberían de plantear futuros trabajos empíricos en los que se pueda determinar cómo afecta el calor convectivo a los miembros de los dispositivos de extinción en los frentes de llamas en diferentes situaciones para obtener modelos matemáticos de fácil aplicación.

La utilización de una capa de combustibles lo más parecida a la realidad y con datos de carga de combustible total lo más fiables posible, es primordial para poder simular y calcular adecuadamente las longitudes de llama, velocidades de propagación, etc. Por ello es necesario un constante trabajo de actualización de los modelos de combustible, en especial de las zonas circundantes a las áreas cortafuego. Hoy en día la utilización de drones de relativo bajo coste que pueden portar cámaras RGB, sensores multiespectrales, LiDAR, etc., son una solución muy buena para el cálculo de la evolución de los modelos de combustible. Estos drones pueden tener

una planificación anual de obtención de datos y posterior tratamiento, para que se puedan utilizar rápidamente por los gestores forestales.

Se ha constatado que existe una gran falta de estaciones meteorológicas que estén situadas en zonas forestales que puedan proporcionar datos fiables y reales que estén afectando a dichas masas. Se debería de crear una red de puntos dentro de las masas forestales de toma automáticos para concretar mucho mejor los datos necesarios para una adecuada gestión integral del territorio. Este factor, el meteorológico (parte importante del triángulo del incendio forestal) es de vital importancia tanto para la planificación de la prevención como para la extinción.

Sin ser objeto del presente trabajo concretar la correcta ubicación de las áreas cortafuego, se ha visto comprobado que las áreas cortafuegos deben de estar apoyadas en pistas forestales transitables y en perfecto estado de mantenimiento. Una buena red de pistas forestales en buen estado frente a un incendio forestal es primordial. Se debe diseñar una buena red de pistas forestales, con anchos normalizados, con radios de curvas adecuados, volvederos, apartaderos y también una adecuada señalización en todos los cruces sobre si las pistas tienen salidas a otras pistas o son terminales.

Los datos matemáticos obtenidos en el presente trabajo deben de ser corroborados de forma empírica mediante experimentos expresamente diseñados para corroborar los resultados obtenidos. En su caso, los trabajos futuros de toma de datos empíricos de radiaciones emitidas por los diferentes modelos de combustible pueden mejorar las diferentes fórmulas que se han aplicado. En el presente trabajo y debido a la gran cantidad de variables que se deben tener en cuenta a la hora del cálculo de la DSS es posible que se hayan cometido errores involuntarios, pero lo que se ha demostrado de manera irrefutable es que se pueden realizar diseños de anchos de AACC con el objetivo de la protección de los bomberos forestales.

Finalmente, y como aplicación más sencilla y directa de los datos de DSS que se han obtenido en el presente trabajo, se podría diseñar una aplicación móvil para los medios de extinción. Hoy en día todas las unidades de extinción de los diferentes dispositivos pueden disponer fácilmente de teléfonos smartphone con altas capacidades de almacenamiento de memoria y con altas velocidades de procesamiento de datos. Se podría disponer de una aplicación móvil con las ortofotos cargadas de forma offline en tarjetas de memoria y una capa en formato XML de los puntos centrales de los píxeles de la capa de modelos de combustible. De esta forma, utilizando la ubicación del smartphone que porta el medio de extinción le puede indicar su posicionamiento y la distancia de separación segura que debería de tener según el modelo de combustible circundante. Así, el responsable de la seguridad del equipo no debe de ir calculando la longitud de llama puede tener el modelo de combustible que les rodea para multiplicarlo por 4 (BUTLER & COHEN, 1998) o ir calculando la velocidad del viento, la pendiente media y la altura de la vegetación (*FIREFIGHTER SAFETY, MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY*, n.d.) (BUTLER et al 2015) del lugar en el que se encuentran.

## 7. Agradecimientos

A lo largo del texto de esta síntesis, se han nombrado diferentes autores que han dedicado su tiempo y esfuerzo a mejorar la seguridad de los bomberos forestales que se esfuerzan en extinguir los incendios forestales. Quiero agradecer profundamente a todos esos autores su dedicación y continua mejora para aumentar la seguridad y salvar las vidas de muchos bomberos forestales. No es posible calcular cuántas vidas de bomberos forestales pueden salvar estos estudios, pero tan sólo con haber salvado la vida de uno sólo habrá valido la pena. No quiero nombrar a ninguno en especial por evitar caer en el error de haberme olvidado de alguno, pero muchos de ellos se mencionan en la bibliografía. Gracias.

También agradecer la ayuda de Ana Isabel González, Técnico de Prevención y Extinción de Incendios Forestales de la Junta de Castilla la Mancha, por su labor en la corrección y mejora de este trabajo.

## 8. Bibliografía

BRAUN (BRAUN E.), COBB (COBB, V. B.), COBLEE (COBLEE, J.), KRANSKY (KRASNY, R.) and PEACOK (PEACOCK, R.) 1980. "Measurement of the Protective Value of Apparel Fabrics in a Fire Environment." *Journal of Consumer Product Flammability*.

ALEXANDER (ALEXANDER, M. E.). 1982. "Calculating and Interpreting Forest Fire Intensities." *Canadian Journal of Botany* 60 (4): 349–57. <https://doi.org/10.1139/b82-048>.

ANDERSON (ANDERSON, E.) & ROTHERMEL (ROTHERMEL, R.C.). 1966. "MECHANISMS OF FIRE SPREAD RESEARCH PROGRESS REPORT NO. INTERMOUNTAIN FOREST AND RANGE EXPERIMENT STATION." *Res. Pap. INT-RP-28. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 29 P. Vol. 28.*

ARNALDOS (ARNALDOS, J.), NAVALON (NAVALON, X.), PASTOR (PASTOR, E.), PLANAS (PLANAS, E.) y ZÁRATE (ZÁRATE, L.). 2004. *Manual de Ingeniería Básica Para La Prevención y Extinción de Incendios Forestales* -. Edited by Institut d'edicions de la Diputació de Barcelona and Edicions Mundi-Prensa. 414 pags. Barcelona.

BEYLER (BEYLER, C.L.). 2016. "Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires." In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*, 2591–2663. Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_66](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_66).

BOSCA (BOSCA, J.V.), ORDOÑEZ (ORDOÑEZ, J.M.) ARANGUEZ (ARANGUEZ, E.) and BARBERÁ (BARBERÁ, M.) 2012. "CAMBIO GLOBAL ESPAÑA 2020/50." [www.ucm.es/info/fgu/pensamiento/cceim/index\\_cceim.php](http://www.ucm.es/info/fgu/pensamiento/cceim/index_cceim.php).

Brown, James K., James K. Brown, and Utah) Intermountain Forest and Range Experiment Station (Ogden. n.d. *Field Test of a Rate-of-Fire-Spread Model in Slash Fuels*. Ogden, Utah : Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture,. Accessed December 5, 2020. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/136923>.

BUTLER (BUTLER, B. W.) 2014. "Wildland Firefighter Safety Zones: A Review of Past Science and Summary of Future Needs." *International Journal of Wildland Fire* 23 (3): 295–308. <https://doi.org/10.1071/WF13021>.

BUTLER (BUTLER, B. W.), PARSONS (PARSONS, R.A.), and MELL (MELL, W.). 2015. "Recent Findings Relating to Firefighter Safety Zones." *Proceedings of the Large Wildland Fires Conference*, 30–34.

BUTLER (BUTLER, B.W.), COHEN (COHEN, J.), LATHAM (LATHAM, R.D.), SCHUETTE (SCHUETTE, P.), SOPKO (SOPKO, P.), SHANNON (SHANONO, K.S.), JIMENEZ (JIMENEZ, D.), and BRADSHAW (BRADSHAW, S.). 2004. "Measurements of Radiant Emissive Power and Temperatures in Crown Fires." *Canadian Journal of Forest Research* 34 (8): 1577–87. <https://doi.org/10.1139/x04-060>.

BUTLER (BUTLER, B.W.), COHEN (COHEN, J.), 1998. "Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating." *International Journal of Wildland Fire* 8 (2): 73–77. <https://doi.org/10.1071/WF9980073>.

BUTLER (BUTLER, B.W.), COHEN (COHEN, J.) 2000. "Field Verification of a Firefighter Safety Zone Model." *Proceedings of the 2000 International Wildfire Safety Summit*, no. August: 10–12.



CACHON DE MESA (CACHON DE MESA, J.), MAJ-BRTT (MAJ-BRITT, L.), ABELLAN (ABELLAN, R.), DAVID (DAVID, R.A). 2018. "Perfil Ambiental de España." *Ministerio de Medio Ambiente de España.*, no. Suelo: 90–103.

CAMPBELL (CAMPBELL, M.J.), PHILIP (PHILIP, E.), BUTLER (BUTLER, B.W.). "Safe Separation Distance Score: A New Metric for Evaluating Wildland Firefighter Safety Zones Using Lidar." *International Journal of Geographical Information Science* 31 (7): 1448–66. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1270453>.

CROCKER (CROCKET, W.P.), and NAPIER (NAPIER D.H.) n.d. "THERMAL RADIATION HAZARDS OF LIQUID POOL FIRES AND TANK FIRES."

"Firefighter Safety | Missoula Fire Sciences Laboratory." n.d. Accessed November 19, 2021. <https://www.firelab.org/project/firefighter-safety>.

FRANKMAN (FRANKMAN, D.), BRENT (BRENT W.), WEBB (WEBB, W.), BUTLER (BUTLER B.W.), JIMENEZ (JIMENEZ, D.), FORTHOFER (FORTHOFER, J.M.), SOPKO (SOPKO, P.). 2013. "Measurements of Convective and Radiative Heating in Wildland Fires." *International Journal of Wildland Fire* 22 (2): 157–67. <https://doi.org/10.1071/WF11097>.

Generalitat Valenciana, and Servei de Prevenció D'Incendis Forestals. 2020. "Clave Para La Identificación de Los Modelos de Combustible de La Comunitat Valenciana," 1–38.

Greenpeace España. n.d. "Proteger El Medio Rural Es Protegermos Del Fuego."

HURLEY (HURLEY, M.J.), GOTTUK (GOTTUK, D.), HALL (HALL, J.R.) et al. 2016. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.

LILLEY (LILLEY, D.G.). 2012. "Minimum Safe Distance from Pool Fires." <https://doi.org/10.2514/2.5623> 16 (4): 649–52. <https://doi.org/10.2514/2.5623>.

MCARDLE (MCARDLE, R.E.) 1957. "Standard Fire Fighting Orders." *Fire Control Notes* 18, 151–52.

*Methods for the Calculation of Physical Effects : Due to Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases), "Yellow Book"*. 1997. 3rd editio. The Hague: Sdu Uitgevers.

"Metodología Peligrosidad. Plan Prevención Incendios Forestales Demarcación de Alcoi." n.d. Accessed December 7, 2020. [http://www.agroambient.gva.es/auto/prevencion-incendios/Por-demarcacion/Alcoi/03.An%E1lisis del riesgo de incendio/Metodologia peligrosidad.pdf](http://www.agroambient.gva.es/auto/prevencion-incendios/Por-demarcacion/Alcoi/03.An%E1lisis%20del%20riesgo%20de%20incendio/Metodologia%20peligrosidad.pdf).

NWCG. n.d. "10 Standard Firefighting Orders, PMS 110 | NWCG." Accessed March 18, 2022. <https://www.nwcg.gov/publications/pms110>.

PUTNAM (PUTNAM, A.) 1965. "A Model Study of Wind-Blown Free-Burning Fires." In *Symposium (International) on Combustion*, 10:1039–46. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(65\)80245-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(65)80245-4).

QUÍLEZ (QUÍLEZ, R.). 2020. *Incendios Forestales. Análisis y Operaciones Para Su Combate*. Fundación Pau Costa.

QUÍLEZ (QUÍLEZ, R.). 2013. "Incendios Convectivos En España: Casos de Estudio y

Recomendaciones En Las Estrategias de Extinción «FireStation.» Victoria Gasteiz.  
<https://firestation.wordpress.com/2013/06/15/incendios-convectivos-en-espana-casos-de-estudio-y-recomendaciones-en-las-estrategias-de-extincion-2/>.

QUÍLEZ (QUÍLEZ, R.) 2016. “Prevención de Megaincendios Forestales Mediante El Diseño de Planes de Operaciones de Extinción Basados En Nodos de Propagación.”  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=61676>.

SATYNARAYANA (SATYNARAYANA, K.), BORAH (BORAH, M.), RAO (RAO, P.G.). 1991. “Prediction of Thermal Hazards from Fireballs.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 4 (5): 344–47. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(91\)80048-Y](https://doi.org/10.1016/0950-4230(91)80048-Y).

SCHOROEDER (SCHOROEDER, M.J.), TAYLOR (TAYLOR, B.B.). 1968. “Inaja Fire-1956, Pine Hills Fire-1967 ... Similar, yet Different.” *USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Research Note PSW-183*, 7.

SCOTT (SCOTT J.H.), BURGAN (BURGAN R.E.). 2005. “Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model.”  
<http://www.fs.fed.us/rm/publications>.

SIETTOS (SIETTOS, C.), RUSSO (RUSSO, L.), ASCOLI (ASCOLI, D.) and GIANNINO (GIANNINO F.) 2018. “Firebreak and Fuelbreak.” *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, no. September. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8>.

SIMARD (SIMARD, A.J.), RICHARD (RICHARD W.B.), and SHARON (SHARON L.H.). 1989. “Measuring and Interpreting Flame Height in Wildland Fires.” *Fire Technology* 25 (2): 114–33. <https://doi.org/10.1007/BF01041421>.

“Situación de Los Bosques y Del Sector Forestal En España-ISFE 2010.” 2010. SECF.

VÉLEZ (VÉLEZ, R.) et al.. *La Defensa Contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias*. Edited by S.A. MCGRAW-HILL. Madrid.

VIGNOTE (VIGNOTE, S.) GARCÍA (GARCÍA J.L.), GÓMEZ (GÓMEZ F.). 2007. “DISEÑO DE FAJAS Y ÁREAS CORTAFUEGOS.” In *Conferencia Wildfire 2007*. Sevilla.

ZÁRATE (ZÁRATE, L.), ARNALDOS (ARNALDOS, L.), CASAL (CASAL, J.). 2008. “Establishing Safety Distances for Wildland Fires.” *Fire Safety Journal* 43 (8): 565–75. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.01.001>.

ZIEGLER (ZIEGLER, J.A.). 2007. “The Story behind an Organizational List: A Genealogy of Wildland Firefighters’ 10 Standard Fire Orders.” *Communication Monographs* 74 (4): 415–42. <https://doi.org/10.1080/03637750701716594>.