



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



## El papel de los setos de *Cupressus arizonica* en los incendios de interfaz: análisis de la combustibilidad

**MUÑOZ-NAVARRO, J. A.<sup>1</sup>, VACCA, P.<sup>1</sup>, PLANAS, E.<sup>1</sup>, CABALLERO, D.<sup>2</sup>, ALMEIDA, M.<sup>3</sup>, RIBEIRO, L. M.<sup>3</sup> y PASTOR, E.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico de la Universitat Politècnica de Catalunya.

<sup>2</sup> Fundación Pau Costa.

<sup>3</sup> Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial.

### Resumen

La ocurrencia de incendios forestales en entornos de interfaz e intermix urbano-forestal es un fenómeno en aumento. En este tipo de incendios, el combustible que alimenta al frente de llamas es sustituido —en la interfaz— o reforzado —en la intermix— por una combinación de combustibles artificiales (como vehículos, tanques de hidrocarburos o mobiliario) y vegetación ornamental. Dentro de la vegetación ornamental, es especialmente destacado el papel de los setos. Estos elementos de jardinería, además de facilitar la acumulación de combustibles finos muertos en su interior, se construyen a lo largo de un eje longitudinal. Lo anterior implica un doble rol durante un incendio: por un lado, actúan como fuente de calor y por otro, enlazan lugares distantes de la interfaz (setos rodeando un jardín, a lo largo de una calle, delimitando parcelas, etcétera) facilitando la percolación del fuego. En el presente trabajo, enmarcado dentro del proyecto WUIVIEW, se ha cuantificado la magnitud de este problema, muestreando setos de ciprés de Arizona (*Cupressus arizonica*) en distintas etapas de crecimiento y analizando su combustibilidad con ensayos de laboratorio y con simulaciones basadas en dinámica de fluidos computacional mediante la herramienta FDS (*Fire Dynamics Simulator*), permitiendo conocer la variación en la distribución de los combustibles y estimar su comportamiento bajo distintas condiciones meteorológicas.

### Palabras clave

*Fire Dynamics Simulator*, interfaz urbano-forestal, vegetación ornamental.

### 1. Introducción

La Interfaz Urbano-Forestal (IUF) ya ha sido definida como un entorno conflictivo desde el punto de vista de los incendios forestales y la seguridad ciudadana (Pastor *et al.*, 2020; Mitsopoulos *et al.*, 2015; Calkin *et al.*, 2014; Theobald *et al.*, 2007). En los últimos años se han vivido diversos episodios de pérdida de bienes, estructuras y vidas humanas como consecuencia del impacto de incendios forestales con la IUF (Haynes *et al.*, 2020). Aquí, el combustible que alimenta al frente de llamas es sustituido —en la interfaz— o reforzado —en la intermix— por una combinación de combustibles artificiales (como vehículos, tanques de hidrocarburos o mobiliario) y vegetación ornamental. Dentro de la vegetación ornamental, destacan los setos, tanto por su valor estético como por su capacidad de dar privacidad, al actuar como *muros verdes*. Estos elementos de jardinería, al arder, no solo actúan como una fuente de calor que puede provocar la entrada del fuego en las viviendas, como el resto de la vegetación ornamental (Evans *et al.*, 2004; Mell *et al.*, 2010), sino que también actúan como un elemento conector de la IUF y conductor del fuego, ayudando a propagar el frente de llamas alrededor de las propiedades y a través del vecindario (e.g. Ganteaume, 2018; Dietenberger, 2010). La Figura 1 muestra como su uso sistemático por parte de los propietarios y los servicios de jardinería municipales construye una red de *sendas de fuego*, conectando lugares distantes del vecindario y trabajando en contra de la compartimentación de las urbanizaciones.



Figura 1. Setos (remarcados en rojo) en una urbanización (Rivas-Vaciamadrid).

Cuando los setos acaban de ser plantados, sus árboles —aun jóvenes— se encuentran separados entre sí o con poco contacto entre ellos. Conforme crecen, comienzan a imbricar sus copas, cerrándose y formando un *muro verde*. Esta configuración favorece la acumulación de materiales finos muertos (Fernandes & Cruz, 2012), lo que ayuda a la propagación del fuego (Ryu et al., 2006). Una selección de especies poco acertada, ciertas técnicas de jardinería o un diseño inadecuado de los jardines desde el punto de vista de la seguridad contra incendios puede aumentar el riesgo derivado de estos setos. A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra dos setos de distintas especies que han sido mantenidos con técnicas distintas; ambos presentan un aspecto exterior saludable, pero solo uno de ellos acumula materiales finos muertos en el interior.

Con esta comunicación pretendemos estudiar el papel de los setos de ciprés de Arizona (*Cupressus arizonica* Greene) en los incendios de interfaz a través del análisis de su combustibilidad, es decir, de su facilidad para arder una vez han entrado en ignición (Anderson, 1970). Para ello hemos comparado setos jóvenes y maduros, valiéndonos de muestreos destructivos, ensayos de quema a escala real, análisis forenses y simulaciones con programas de dinámica de fluidos computacional.

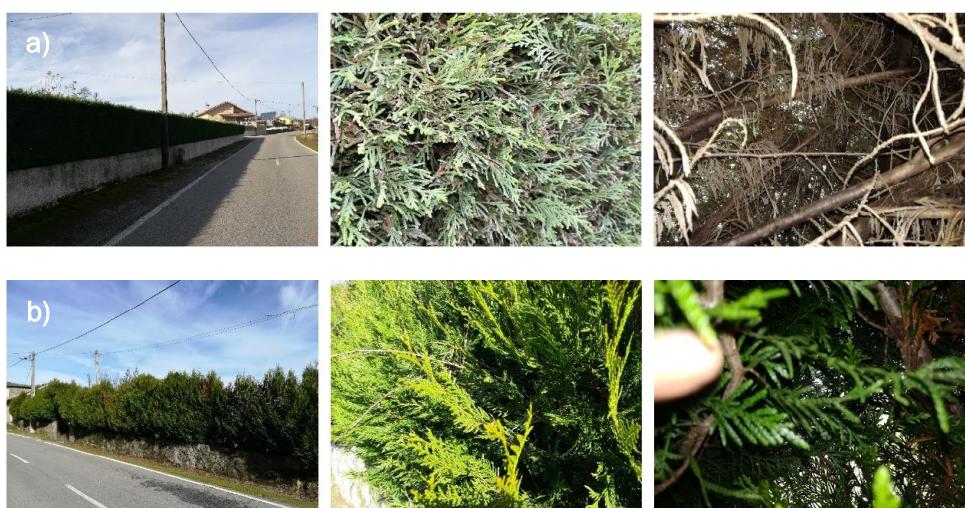


Figura 2. Diferencias entre dos setos de especies distintas con cuidados distintos. a) Seto de ciprés con poda en el que se acumula material fino muerto en el interior; b) seto de tuya sin poda y sin material fino muerto en el interior. Adaptado de Ribeiro et al. (2020).

## 2. Objetivos

El objetivo general de esta comunicación es caracterizar la combustibilidad de los setos de ciprés de Arizona, que hemos identificado como un peligro para la seguridad de las viviendas en las zonas de interfaz urbano-forestal. Para alcanzar este objetivo general hemos planteado tres objetivos específicos:

1. Conocer la distribución del combustible y la humedad en estos setos.
2. Analizar su comportamiento de quema.
3. Comprobar que podemos predecir su comportamiento de quema usando simuladores de Dinámica de Fluidos Computacional como *Fire Dynamics Simulator* (FDS).

## 3. Metodología

### 3.1. Muestreo de combustibles

Para caracterizar a los setos de ciprés de Arizona hemos realizado muestreos destructivos, en los cuales dividimos a los combustibles según su función (tejidos verdes o tejidos lignificados), estado fisiológico (vivos o muertos) y diámetro (menos de 3 mm, entre 3 y 6 mm, entre 6 y 10 mm o mayores de 10 mm) (Mell et al., 2009). En esta comunicación usamos «follaje» para referirnos a los tejidos verdes, excluyendo a ramas y ramillas, que serían tejidos lignificados. Para computar la humedad hemos seguido la Ec. 1. El secado de los combustibles se realizó en estufa a 100 °C durante 24 horas (combustibles más finos de 6 mm) o 48 horas (combustibles más gruesos de 6 mm). Con el fin de conocer la variación espacial de la humedad y de la densidad aparente para cada tipo de combustible, hemos muestreado por separado las distintas partes de las copas. En los árboles jóvenes dividimos la copa en tres secciones de igual altura, mientras que en los setos maduros realizamos dos calicatas, centradas a uno y dos metros sobre el suelo, respectivamente.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de combustible}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 1}$$

### 3.2. Comportamiento de quema

Para estudiar el comportamiento de quema de los setos jóvenes, realizamos 7 ensayos. En cada uno de estos ensayos quemamos 3 árboles en fila imitando a un seto joven, con una separación de 30 cm entre fustes. Para estudiar el efecto del estrés hídrico sobre el comportamiento de quema, aplicamos distintos niveles de riego: en 4 de estos 7 ensayos los árboles estaban correctamente regados, en 2 de ellos no regamos durante un mes y en 1 de ellos no regamos durante tres meses. Estos ensayos se realizaron en el *Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais* de la *Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial* (Lousã, Portugal). Para monitorizar la pérdida de masa ( $\text{Mass}_{(t)}$ ) se colocaron sobre una mesa de carga (ratio de adquisición de datos de  $\approx 1$  Hz; resolución de 0.01 kg; superficie de 2 m<sup>2</sup>). La curva de pérdida de masa permite calcular la Ratio de Pérdida de Masa ( $\text{MLR}_{(t)}$ ; Ec. 2) y, si se normaliza ( $\text{Mass}_{n(t)}$ ; Ec. 3), permite calcular la Ratio de Pérdida de Masa normalizada ( $\text{MLR}_{n(t)}$ ; Ec. 4). La ignición se realizó quemando 2250 ml de alcohol (Etanol desnaturalizado CE 200-578-6 al 90 %) repartidos en una superficie de 0.60 m<sup>2</sup>, 10 cm bajo las copas.

$$\text{MLR}_{(t)} = \frac{\text{Mass}_{(t)} - \text{Mass}_{(t+\Delta t)}}{\Delta t} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{Mass}_{n(t)} = \frac{\text{Mass}_{(t)}}{\text{Mass}_{(t=0)}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3}$$

$$MLR_{n(t)} = \frac{Mass_{n(t)} - Mass_{n(t+\Delta t)}}{\Delta t} \quad Ec. 4$$

Para estudiar el comportamiento de quema de los setos adultos, realizamos un estudio forense de un incendio de interfaz. Este incendio tuvo lugar el 3 de julio de 2020 en Las Rozas (Madrid) y tuvo como eje de propagación un seto adulto de ciprés de Arizona. En el momento del incendio la temperatura ambiente era de 30 °C, con un 30 % de humedad relativa y 20 km/h de viento (Fuente: meteoblue.com) soplando perpendicular al eje longitudinal del seto. Para estimar la geometría de las llamas, usamos las fotografías tomadas durante el incidente. Para calcular el consumo de combustible, medimos el diámetro al extremo de las ramas que carbonizaron pero no llegaron a quemar, y consideramos que todo el combustible más fino que este diámetro se consumió por completo (usando como referencia los datos obtenidos en el muestreo de setos maduros).

### 3.3. Simulaciones

Se han realizado simulaciones de los setos jóvenes. A partir del peso y la humedad de los árboles quemados en los ensayos pudimos extrapolar su distribución de combustibles y humedad mediante los datos detallados de los muestreos destructivos. Con estos datos recreamos los ensayos en FDS, siguiendo la metodología detallada en Mell *et al.* (2009). Utilizamos partículas para representar la vegetación, pero en lugar de distribuirlas homogéneamente, tuvimos en cuenta que dentro del dosel hay zonas con distintas concentraciones de combustible. En nuestras simulaciones, consideramos que la mayor parte del combustible se concentra en el 20 % de la copa, dejando el 80 % del volumen libre de partículas. Consideramos una ratio superficie-volumen de 4000 m<sup>-1</sup> para el follaje, 2666 m<sup>-1</sup> para las ramillas, 888 m<sup>-1</sup> para las ramas de entre 3 y 6 mm y 500 m<sup>-1</sup> para las ramas de entre 6 y 10 mm de diámetro. No incorporamos aquellas ramas más gruesas de 10 mm. En FDS, el combustible primero se deseca y después, una parte se descompone en gases de pirólisis y la otra se carboniza. Después, la parte carbonizada combusciona, liberando más energía y dejando ceniza (McGrattan *et al.*, 2020). Trabajos previos muestran que, en simulaciones de combustibles secos, un 26 % de carbonización se ajusta a las observaciones (Morandini *et al.*, 2019; Perez-Ramirez *et al.*, 2017; Mell *et al.*, 2009). No obstante, menores temperaturas y ratios de calentamiento, como es esperable con contenidos altos de humedad, hacen aumentar la ratio de carbonización (Amini *et al.*, 2017). Además, la humedad interactúa de manera distinta según los tejidos estén vivos o muertos (Price y Fletcher, 2014; Finney *et al.*, 2013; McAllister *et al.*, 2012). Por ello, hemos aumentado el porcentaje de carbonización en simulaciones de tejidos vivos hasta el 50 %. Además, hemos tenido en cuenta que alrededor del 30 % de la humedad de los tejidos vivos se encuentra ligada (Cheney, 1981) y es más complicada de extraer (Anand *et al.*, 2017). Hemos considerado una densidad de la madera de 496 kg/m<sup>3</sup>, compuesta por un 46.81 % de Carbono, un 6.02 % de Hidrógeno, un 1.69 % de Nitrógeno y (por diferencia) un 45.59 % de Oxígeno; estos valores los obtuvimos a través de un análisis elemental. Mediante un análisis del calor de combustión a volumen constante y la composición química del combustible pudimos calcular su entalpía de combustión, de -18589.3 kJ/kg. Para la validación de las simulaciones hemos comparado los resultados de pérdida de masa con los registros de la mesa de carga (Ec. 5), considerando como aceptable diferencias de hasta el 20 %.

$$Difference (\%) = \frac{abs(Mass_{w(t)}^{obs} - Mass_{w(t)}^{sim})}{(Mass_{w(t=0)}^{obs} - Mass_{w(t=T)}^{obs})} \cdot 100 \quad Ec. 5$$

## 4. Resultados

### 4.1. Muestreo de combustibles

Muestreamos tres árboles jóvenes (Figura 3), cuyas características y distribución de combustibles vienen detalladas en la Tabla 1 y en la Tabla 2. El follaje constituyó el principal tipo de combustible, representando al 71 % ( $\pm 9\%$ ) de los combustibles. Los tejidos leñosos más finos de 3, 6 y 10 mm representaron el 13 % ( $\pm 8\%$ ), 11 % ( $\pm 3\%$ ) y 10 % ( $\pm 7\%$ ) del total, respectivamente. No se han incluido los combustibles más gruesos de 10 mm de diámetro. A pesar de tener unas proporciones similares de cada tipo de combustible, estos se repartían de manera distinta en el espacio; en el primer árbol se concentraban alrededor del tronco, con densidades aparentes considerablemente mayores a los otros dos árboles muestreados, que tenían una copa más abierta. El tercer árbol se encontraba seco, tras tres meses de sequía.



Figura 3. Árboles jóvenes muestreados. Escala 1:40.

*Tabla 1 Caracterización de los árboles muestreados. Los valores de Carga y de Densidad Aparente no incluyen el peso de la humedad ni de los combustibles más gruesos de 10 mm.*

	Árbol 1	Árbol 2	Árbol 3
Altura (m)	2.00	2.00	2.40
Carga (kg)	0.48	0.69	1.37
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.07	0.37	0.77
Dens. Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	6.93	1.87	1.78
Humedad (%)	118 %	116 %	20 %

Tabla 2. Carga de combustible (en gramos) y Densidad Aparente (D.Ap. en kg/m<sup>3</sup>) de los árboles muestreados, detallados por secciones y clases diámetricas.

		Árbol 1		Árbol 2		Árbol 3	
		Carga	D.Ap.	Carga	D.Ap.	Carga	D.Ap.
SUPERIOR	Follaje	82	8.68	67	1.28	191	1.25
	ø<3mm	6	0.66	9	0.16	-	-
	ø<6mm	11	1.17	11	0.21	12	0.08
	ø<10mm	9	0.93	6	0.11	-	-
	ø>10mm	-	-	-	-	2	0.01
MEDIO	Follaje	152	4.14	153	2.92	583	3.82
	ø<3mm	24	0.65	10	0.18	-	-
	ø<6mm	14	0.38	46	0.89	62	0.41
	ø<10mm	-	-	4	0.07	78	0.51
	ø>10mm	83	2.26	64	1.22	124	0.82
INFERIOR	Follaje	85	3.70	206	3.94	369	2.42
	ø<3mm	72	3.14	13	0.25	-	-
	ø<6mm	20	0.86	49	0.93	42	0.27
	ø<10mm	4	0.18	118	2.26	30	0.20
	ø>10mm	148	6.47	133	2.55	372	2.44
TOTAL	Follaje	319	4.62	426	0.79	1144	1.72
	ø<3mm	102	1.48	31	0.06	-	-
	ø<6mm	44	0.64	106	0.20	116	0.17
	ø<10mm	13	0.19	128	0.24	109	0.16
	ø>10mm	231	3.35	197	0.37	499	0.75

En el caso de los setos maduros, muestreamos 4 zonas (dos superiores y dos inferiores) de un seto formado por árboles de 45 años de edad en un jardín privado de Las Rozas (Madrid) (Figura 4). En él, el follaje constituía una capa densa de 10 cm de espesor alrededor del seto. Este follaje constituía el 24 % del total de combustibles y albergaba una humedad del 127 %. Tras la capa de follaje se encontraba otra capa, de 25 centímetros de espesor y también densa, con ramillas y restos muertos que constituyan el 62 % del total de combustibles. La humedad en esta capa era aproximadamente del 6 %. Estos restos muertos provenían del follaje, que había muerto tras entrar en sombra. Todos los combustibles finos se concentraban, por lo tanto, en los primeros 35 centímetros y constituyan el 88 % de la carga total disponible (esto es, excluyendo aquellas ramas más gruesas que 10 mm). El centro del seto estaba —casi— hueco, salvo por el tronco principal y algunas ramas. Esta estructura, densa en el exterior pero hueca dentro, sugiere una alta resistencia a la radiación pero una gran sensibilidad a la convección, ya que el aire puede fluir por dentro con facilidad. La Tabla 3 detalla la distribución de estos combustibles dentro del seto. De media, cada metro lineal de seto contenía 55.75 kg de combustible menor de 10 mm de diámetro.

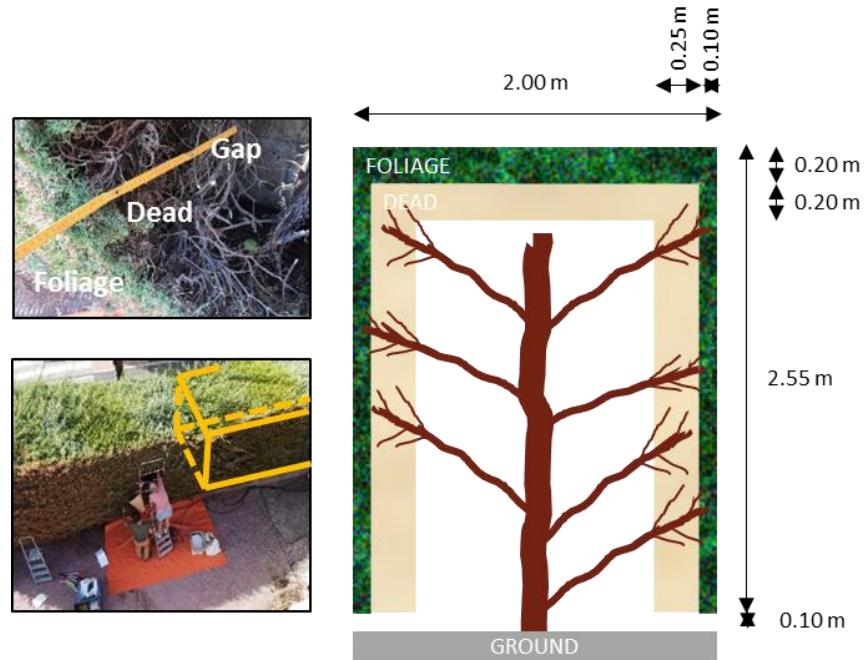


Figura 4. Esquema del seto maduro muestreado. Escala 1:40.

Tabla 3. Carga de combustible (en kg) y Densidad Aparente (D.Ap. en kg/m<sup>3</sup>) del seto muestreado, detallados por secciones y clases diamétricas

		Carga	D. Ap.
SUPERIOR	Leñoso	Follaje 9.76 ( $\pm 1.75$ )	15.73 ( $\pm 2.83$ )
		$\varnothing < 3\text{mm}$ 0.75 ( $\pm 0.04$ )	0.52 ( $\pm 0.03$ )
		$\varnothing < 6\text{mm}$ 1.11 ( $\pm 0.10$ )	0.78 ( $\pm 0.07$ )
		$\varnothing < 10\text{mm}$ 0.91 ( $\pm 0.11$ )	0.64 ( $\pm 0.08$ )
	Muerto	$\varnothing < 3\text{mm}$ 16.68 ( $\pm 6.50$ )	20.59 ( $\pm 8.02$ )
		$\varnothing < 6\text{mm}$ 0.61 ( $\pm 0.44$ )	0.76 ( $\pm 0.54$ )
INFERIOR	Leñoso	$\varnothing < 10\text{mm}$ 0.00 ( $\pm 0.00$ )	0.00 ( $\pm 0.00$ )
		Follaje 3.85 ( $\pm 0.51$ )	15.41 ( $\pm 2.06$ )
		$\varnothing < 3\text{mm}$ 0.59 ( $\pm 0.04$ )	0.67 ( $\pm 0.04$ )
		$\varnothing < 6\text{mm}$ 1.06 ( $\pm 0.19$ )	1.21 ( $\pm 0.22$ )
	Muerto	$\varnothing < 10\text{mm}$ 1.13 ( $\pm 0.16$ )	1.30 ( $\pm 0.18$ )
		$\varnothing < 3\text{mm}$ 17.69	28.31
TOTAL	Leñoso	$\varnothing < 6\text{mm}$ 0.90 ( $\pm 0.02$ )	1.45 ( $\pm 0.03$ )
		$\varnothing < 10\text{mm}$ 0.70 ( $\pm 0.16$ )	1.11 ( $\pm 0.26$ )
		Follaje 13.61 ( $\pm 2.27$ )	15.64 ( $\pm 2.60$ )
		$\varnothing < 3\text{mm}$ 1.34 ( $\pm 0.07$ )	0.58 ( $\pm 0.03$ )
		$\varnothing < 6\text{mm}$ 2.17 ( $\pm 0.29$ )	0.94 ( $\pm 0.13$ )
	Muerto	$\varnothing < 10\text{mm}$ 2.05 ( $\pm 0.27$ )	0.89 ( $\pm 0.12$ )
		$\varnothing < 3\text{mm}$ 25.53 ( $\pm 15.34$ )	20.52 ( $\pm 7.96$ )
		$\varnothing < 6\text{mm}$ 1.52 ( $\pm 0.46$ )	1.06 ( $\pm 0.32$ )
		$\varnothing < 10\text{mm}$ 0.70 ( $\pm 0.16$ )	0.49 ( $\pm 0.11$ )

#### 4.2. Comportamiento de quema

La Tabla 4 muestra las características de los setos jóvenes. Los ensayos del 1 al 3 se realizaron con árboles verdes y de copa estrecha (como el Árbol 1 muestreado), mientras que en el ensayo 4, los árboles también estaban verdes pero tenían una copa más abierta (como el Árbol 2 muestreado). Los árboles de los ensayos 5 al 7 se habían secado por el periodo de sequía de uno y tres meses y tenían la copa abierta (como el Árbol 3 muestreado).

La Figura 5 muestra sucesiones de los distintos comportamientos observados. Los árboles verdes quemaron mediante diversas llamaradas esparcidas en el tiempo, que propagaban verticalmente. Las primeras llamaradas comenzaban en la base de las copas, donde había contacto con las llamas de la fuente de ignición. Más adelante, cuando el calor de la fuente de ignición calentaba y desecaba combustibles a mayor altura, estas llamaradas también comenzaban más alto. Dado que estas llamaradas no progresan horizontalmente, estos setos jóvenes y verdes pueden actuar como combustibles en escalera, pero no propagar el frente de llamas. En el caso de los árboles secos, las llamas propagaron tanto en la vertical como en la horizontal.

La Figura 6 muestra las curvas de pérdida de masa de estos ensayos. Entre los árboles verdes, los de copas estrechas y densas (Ensayos del 1 al 3) quemaron más lentamente que el de copa abierta (Ensayo 4), a pesar de que este último presentaba un mayor contenido de humedad. Los árboles secos quemaron rápidamente, alcanzando picos del 7 % de pérdida de masa por segundo.

**Tabla 4. Características de los ensayos.** La columna «Sequía» indica el número de meses desde el último riego; los árboles con uno y tres meses de sequía estaban secos. Tanto la Carga (en kg) como la Densidad Aparente (D. Ap. en kg/m<sup>3</sup>) incluyen el peso de la humedad y de los combustibles más gruesos de 10 mm. Estas columnas indican el valor medio de los tres árboles de cada ensayo, seguido por la desviación estándar (entre paréntesis).

Ensayo	Sequía	Humedad	Carga	D. Ap.
1	0	102%	1.54 ( $\pm 0.15$ )	27.64 ( $\pm 2.95$ )
2	0	102%	1.64 ( $\pm 0.12$ )	29.35 ( $\pm 1.80$ )
3	0	102%	1.70 ( $\pm 0.04$ )	30.45 ( $\pm 0.25$ )
4	0	140%	2.91 ( $\pm 0.22$ )	5.07 ( $\pm 1.01$ )
5	1	21%	1.48 ( $\pm 0.36$ )	2.77 ( $\pm 0.41$ )
6	1	25%	2.48 ( $\pm 0.85$ )	2.03 ( $\pm 0.31$ )
7	3	27%	1.36 ( $\pm 0.17$ )	1.89 ( $\pm 0.28$ )



Figura 5. Comportamientos de quema observados en setos jóvenes.

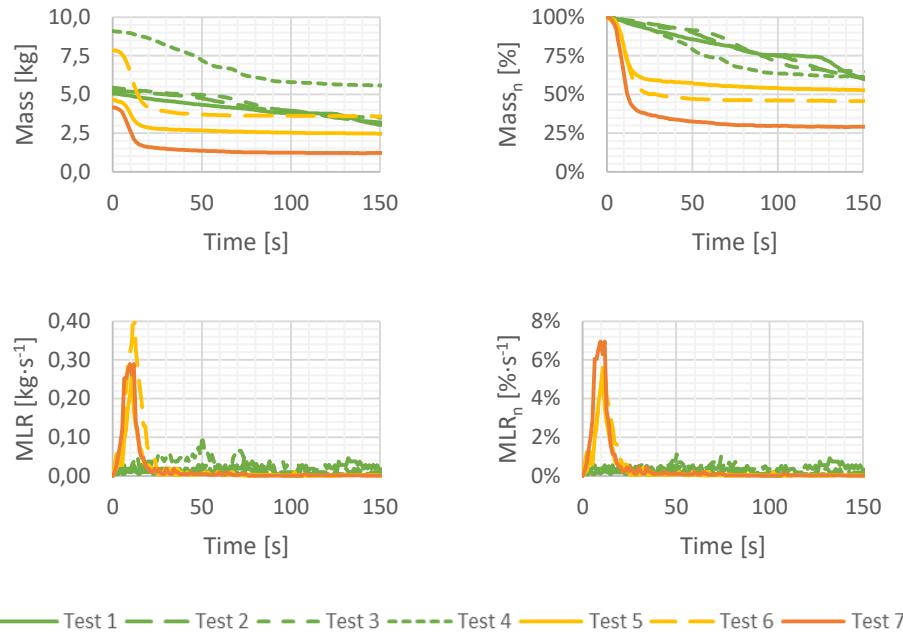


Figura 6. Pérdidas de masa registradas en los ensayos de ciprés de Arizona. El código de color indica el número de meses en sequía: verde, correctamente regado; amarillo, un mes de sequía; naranja, tres meses de sequía.

La Figura 7 muestra el escenario estudiado en el análisis forense. En esta imagen se observa el seto quemado y también el seto maduro muestreado en la Sección 4.1. Para estimar el grado de consumo de combustibles, medimos el diámetro al extremo de las ramas que carbonizaron pero no llegaron a quemar. En total realizamos 109 mediciones repartidas en 4 árboles, que indicaron que las ramas de diámetro inferior a 9.3 ( $\pm 0.32$ ) mm se quemaron totalmente. Redondeando a los 10 mm (que es el diámetro usado en el muestreo) podemos estimar un consumo de 55.75 kg de combustible por metro lineal de seto. Conocidas las dimensiones del seto, estimamos a través de fotografías unas longitudes de llama de 5-6 metros (sobre la altura del seto, que también se encontraba en llamas). El punto 1 de la Figura 7 muestra la posición del seto muestreado respecto al seto quemado. El punto 2 muestra una zona donde la humectación por parte del cuerpo de bomberos impidió la quema del follaje (que, no obstante, socarró) y disminuyó la disponibilidad del combustible, pero no detuvo la propagación.



Figura 7. Imágenes de la zona afectada por el incendio. a) Vista aérea (escala 1:400); b) Tareas de extinción; c) Remanentes del seto tras el incendio.

#### 4.3. Simulaciones

Hemos realizado una simulación por cada uno de los tres tipos de comportamiento observados en setos jóvenes (verde con copa cerrada, verde con copa abierta y seco). Estas simulaciones se corresponden a las secuencias mostradas en la Figura 5. Se observa un buen ajuste entre los valores observados y simulados, con diferencias que en ningún caso superaron el 20 %.

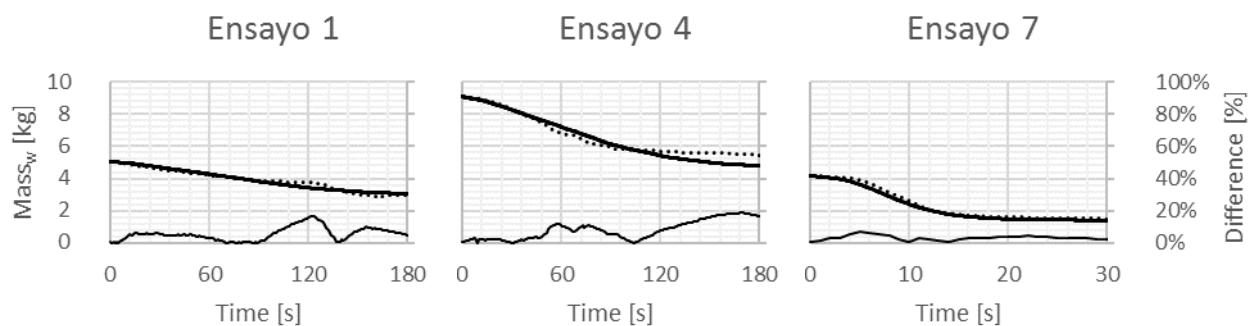


Figura 8. En el eje izquierdo, curvas de pérdidas de masa simuladas (líneas continuas) vs. experimentales (líneas moteadas). En el eje derecho, diferencia entre ambas curvas (línea continua fina).

## 5. Discusión

Cuando los setos de ciprés de Arizona comienzan a formarse, los árboles que lo conforman no suponen una gran amenaza para la seguridad de la interfaz urbano-forestal. Son árboles de tamaño reducido que, ante un fuego bajo el dosel, únicamente serán capaces de actuar como combustibles en escalera. Una prevención básica, como no colocarlos bajo arbolado, parece suficiente para mitigar el riesgo. Es importante, no obstante, mantenerlos adecuadamente, pues hemos visto como un riego deficiente, incluso durante cortos períodos de tiempo, puede secarlos. Estos árboles, si están secos, sí pueden transmitir el fuego. En nuestro estudio, los árboles se encontraban en maceta, la cual limita la expansión del sistema radicular y aumenta la susceptibilidad a la sequía. Otros factores que afectan son la geometría de las copas y la densidad de combustible en estas. Tachajapong *et al.* (2008) y Dahale *et al.* (2013) argumentaron que, para una misma fuente de ignición, mayores densidades aparentes reducen la ratio de energía disponible para calentar el combustible. Asimismo, las copas estrechas se encuentran menos imbricadas, lo que dificulta la transmisión de calor entre ellas (Finney *et al.*, 2010). Las copas amplias presentan continuidad horizontal, dejando escapar menos calor de la superficie. No obstante, existe un óptimo de densidad aparente (Rothermel, 1972); menores densidades aparentes favorecen el enfriamiento convectivo, mientras que mayores densidades aparentes aumentan la acumulación de calor, lo que mejora el calentamiento convectivo y por tanto la temperatura de los combustibles para pirolizar. A su vez, mayores llamas fomentan la liberación de calor radiante (Tachajapong *et al.*, 2008). A medida que estos setos crecen, las copas comienzan a imbricarse, lo que acaba suponiendo la puesta en sombra de parte del follaje, que muere. Estos materiales finos y muertos se acumulan detrás de una capa densa de follaje verde, que da una falsa sensación de vigorosidad. Al principio, estos restos muertos se repartirán por todo el interior del volumen del seto, pero al continuar creciendo en anchura, la zona más interior perderá ramas y por tanto capacidad para retener a estos combustibles finos, que acabarán cayendo al suelo para formar una cama bajo el dosel. En caso de incendio, la gran densidad de follaje verde alrededor del seto actuará como escudo frente a la radiación, pero una vez que entre en ignición, las grandes cargas de combustible, junto a la facilidad de oxigenación desde el hueco interior, favorecerán una propagación potente y alturas de llama considerables. Desde esta perspectiva, sería recomendable el uso de otras especies para la formación de setos que no acumulen materiales finos muertos. La posibilidad de simular en FDS estos setos, tal como se ha demostrado en este trabajo, nos permitirá estudiar como distintos tratamientos, geometrías y acciones preventivas pueden provocar cambios en su comportamiento de quema, sin necesidad de realizar ensayos experimentales, que son costosos y complejos de realizar.

## 6. Conclusiones

Los setos, y especialmente los setos de especies que acumulan materiales finos y muertos, como el ciprés de Arizona, constituyen un peligro para la seguridad de la interfaz urbano-forestal. Este riesgo aumenta a medida que crecen, como hemos podido comprobar comparando la combustión de setos jóvenes con la de un seto maduro. El desarrollo y validación de simuladores nos permitirá, junto a la experimentación, determinar qué tratamientos, geometrías y actividades preventivas minimizarán el riesgo en caso de incendio. Con las herramientas y conocimientos actuales, debemos fomentar el uso de especies menos combustibles y sin continuidad espacial, especialmente dentro de las zonas pobladas de interfaz.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo parcialmente bajo los proyectos CTQ2017-85990-R financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033/ FEDER “Una manera de hacer Europa”, PID2020-114766RB-100 financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 y WUIVIEW

(European Union Civil Protection, GA 826522 UCPM-2018-PP-AG). El primer autor agradece al Ministerio de Universidades la financiación obtenida mediante el programa de ayudas para la formación de profesorado universitario.

## 8. Bibliografía

- AMINI, E.; SAFDARI, M-S.; DeYOUNG, J. T.; WEISE, D. R.; FLETCHER, T. H; 2019. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United State. *Fuel* 235 1475 – 1491
- ANAND, C.; SHOTORBAN, S.; MAHALINGAM, S.; McALLISTER. S.; WEISE, D. R.; 2017. Physics-based modeling of live wildland fuel ignition experiments in the forced ignition and flame spread test apparatus. *Combust Sci Technol* 189 1551 – 1570
- ANDERSON, H. E.; 1970. Forest fuel ignitability. *Fire Technol* 6 312 – 319-
- CALKIN,D.E.; COHEN,J.D.; FINNEY, M.A.; THOMPSON, M.P.; 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *P Natl A Sci* 111 746-751.
- CHENEY, N. P.; 1981. Fire behaviour. En: GILL, A. M.; GROVES, R. H.; NOBLE, I. R. (Eds.). Fire and the Australian biota (151 – 175). Australian Academy of Science. Canberra
- DAHALE, A.; FERGUSON, S.; SHOTORBAN, B.; MAHALINGAM, S.; 2013. Effects of distribution of bulk density and moisture content on shrub fires. *Int J Wildland Fire* 22 625 – 641.
- DIETENBERGER, M. A.; 2010. Ignition and flame-growth modelling on realistic building and landscape objects in changing environments. *Int J Wildland Fire* 19 228 – 237.
- EVANS, D. D.; REHM, R. G.; BAKER, E. S.; 2004. Physics-based modeling for wui fire spread – simplified model algorithm for ignition of structures by burning vegetation. National Institute of Standards and Technology. 39. Gaithersburg
- FERNANDES, P. M.; CRUZ, M. G.; 2012. Plant flammability experiments offer limited insight into vegetation–fire dynamics interactions. *New Phytol* 194 606 – 609
- FINNEY, M. A.; COHEN, J. D.; GRENFELL, I. C.; YEDINAK, K. M.; 2010. An examination of fire spread thresholds in discontinuous fuel beds. *Int J Wildland Fire* 19 163 – 170
- FINNEY, M. A.; COHEN, J. D.; McALLISTER, S. S.; JOLLY, W. M.; 2013. On the need for a theory of wildland fire spread. *Int J Wildland Fire* 22 25 – 36
- GANTEAUME, A.; Role of the ornamental vegetation in the propagation of the Rognac fire 2016. En: Fire continuum conference: Preparing for the future of wildland fire, May 2018, Missoula.
- HAYNES, K.; SHORT, K.; XANTHOPOULOS, G.; VIEGAS, D.; RIBEIRO, L. M.; BLANCHI, R.; 2020. Wildfires and WUI fire fatalities. Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires. Springer. 16.

McALLISTER, S.; GRENFELL, I.; HADLOW, A.; JOLLY, W. M.; FINNEY, M.; COHEN, J.; 2012. Piloted ignition of live forest fuels. *Fire Safety J* 51 133 – 142

McGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; McDERMOTT, R.; VANELLA, M.; 2020. Fire dynamics simulator user's guide. National Institute of Standards and Technology. 410

MELL, W. E.; MANZELLO, S. L.; MARANGHIDES, A.; BUTRY, D.; REHM, E. G.; 2010. The wildland–urban interface fire problem – current approaches and research needs. *Int J Wildland Fire* 19 238 – 251

MELL, W. E.; MARANGHIDES, A.; McDERMOTT, R.; MANZELLO, S. L.; 2009. Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees. *Combust Flame* 156 2023 – 2041

MITSOPOULOS, I.; MALLINIS, G.; ARIANOUTSOU, M.; 2015. Wildfire risk assessment in a typical Mediterranean wildland–urban interface of Greece. *Environ Manage* 55 900 – 915

MORANDINI, F.; SANTONI, P. A.; TRAMONI, J. B.; MELL, W. E.; 2019. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety J* 108 102836

PASTOR, E.; MUÑOZ, J. A.; CABALLERO, D.; ÀGUEDA, A.; DALMAU, F.; PLANAS, E.; 2020. Wildland–urban interface fires in Spain: summary of the policy framework and recommendations for improvement. *Fire Technol* 56 1831 – 1851

PEREZ-RAMIREZ, Y.; SANTONI, P. A.; TRAMONI, J. B.; BOSSEUR, F.; MELL, W. E.; 2017. Examination of WFDS in modeling spreading fires in a furniture calorimeter. *Fire Technol* 53 1795 – 1832

PRINCE, D. R.; FLETCHER, T. H.; 2014. Differences in burning behavior of live and dead leaves, part 1: measurements. *Combust Sci Technol* 186 1844 – 1857

RYU, C.; YANG, Y. B.; KHOR, A.; YATES, N. E.; SHARIFI, V. N.; SWITHENBANK, J.; 2006. Effect of fuel properties on biomass combustion: part I. experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 85 1039 – 1046

TACHAJAPONG, W.; LOZANO, J.; MAHALINGAM, S.; ZHOU, X.; WEISE, D. R.; 2008. An investigation of crown fuel bulk density effects on the dynamics of crown fire initiation in shrublands. *Combust Sci Technol* 180 593 – 615

THEOBALD, D. M.; ROMME, W. H.; 2007. Expansion of the US wildland–urban interface. *Landscape Urban Plan* 83 340 – 354

RIBEIRO, L. M.; ALMEIDA, M.; MUÑOZ, J. A.; 2020. WUIVIEW Deliverable D2.1. Report on real scale experiments. 30

ROTHERMEL, R. C.; 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. U.S. Forest Service. 52. Utah.