



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



## Vulnerabilidad al fuego de las cortezas de especies forestales adaptadas a los incendios forestales

**ESPINOSA, J.<sup>1,2</sup>, HERNANDO, C.<sup>2,3</sup>, GUIJARRO, M.<sup>2,3</sup>, RODRÍGUEZ DE RIVERA, O.<sup>4</sup>, DÍEZ, C.<sup>2</sup>, CARRILLO, C.<sup>2,6</sup>, CALAMA, R.<sup>2,3</sup>, DEHANE, B.<sup>4</sup>, PARDOS, M.<sup>2</sup>, MADRIGAL, J.<sup>2,3,6</sup>**

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Palencia (España).

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (CSIC-INIA). Madrid (España).

<sup>3</sup> Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR). Palencia (España).

<sup>4</sup> Universidad de Kent. Canterbury (Reino Unido).

<sup>5</sup> Universidad de Tlemcen. Tlemcen (Argelia).

<sup>6</sup> Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Madrid (España).

### Resumen

Se ha evaluado la resistencia al fuego de la corteza de *Pinus pinea* y *Pinus nigra* y el potencial daño térmico al cambium poniendo a punto la metodología de laboratorio y modelizando datos de espesores de corteza a lo largo del árbol. Se ha confirmado el carácter protector de la corteza frente al daño térmico, cuantificando que espesores entre 17 y 20 mm se pueden considerar como un umbral garantista para prevenir temperaturas por encima de 60 °C en la zona del cambium. Los resultados de campo mostraron que la temperatura máxima y el tiempo de residencia de la llama fueron las variables predictoras más significativas del daño en el cambium. La combinación de la intensidad del fuego y el tiempo de exposición al calor tiene mayor significación que el espesor de la corteza en el daño al cambium, lo que muestra la importancia de la gestión de los combustibles bajo dosel arbóreo para reducir la vulnerabilidad del arbolado. Los resultados tienen implicaciones relevantes en el campo de la gestión de combustibles forestales, la planificación de tratamientos selvícolas así como en la ecología de las masas de pinos.

### Palabras clave

Ecología, espesor de corteza, resistencia, gestión adaptativa, gestión forestal.

### 1. Introducción

La corteza se considera determinante para la resistencia del tronco del árbol al fuego (HARMON, 1984; LAWES et al., 2011; PAUSAS, 2017). De hecho, las especies que viven en hábitats propensos al fuego, y en particular aquellas que están sometidas a un régimen frecuente de fuegos de superficie, generalmente tienen una corteza más gruesa (ROSELL Y OLSON, 2014). La corteza puede proteger a los tejidos internos de alcanzar temperaturas superiores a 60 °C, que es la temperatura aceptada comúnmente por encima de la cual se produce la muerte del cambium (HARE, 1965; BAUER et al., 2010). Los incendios de alta intensidad pueden causar la muerte del cambium alrededor de toda la circunferencia del tronco del árbol, perturbando el suministro de agua y nutrientes a las hojas y dificultando la translocación de fotosintatos a las raíces (ROZAS et al., 2011), lo que puede causar la muerte del árbol. Incluso si el fuego no causa la muerte del árbol, puede estresarlo lo suficiente como para mostrar una reacción sistémica que se refleje en una disminución del crecimiento anual (SEIFERT et al., 2017). Otras propiedades de la corteza, más allá del grosor, también influyen en la resistencia al fuego: gravedad específica, contenido de humedad, inflamabilidad y estructura física (VINES, 1968; GIGNOUX et al., 1997), aunque en mucha menor medida que el espesor de corteza (ODHIAMBO et al., 2014).

*Pinus pinea* es una especie particularmente importante en la península Ibérica donde crece en diversos hábitats (PARDOS Y CALAMA, 2018). Esta especie tiene adaptaciones características al fuego, como una corteza gruesa y una copa aparsolada con procesos de autopoda; sin embargo, la especie muestra una resistencia al fuego muy variable (FERNANDES et al., 2008). Algunos estudios

recogen tasas de supervivencia de entre 0 a 100% tras fuegos de alta intensidad (RODRIGO et al., 2007). Sin embargo, una revisión de la resistencia de los pinos de la península Ibérica realizada por FERNANDES et al. (2008) destacó que el conocimiento cuantitativo existente indica una resistencia superior a la media en relación con otros pinos mediterráneos. En este contexto, se ha propuesto un método a escala de laboratorio (DEHANE et al. 2015; DELLA ROCCA et al., 2018). El método permite la caracterización de la inflamabilidad de la corteza según los cuatro componentes descritos por ANDERSON (1970) y MARTIN et al. (1994), lo que proporciona una estimación bastante detallada de los procesos naturales y estimaciones de todos los componentes de inflamabilidad que pueden estar relacionados con otras variables tales como la tasa de calentamiento y aislamiento teórico de tejidos vivos por la corteza.

Por otro lado, *Pinus nigra* es una especie adaptada a los fuegos de superficie, gracias a su gruesa corteza y la elevada altura de su primera rama viva entre otras características. Los tratamientos de reducción de combustible utilizando la quema prescrita de baja intensidad pueden, por tanto, ser una buena opción para esta especie. En este sentido, varios estudios han evaluado la capacidad aislante de la corteza de distintas especies mediante el seguimiento de las temperaturas cambiales y superficiales de la corteza, a partir de quemas experimentales realizadas en campo (PINARD Y HUFFMAN, 1997; LAWES et al., 2011); en ensayos de laboratorio (BAUER et al., 2010; ODHIAMBO et al., 2014); o combinados, en campo y laboratorio, determinando la distribución de la temperatura a lo largo del tronco del árbol (COSTA et al., 1991). Otros estudios han evaluado la inflamabilidad de los combustibles forestales (e.g. MADRIGAL et al., 2009) o la relación entre la inflamabilidad y las posibilidades de supervivencia después de un incendio forestal (FREJAVILLE et al., 2013). Sin embargo, muy pocos estudios han considerado en conjunto como variables predictoras de la resistencia al fuego de las cortezas las características de ésta, la intensidad del fuego y la inflamabilidad (sostenibilidad, inflamabilidad y consumabilidad). Además, la mayoría de los estudios actuales se han realizado en ecosistemas no mediterráneos (ROSELL, 2016) con diferentes enfoques y métodos no estandarizados, lo que dificulta la comparación de los resultados. Los protocolos establecidos por DELLA ROCCA et al. (2018) y MADRIGAL et al. (2019) con el calorímetro de pérdida de masa (de su nombre en inglés *Mass Loss Calorimeter*, MLC), en configuración horizontal, se utilizaron para caracterizar la resistencia de la corteza al fuego. Sin embargo, la configuración vertical de este dispositivo (DEHANE et al., 2015) pareció más adecuada para simular condiciones de calentamiento y posición de la corteza en el campo (MOLINA et al., 2018). Además, los flujos de calor seleccionados en los ensayos de laboratorio cubrieron un rango de temperaturas muy amplio, simulando las condiciones observadas en una quema prescrita o en un incendio forestal.

## 2. Objetivos

Los objetivos que se persiguieron con los estudios en *Pinus pinea* y *Pinus nigra* fueron los siguientes (MADRIGAL et al., 2019 y ESPINOSA et al., 2020):

- Determinar cómo el espesor de corteza de *Pinus pinea* afecta a la inflamabilidad y temperaturas alcanzadas en el cambium.
- Analizar propiedades de la corteza de *Pinus nigra*, como el espesor y el coeficiente de variación del espesor de la corteza, relacionándolo con el daño al cambium. Se espera que el espesor de corteza de esta especie sea suficiente para proteger el cambium de temperaturas letales; también es esperado que la rugosidad de la corteza contribuya a la protección térmica.
- Relacionar las variables externas del comportamiento del fuego (temperatura y exposición al calor) y variables asociadas con la corteza como la inflamabilidad (sostenibilidad, inflamabilidad y consumabilidad) a la resistencia del cambium al fuego en *Pinus nigra*.

La hipótesis de partida es que, en el caso de especies como *Pinus nigra* o *Pinus pinea*, la exposición al calor y la inflamabilidad de la corteza tiene un efecto importante en la resistencia de la corteza al fuego.

### 3. Metodología

#### 3.1. Estudio de la resistencia de la corteza al fuego en masas de *Pinus pinea* en laboratorio

Las muestras se extrajeron de tres ejemplares de *Pinus pinea* (Madrid, instalaciones del CSIC-INIA). Las características de la masa se resumen en MADRIGAL et al. (2019). Seis trozas (entre 10 y 15 cm de longitud), obtenidas de diferentes alturas en cada árbol (0,30, 1,30, 2, 3, 6 y 10 m), se almacenaron en una cámara acondicionada (temperatura de 22 °C y humedad relativa del 50%) para permitir el secado sin alterar sus propiedades fisicoquímicas. Dos probetas fueron extraídas del perímetro de cada tronco, incluida la madera y la corteza. Las 36 muestras obtenidas fueron representativas de la distribución de la corteza a lo largo del tronco de los tres árboles muestreados, presentando una amplia gama de espesores de corteza de entre 14 y 65 mm. Las pruebas de inflamabilidad se realizaron en un calorímetro de pérdida de masa (MLC) utilizando el método propuesto por DEHANE et al. (2015). Se evaluaron las siguientes variables: tiempo de ignición (TTI, s), pico de liberación de tasa de calor (PHRR, kW m<sup>-2</sup>), liberación de calor total (THR, MJ m<sup>-2</sup>) y fracción de masa residual (RMF, %). Se utilizaron cuatro termopares de tipo K, de diámetro 1 mm y un datalogger. Uno de los termopares se colocó en la superficie de la corteza en el centro de la muestra y los otros tres se colocaron en diferentes posiciones entre la corteza y la albura (a la profundidad del cambium) (Figura 1). Para todas las muestras, se midieron los espesores de corteza máximos y mínimos, así como el espesor de la corteza en la posición de cada uno de los termopares. También se pesaron las muestras. Las mediciones se realizaron antes y después de la prueba de inflamabilidad.

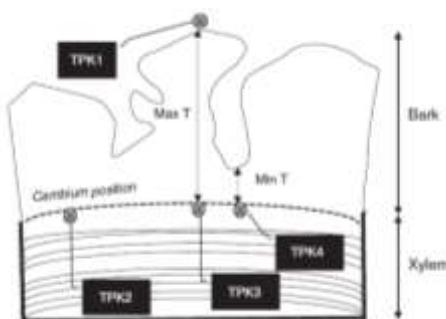


Figura 1. Ubicación de los termopares en las muestras en los ensayos de inflamabilidad (Madrigal et al., 2019).

La muestra se colocó en el MLC a una distancia de 23 mm con respecto de la fuente de calor radiante (flujo de calor de 25 kW m<sup>-2</sup>) (CRUZ et al., 2006). Se utilizó un sistema de chispa para provocar la ignición. Se registró el tiempo de ignición (TTI, s) y el tiempo de extinción de la llama (TFO, s). La duración de la llama (FD, s) se obtuvo como la diferencia entre TFO y TTI. La tasa de calor liberado (HRR) se obtuvo con el software MLCalc FTT® (MADRIGAL et al., 2009).

Cada ensayo se continuó hasta que se observó que la curva HRR se estabilizaba y se comportaba asintóticamente. Finalmente, las muestras se almacenaron a temperatura ambiente hasta que la curva de temperatura a la profundidad del cambium cayó por debajo de 60 °C. Tras los ensayos se midió el espesor de corteza y se pesaron las muestras a fin de determinar las diferencias de peso.



Figura 2. Calorímetro de pérdida de masa con termopila utilizado en los ensayos con muestras de *Pinus pinea*.

### 3.2. Estudio de la resistencia de la corteza al fuego en masas de *Pinus nigra* en laboratorio

Para este estudio se utilizó el calorímetro de pérdida de masa y se tuvieron en cuenta los protocolos para su utilización recogidos en las publicaciones de DEHANE et al. (2015) y MADRIGAL et al. (2019). Sin embargo, esta es la primera vez que se utiliza este dispositivo en su configuración vertical. En esta configuración (Figura 2), la radiación se distribuye sobre la muestra de una manera más realista a cómo ocurriría en campo.

Las muestras de *Pinus nigra* se extrajeron de un rodal puro ubicado en El Pozuelo (Cuenca) ( $40^{\circ} 34' 45''$  N /  $002^{\circ} 14' 30''$  W) con características similares a los descritas en ESPINOSA et al. (2018). Las muestras extraídas de los árboles se transformaron en probetas de  $10 \times 10$  cm para adaptarlas a las características del dispositivo MLC. Estas muestras se extrajeron a una altura de 0,5 a 0,7 m de la base del árbol (GRAVES et al., 2014). Las muestras se secaron a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) hasta peso constante. El espesor de corteza (**BT, mm**) se midió antes y después de los ensayos en tres posiciones en cada muestra (espesor de corteza máximo, mínimo y medio). Se calculó, también, el coeficiente de variación del espesor de la corteza (**CV, en tanto por 1**). Este coeficiente se utilizó como una medida de la rugosidad de la corteza. Los termopares se colocaron en tres perforaciones justo entre la corteza exterior e interior. Se ubicó otro termopar en la corteza superficial. Todas las muestras se pesaron antes y después de los ensayos, y se calculó la pérdida de peso (**W, %**). Se seleccionaron cuatro flujos de calor (**HF, kW m<sup>-2</sup>**) de 20, 25, 50 y 70, correspondientes a temperaturas del aire de 567, 620, 813 y 896 °C (calibradas con un radiómetro: MADRIGAL et al., 2009). Estas temperaturas están dentro del rango de temperaturas definidas como de intensidad del fuego baja a moderada por CHENEY (1981). Se ensayaron 30 muestras para cada flujo de calor y espesor de corteza, excepto en el caso de  $HF = 20 \text{ kW m}^{-2}$ , para el cual se testaron únicamente 15 muestras ( $n = 105$ ). Se utilizó un sistema de encendido con chispa piloto. Una vez que las muestras fueron expuestas al calor radiante, se registró el tiempo de ignición (**ti, s**). Las muestras se mantuvieron expuestas al foco de calor radiante hasta la extinción de la llama (tiempo de residencia de la llama; **tf, s**) o como máximo 5 minutos. Finalmente, las muestras se dejaron enfriar hasta que la temperatura registrada en los termopares bajó de los  $60^{\circ}\text{C}$ .

Las variables que se utilizaron para definir la resistencia al fuego fueron: el tiempo durante el cual la temperatura en el cambium fue superior a  $60^{\circ}\text{C}$  (**t<sub>60</sub>, s**), la temperatura máxima alcanzada en el cambium (**T<sub>mx</sub>, °C**) y la tasa de calentamiento en el cambium (**HT, °C s<sup>-1</sup>**). El tiempo durante el cual

la temperatura de la muestra fue superior a 300 °C (**te300, s**) y la temperatura máxima absoluta (**Temx, °C**) en la corteza superficial también fueron registradas. Antes del ensayo, cada muestra se escaneó para determinar el área de la corteza y la madera. La muestra se volvió a escanear después de los ensayos para establecer el porcentaje de corteza que se había consumido (**Bpo, %**). Las imágenes se procesaron con el software ImageJ®. El resumen completo de las variables utilizadas y de los valores medios obtenidos se muestran en ESPINOSA et al. (2020).



Figura 3. Ensayo en el calorímetro de pérdida de masa (MLC). Configuración vertical (Espinosa et al., 2020).

### 3.3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos con las muestras de *Pinus pinea*

Se llevó a cabo un análisis clúster mediante el algoritmo K-means para clasificar las 108 curvas de temperatura (36 muestras, 3 termopares) obtenidas en la corteza interior a la profundidad del cambium. Los resultados indicaron el umbral de espesor de la corteza por encima del cual las tasas de calentamiento son mayores y la resistencia al fuego es menor. Se ajustaron modelos de regresión a los datos mediante mínimos cuadrados parciales (PLS) para producir un modelo descriptivo de la resistencia al fuego de *Pinus pinea*. Detalles más desarrollados del análisis estadístico se recogieron en MADRIGAL et al. (2019).

### 3.4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos con las muestras de *Pinus nigra*

Inicialmente se llevó a cabo un análisis exploratorio de datos (AED) para resumir las principales características del conjunto de datos (Figura 3 y 4). El AED fue un primer paso para determinar lo que los datos podrían indicar más allá del enfoque Bayesiano con el que se trabajó o los supuestos de partida. Por otro lado, se utilizó un enfoque Bayesiano a través de un modelo lineal generalizado para determinar la relación en las variables respuesta anteriormente definidas con respecto a las variables fijas y aleatorias consideradas. Los detalles del modelo se recogen en ESPINOSA et al. (2020).

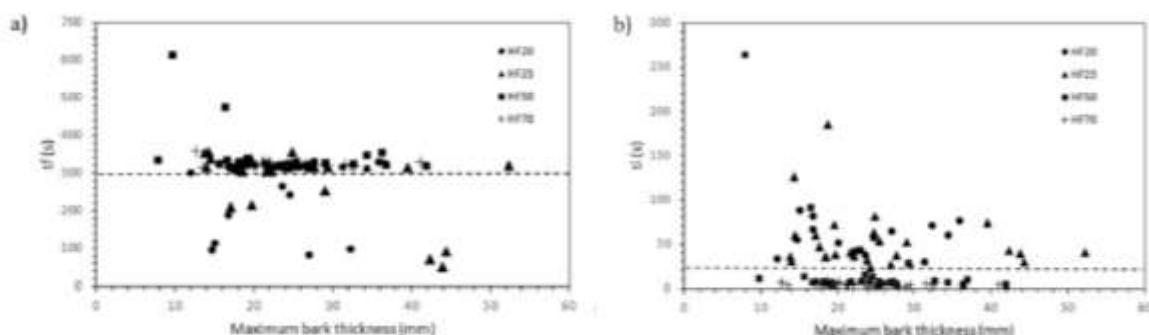


Figura 4. (a) Relación entre el espesor de corteza máximo y el tiempo de residencia de la llama (*tf*) para los diferentes flujos de calor considerados (HF). (b) Relación entre el espesor de corteza máximo y el tiempo de ignición (*ti*) para los diferentes flujos de calor considerados (HF) (Espinosa et al., 2020).

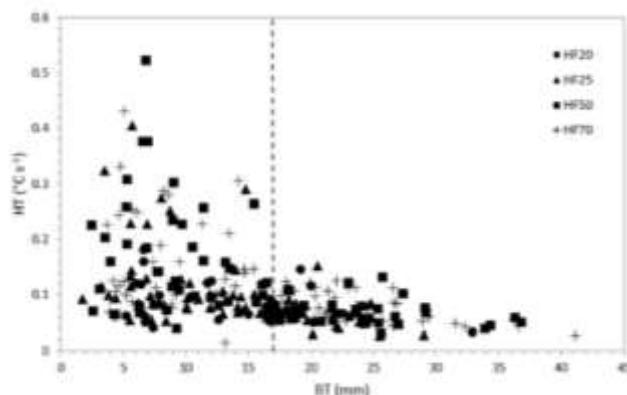


Figura 5. Relación entre el espesor de corteza (BT) y la tasa de calor en el cambium (HT) para los diferentes flujos de calor considerados (HF) (Espinosa et al., 2020).

## 4. Resultados

### 4.1. Resultados obtenidos para el estudio de *Pinus pinea*

Los resultados mostraron dos tipos diferentes de respuesta para la corteza de más de 2 cm de espesor y para la corteza de menos de 2 cm de espesor (Figura 5a). El tiempo para alcanzar temperaturas letales en el cambium no sólo fue más corto para la corteza más fina, sino que FD y la tasa de calor (HR, °C) promedio son también significativamente mayores en las muestras con corteza de espesor inferior a 2 cm (Figura 5b, c y d). La Figura 5c muestra la correlación entre HR medida en la corteza interna (posición del cambium) y el grosor máximo de la corteza. La tendencia exponencial sugiere que el HR tiende a ser constante para corteza de más de 3 cm de espesor. Los valores medios ( $n = 36$ ) mostrados en la Figura 5d destacan la influencia significativa del grosor de la corteza en la FD (Figura 5b).

Se han utilizado múltiples modelos PLS para predecir la resistencia al fuego (tiempos medios para alcanzar temperaturas letales y media de las tasas máximas de calentamiento) en función de los valores del espesor de la corteza y de los parámetros de inflamabilidad. Los resultados indican que la resistencia al fuego en *Pinus pinea* puede predecirse midiendo o estimando las siguientes variables: espesor máximo y mínimo de la corteza, TTI (inflamabilidad de la corteza), FD y calor total emitido por la corteza (sostenibilidad de la corteza) y RMF de la corteza (consumibilidad de la corteza). Los coeficientes escalados indican la importancia relativa (valor absoluto del coeficiente) y el efecto de las variables explicativas (sentido físico) en cada una de las variables dependientes. El espesor de la corteza (principalmente el espesor máximo) y la RMF son las variables más significativas (para más detalles ver MADRIGAL et al., 2019).

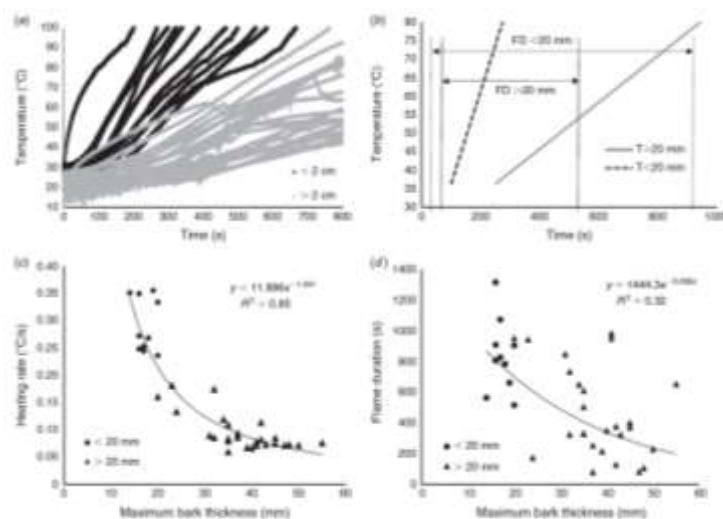


Figura 6. (a) Curvas de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de la corteza interior de *Pinus pinea* L. El análisis clúster K-means indica un umbral de espesor de corteza de 2 cm para clasificar los datos en dos grupos diferentes. (b) Tendencia lineal que muestra la diferencia en la tasa media de aumento de la temperatura para la corteza de menos de 2 cm de espesor y la corteza de más de 2 cm de espesor. Las líneas verticales indican el tiempo hasta la ignición (TTI) y el tiempo hasta la extinción de la llama (TFO) y su diferencia (duración de la llama, FD). (c) Correlación entre la velocidad media de calentamiento en la corteza interior (cambium) y el espesor máximo de la corteza. (d) Correlación entre la duración de la llama en la corteza exterior y el espesor máximo de la corteza (Espinosa et al., 2020).

#### 4.2. Resultados obtenidos para el estudio de *Pinus nigra*

El espesor de corteza de las muestras ( $n = 315$ ) osciló entre 1,8 y 52,3 mm (desviación estándar de 9,5 mm). Las muestras pueden considerarse secas, de acuerdo al contenido medio de humedad ( $7,3 \pm 1,5\%$ ). La relación entre el espesor máximo de la corteza y el tiempo de residencia de la llama se muestra en la Figura 3a. En muestras sometidas a flujos de calor de 50 y 70  $\text{kW m}^{-2}$ , la llama se extinguíó poco después del tiempo máximo de exposición (300 s) en la mayoría de los casos. La relación entre el espesor máximo de la corteza y el tiempo de ignición (Figura 3b) reveló un umbral en torno a los 20-23 s, con diferentes respuestas para los dos flujos de calor más bajos HF20 y HF25 (ti varió de 23 a 185 s) y los dos flujos de calor más altos HF50 y HF70 (ti varió de 2 a 20 s). La tasa de calentamiento en el cambium se muestra en la Figura 4. La tendencia exponencial sugiere que HT tendió a ser constante para espesores de corteza por encima de 17-20 mm, mostrando una mayor variabilidad con un espesor de corteza inferior a 17 mm.

La curva de temperatura mediana al nivel del cambium para cada HF se muestra en la Figura 6. La temperatura crítica de  $60^{\circ}\text{C}$  no se alcanzó en  $\text{HF} = 20 \text{ kW m}^{-2}$ . La temperatura del cambium siguió aumentando más allá del tiempo de exposición. Después de 6 a 7 minutos, la temperatura del cambium excedió los  $60^{\circ}\text{C}$  para casi todos los HF (excepto 20  $\text{kW m}^{-2}$ ), alcanzando un máximo de  $100^{\circ}\text{C}$  en el HF más elevado.

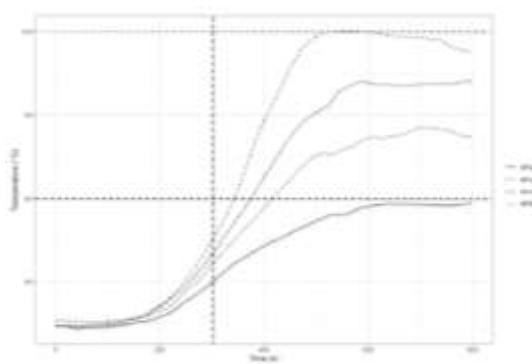


Figura 7. Curva de temperatura mediana para cada flujo de calor (HF) (Espinosa et al., 2020).

#### 4.3. Modelos Bayesianos aplicados al análisis de muestras de *Pinus nigra*

Las gráficas obtenidas tras la aplicación de los modelos bayesianos se muestran a continuación:

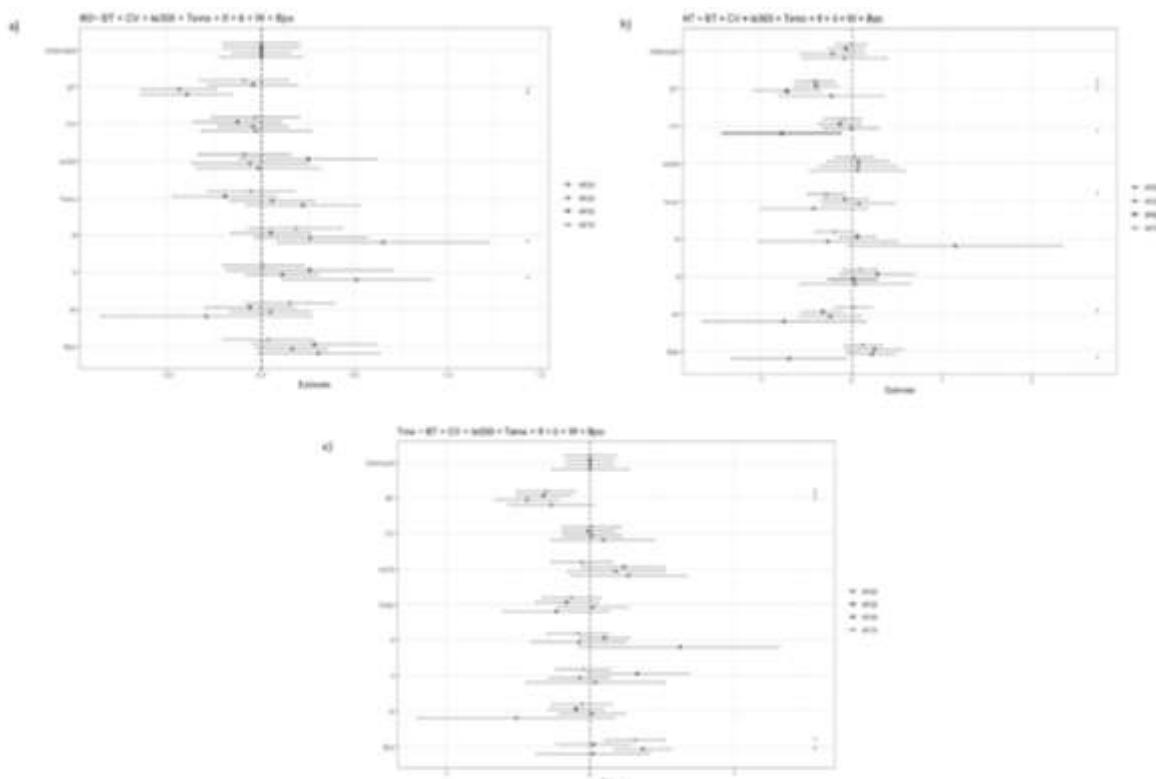


Figura. 8. Representación gráfica de los efectos fijos de (a) tiempo durante el cual la temperatura de las muestras estuvo por encima de 60 °C ( $t_{60}$ ); (b) tasa de calentamiento (HT); (c) máxima temperatura absoluta alcanzada en el área del cambium ( $T_{mx}$ ). \*indica una diferencia significativa (Espinosa et al., 2020).

#### 5. Discusión

Se observaron dos tipos de respuestas en el caso del estudio de *Pinus nigra*. Para los dos flujos de calor más bajos ( $\leq 25 \text{ kW m}^{-2}$ ), el tiempo hasta la ignición fue superior a 20 s, mientras que para los flujos de calor más altos ( $> 25 \text{ kW m}^{-2}$ ), el tiempo hasta la ignición fue inferior a los 20 s. Este límite de radiación térmica se ha propuesto como representativo de un incendio de intensidad baja-moderada (CRUZ et al., 2006; MADRIGAL et al., 2019). MADRIGAL et al. (2019) observaron dos tipos de respuesta en muestras de *Pinus pinea*, con espesores de corteza superior a 20 mm y menor de 20 mm. Sin embargo, esto no se observó en *Pinus nigra*, y no se logró un buen ajuste a la curva, en parte debido a los diferentes tamaños de muestra y al amplio rango de espesores de corteza seleccionados en este estudio. No obstante, se observó un límite de alrededor de 17-20 mm (Figura 4), donde la curva tiende a estabilizarse. Así, un espesor de corteza de 17 mm puede considerarse el umbral crítico a partir del cual la probabilidad de muerte del cambium disminuye. Ambos valores son notablemente similares a los reportados para árboles caducifolios en Bolivia ( $\geq 18 \text{ mm}$ ) (PINARD Y HUFFMAN, 1997), para tres especies de eucalipto ( $> 20 \text{ mm}$ ) o  $\geq 24 \text{ mm}$  (LAWES et al., 2011), también en eucalipto.

Los resultados mostraron también que (i) la corteza fue expuesta a un alto nivel de radiación, pero el daño al cambium es insignificante o bajo para todos los flujos de calor testados, al menos

durante 300 s; (ii) el nivel más alto de daño al cambium (temperaturas superiores a 60 °C) se detectó durante la fase de combustión de la corteza. Además, la intensidad y el tiempo de exposición supusieron una combinación crítica para establecer daños en el cambium (especialmente en árboles de corteza fina). A nuestro entender, esta es la primera prueba experimental de que el daño potencial al cambium causado por la combinación de calor y exposición se ve exacerbado por la inflamabilidad de la corteza.

Los resultados del estudio confirmaron el papel clave del espesor de la corteza en la protección del cambium para todas las variables consideradas como predictoras del daño en el mismo. Esta relación no fue significativa en HF20 para HT y Tmx, posiblemente porque la capacidad aislante de la corteza proporciona una protección completa a una HF más baja y, por tanto, otras variables como el tiempo de residencia de la llama (tf), pueden ser más significativas. Estos resultados son consistentes con los reportados por SEIFERT et al. (2017).

El coeficiente de variación del espesor de la corteza parece tener un efecto ligeramente positivo en la protección del cambium a través de dos variables de respuesta, t60 y HT. BAUER et al. (2010) y ODHIAMBO et al. (2014) explicaron que los espacios en las capas de la corteza se llenan con aire, lo que aumenta la resistencia al calor PINARD Y HUFFMAN (1997). Sin embargo, FREJAVILLE et al. (2013) y DEHANE et al. (2015) no observaron ninguna influencia significativa de la rugosidad de la corteza en la resistencia al fuego en los árboles de un ecosistema alpino y un esclerófila mediterránea

El tiempo durante el cual la temperatura estuvo por encima de los 300 °C en la corteza superficial parecía tener efectos diferentes para las temperaturas superiores a 60 °C, la tasa de calentamiento y la temperatura absoluta máxima en el cambium, variando entre los flujos de calor, pero sin una relación clara. Como los termopares estaban situados en la corteza exterior (a 23 mm del flujo radiante) y los flujos de radiación oscilaban entre 20 y 70 kW m<sup>-2</sup>, es razonable esperar temperaturas superiores a 300 °C durante el tiempo en que los termopares estuvieron expuestos al calor. Del mismo modo, la temperatura máxima absoluta del aire no fue un buen predictor del daño del cambium, produciendo respuestas aleatorias para las diferentes variables (t60, HT y Tmx) y flujos de calor. Los picos de temperatura pueden no afectar al cambium si no son prolongados.

Aunque no se ha podido confirmar claramente, es posible que exista una relación positiva entre tf y ti para HF20 (coeficiente de correlación de -0,2). FREJAVILLE et al. (2013) sugirieron que la corteza inflamable aumentaría la transferencia de calor al cambium debido a una reducción del espesor de la corteza y el chamuscado de la superficie de la corteza. Asimismo, otros estudios han destacado que la alta inflamabilidad puede generar potencialmente un aumento de la vulnerabilidad al fuego (DEHANE et al., 2015). Estos últimos estipulan que el exceso de espesor de la corteza aumenta considerablemente la liberación de calor total y reduce la fracción de masa residual. Estos resultados muestran la importancia del tejido de la corteza en la evaluación de la inflamabilidad del corcho en condiciones de campo. La información sobre la relación entre la inflamabilidad y la conductividad térmica de la corteza es escasa a pesar de ser importante para caracterizar la vulnerabilidad de los tejidos vivos del tronco (DEHANE et al., 2015). Se seleccionaron dos variables para medir la consumibilidad: el porcentaje de peso y la corteza consumida. No parecía haber una relación clara entre el peso y el tiempo durante el que el cambium permaneció por encima de 60 °C, la tasa de calentamiento y la temperatura absoluta máxima en el cambium para cualquier flujo de calor. Sin embargo, una mayor reducción de la superficie de la corteza tuvo un efecto negativo en el cambium. El porcentaje de pérdida de peso está probablemente relacionada con la pérdida de agua y la volatilización de gases. Sin embargo, la reducción de la superficie de la corteza estaría relacionada con su pérdida de grosor y, por tanto, con una menor protección del cambium. De hecho, pequeñas diferencias en el grosor de la corteza producen grandes diferencias en la resistencia al fuego (MOREIRA et al., 2007).

## 6. Conclusiones

Los resultados del estudio confirman que un umbral de espesor de la corteza de 2 cm es un buen indicador del aislamiento de las células del cambium vascular de *Pinus pinea*. El modelo propuesto pone de manifiesto la influencia de la inflamabilidad de la corteza en la resistencia al fuego y el efecto adicional del grosor mínimo y máximo de la corteza como variables para detectar la vulnerabilidad de los troncos de los árboles a los incendios forestales. El efecto de la RMF en la resistencia al fuego sugiere que las mediciones de campo realizadas inmediatamente después del fuego para estimar la combustión de la corteza pueden ayudar a determinar la probabilidad de supervivencia de los tejidos vivos del árbol.

El estudio confirmó el papel del espesor de corteza en la protección del cambium frente al fuego en masas de *Pinus nigra*; únicamente condiciones puntuales a nivel de árbol pueden generar intensidades que potencialmente podrían dañar el cambium. En este sentido, un espesor de corteza de más 17 mm puede considerarse el umbral crítico a partir del cual la mortalidad del árbol disminuye. Aunque no hay consenso en la comunidad científica sobre la contribución del coeficiente de variación del espesor de corteza a la protección del cambium después del fuego, los datos del estudio mostraron que este coeficiente tuvo un efecto ligeramente positivo sobre la protección del cambium. Un valor de flujo de calor de 25 kW m<sup>-2</sup> puede ser un dato de referencia para mejorar las prescripciones con respecto a las tasas de mortalidad después de incendios forestales. Los picos de temperatura puntuales alcanzados en la corteza del árbol durante la quema prescrita de baja intensidad pueden no afectar al cambium si no existe, además, un tiempo prolongado de exposición a alta temperatura. La llama tiende a extinguirse poco tiempo después de cesar la exposición al foco radiante (300 s), incluso trabajando con flujos de calor elevados. Sin embargo, la corteza continúa ardiendo (sin llama) sostenida por el propio calor (resollo). Por primera vez se observó que la inflamabilidad de la corteza (duración de la llama y porcentaje de corteza quemada) afecta significativamente al daño cambial. Este hallazgo abre el camino a nuevos estudios que relacionen las propiedades ecológicas y de combustión de la corteza de los árboles y la posible influencia de estas propiedades en la protección de los tejidos vivos tras el fuego.

## 7. Agradecimientos

Los estudios se enmarcaron dentro de los proyectos nacionales de I+D+i, GEPRIF (Reducción de la Severidad del Fuego Mediante Nuevas Herramientas y Tecnologías para la Gestión Integrada de la Protección contra los Incendios Forestales) y VIS4FIRE (Vulnerabilidad Integral de los Sistemas Forestales Frente a Incendios: Implicaciones en las Herramientas de Gestión Forestal) (RTA2014-00011-C06-01 y RTA2017-00042-C05-01 respectivamente). GEPRIF y VIS4FIRE fueron cofinanciados por la Unión Europea a través del programa de fondos FEDER. Parte del estudio en el que se basa este documento fue cofinanciados también, por el INIA (FPI-SGIT 2015) y el Fondo Social Europeo a través de un contrato a Juncal Espinosa Prieto. Parte del trabajo se realizó en el marco de las prácticas en el Laboratorio de Incendios Forestales del INIA (Centro de Investigación Forestal) y el proyecto final de carrera de grado realizado por Jennifer Souto en la Escuela de Ingeniería Forestal de Pontevedra (Universidad de Vigo, España). La contribución de Rafael Calama se llevó a cabo en el contexto del proyecto AGL2017-83828-C2.1-R. Algunos de los datos utilizados fueron proporcionados por la red SEGEFORS mantenida en el marco del proyecto INIA AT2013-04.

## 8. Bibliografía

Anderson, H.E., 1970. Forest fuel ignitability. *Fire Technol.* 6, 312–319.

- Bauer, G., Speck, T., Blömer, J., Bertling, J., Speck, O., 2010. Insulation capability of the bark of trees with different fire adaptation. *J. Mater. Sci.* 45 (21), 5950–5959.
- Cheney, N.P., 1981. Fire behaviour. In: Gill, A.M., Groves, R.H., Noble, I.R. (Eds.), *Fire and the Australian Biota*. Australian Academy of Science, Canberra, pp. 151–175.
- Costa, J.J., Oliveira, L.A., Viegas, D.X., Neto, L.P., 1991. On the temperature distribution inside a tree under fire conditions. *Int. J. Wildland Fire* 1 (2), 87–96.
- Cruz, M.G., Butler, B.W., Alexander, M.E., 2006. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model evaluation. *Int. J. Wildland Fire* 15, 61–72.
- Dehane, B., Madrigal, J., Hernando, C., Bouhraoua, R., Guijarro, M., 2015. New bench scale protocols for characterizing bark flammability and fire resistance in trees: application to Algerian cork. *J. Fire Sci.* 33 (3), 202–217.
- Della Rocca, G., Danti, R., Hernando, C., Guijarro, M., Madrigal, J., 2018. Flammability of two Mediterranean mixed forests: study of the non-additive effect of fuel mixtures in laboratory. *Front. Plant Sci.* 9, 825.
- Espinosa, J., Madrigal, J., De La Cruz, A. C., Guijarro, M., Jimenez, E., & Hernando, C. 2018. Short-term effects of prescribed burning on litterfall biomass in mixed stands of *Pinus nigra* and *Pinus pinaster* and pure stands of *Pinus nigra* in the Cuenca Mountains (Central-Eastern Spain). *Sci. Total Environ.*, 618, 941-951.
- Espinosa, J., de Rivera, O. R., Madrigal, J., Guijarro, M., & Hernando, C. 2020. Predicting potential cambium damage and fire resistance in *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*. *For. Ecol. Manage.*, 474, 118372.
- Fernandes PM, Vega JA, Jiménez E, Rigolot E., 2008. Fire resistance of European pines. *For. Ecol. Manage.*, 256, 246–255.
- Frejaville, T., Curt, T., Carcaillet, C., 2013. Bark flammability as a fire-response trait for subalpine trees. *Front. Plant Sci.* 4, 466.
- Gignoux, J., Clobert, J., Menaut, J., 1997. Alternative fire resistance strategies in savanna trees. *Oecologia* 110, 576–583.
- Graves, S.J., Rifai, S.W., Putz, F.E., 2014. Outer bark thickness decreases more with height on stems of fire-resistant than fire-sensitive Floridian oaks (*Quercus* spp.; *Fagaceae*). *Am. J. Bot.* 101 (12), 2183–2188.
- Hare, R.C., 1965. The contribution of bark to fire resistance of southern trees. *J. Forest.* 4 (248–554), 251.
- Harmon, M.E., 1984. Survival of trees after low-intensity surface fires in Great Smoky Mountains National Park. *Ecology* 65, 796–802.

Lawes MJ, Richards A, Dathe J, Midgley JJ., 2011. Bark thickness determines fire resistance of selected tree species from fire-prone tropical savanna in north Australia. *Plant Ecol.* 212, 2057–2069.

Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., Diez, C., Marino, E., De Castro, A.J., 2009. Evaluation of forest fuel flammability and combustion properties with an adapted mass loss calorimeter device. *J. Fire Sci.* 27 (4), 323–342.

Madrigal, J., Souto-García, J., Calama, R., Guijarro, M., Picos, J., Hernando, C., 2019. Resistance of *Pinus pinea* L. bark to fire. *Int. J. Wildland Fire* 28 (5), 342–353.

Martin, R.E., Gordon, D.A., Gutierrez, M.A., Lee, D.S., Molina, D.M., Schroeder, R.A., ... & Chambers, M., 1993. Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. In: *Proceedings of the 12th conference on fire and forest meteorology* (pp. 26–28).

Molina, J.R., Prades, C., Lora, Á., Rodríguez y Silva, F.R., 2018. *Quercus suber* cork as a keystone trait for fire response: A flammability analysis using bench and field scales. *For. Ecol. Manage.*, 429, pp.384–393.

Moreira, F., Duarte, I., Catry, F., Acácio, V., 2007. Cork extraction as a key factor determining post-fire cork oak survival in a mountain region of southern Portugal. *For. Ecol. Manage.* 253 (1–3), 30–37.

Odhiambo, B., Meincken, M., Seifert, T., 2014. The protective role of bark against fire damage: a comparative study on selected introduced and indigenous tree species in the Western Cape, South Africa. *Trees* 28 (2), 555–565.

Pardos, M., Calama, R., 2018. Responses of *Pinus pinea* seedlings to moderate drought and shade: is the provenance a differential factor? *Photosynthetica*, 56, 786–798.

Pausas, J.G., 2017. Bark thickness and fire regime: another twist. *New Phytol.* 213 (1), 13–15.

Pinard, M.A., Huffman, J., 1997. Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern Bolivia. *J. Trop. Ecol.* 13, 727–740.

Rodrigo A, Quintana V, Retana J., 2007. Fire reduces *Pinus pinea* distribution in the north-eastern Iberian Peninsula. *Ecoscience*, 14, 23–30.

Rosell, J.A., Olson, M.E., 2014. The evolution of bark mechanics and storage across habitats in a clade of tropical trees. *Am. J. Bot.* 101, 764–777.

Rosell, J.A., 2016. Bark thickness across the angiosperms: more than just fire. *New Phytol.* 211 (1), 90–102.

Rozas, V., Gonzalo, P.D.L., Ignacio, G.G., Jose, R.A., 2011. Contrasting effects of wildfire and climate on radial growth of *Pinus canariensis*

Seifert, T., Meincken, M., Odhiambo, B.O., 2017. The effect of surface fire on tree ring growth of *Pinus radiata* trees. Ann. Forest Sci. 74 (2), 34.

Vines, R.G., 1968. Heat transfer through bark, and the resistance of trees to fire. Austr. J. Bot. 16, 499–514.