



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-169

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Inflamabilidad de la corteza y evaluación de la resistencia al fuego de *Pinus pinea* L.

MADRIGAL OLMO, J.^{1,3*}, SOUTO GARCÍA J. ², CALAMA SANZ, R.^{1,3}, GUIJARRO GUZMÁN, M.^{1,3}, PICOS MARTÍN, J.², HERNANDO, LARA C.^{1,3}

¹INIA, Centro de Investigación Forestal, Dpto. Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales. Ctra. Coruña Km 7,5 28040 Madrid. *incendio@inia.es

²Universidad de Vigo, Escola de Enxenería Forestal de Pontevedra. Campus Universitario da Xunqueira, A Xunqueira, S/N, 36005 Pontevedra

³iuFOR, Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible uVA-INIA

Resumen

El pino piñonero (*Pinus pinea* L.) presenta entre sus adaptaciones de resistencia al fuego la presencia de cortezas gruesas. Con el objeto de cuantificar la influencia del espesor de la corteza en la inflamabilidad y resistencia al fuego de esta especie, se presentan los resultados de una serie de 40 ensayos llevados a cabo con un calorímetro de pérdida de masa. Se evaluó en qué medida influye el espesor en las tasas de calentamiento del *cambium*, así como en los tiempos en alcanzar las temperaturas letales en los tejidos vivos. A su vez, mediante los datos de los árboles tipo de la red de parcelas permanentes del INIA, se han generado modelos de perfil para simular el espesor de corteza a lo largo del fuste. La combinación de datos de laboratorio y campo sugieren los espesores de corteza críticos a partir de los cuales aumentarían las tasas de transmisión de calor, disminuyendo los tiempos en alcanzar las temperaturas letales en *cambium* y por tanto la resistencia al fuego. Los resultados tienen aplicaciones en el campo de la ecología de estos pinares, así como en la selvicultura preventiva para evaluar alturas críticas de chamuscado de tronco durante incendios y quemas prescritas.

Palabras clave

Adaptaciones al fuego, incendios forestales, modelos de perfil, selvicultura, severidad del fuego

1. Introducción

La resistencia de los troncos de los árboles a los incendios y las quemas prescritas depende de varios factores. A nivel de árbol individual, la capacidad para sobrevivir al fuego depende de la protección de los tejidos vivos que subyacen a la corteza, de la intensidad del fuego y de la capacidad de reconstrucción de tejidos que tenga el árbol (PAUSAS, 2017). La resistencia, por tanto, está influenciada tanto por las características del fuego como por las del tronco, que interactúan durante los incendios y determinan el daño producido a los tejidos vivos. Numerosos estudios han demostrado que el espesor de la corteza es un factor importante que afecta a la resistencia de los árboles al fuego (e.g. RYAN, 2000). De hecho, el grosor de la corteza es un factor de adaptación clave en muchas plantas que crecen en ecosistemas propensos a los incendios y, por lo general, se cita como la principal ventaja adaptativa que determina la supervivencia de los árboles en fuegos intensos (PAUSAS, 2017).

En Europa existen pocos estudios sobre la supervivencia a fuegos de media o baja intensidad de la mayoría de las especies (VALOR et al., 2015). No se tiene conocimiento de la existencia de modelos de transmisión de calor en cortezas de árboles mediterráneos y existen muy pocas referencias sobre ensayos de inflamabilidad en cortezas de árboles (FREJAVILLE et al., 2013), y las que hay se han llevado a cabo en ecosistemas boreales y con dispositivos no estandarizados, sin incluir el efecto de intensidad del fuego en el proceso. Aunque se conoce teóricamente el efecto del

espesor de la corteza en la protección de los tejidos vivos y su relación con las adaptaciones frente al fuego (TAPIAS et al., 2004) y se ha cuantificado tras incendios forestales mediante mediciones indirectas en pinares y alcornocales (CATRY et al., 2012; FERNANDES et al., 2008), no hay antecedentes de la experimentación directa de este proceso y de otras variables implicadas como el efecto de la intensidad del incendio en la severidad del fuego en los troncos, que se analizarán en este trabajo. A pesar de que el chamuscado del tronco se ha utilizado para predecir la mortalidad del arbolado tras incendios (e.g. FERNANDES et al., 2008) hay pocos antecedentes de modelos de estimación del espesor de cortezas en árboles a diferentes alturas (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2007; LI Y WEISKITTEL, 2011; CELLINI et al., 2012) que permitan evaluar con precisión la sensibilidad del arbolado al fuego según las alturas esperadas de chamuscado del tronco, tanto en incendios como en quemas prescritas. Existe gran cantidad de datos sobre espesores de corteza en la red de parcelas permanentes del INIA y en los sucesivos Inventarios Forestales Nacionales, pero paradójicamente no hay disponibles modelos ajustados de espesores de corteza a lo largo del perfil del tronco en coníferas españolas. Estos modelos permitirían cuantificar el efecto protector de la corteza y, por tanto, adaptar la gestión de las masas a las nuevas perspectivas de aumento de la frecuencia de incendios forestales, así como ayudar a minimizar la severidad en las quemas prescritas. Además ayudarían a entender las adaptaciones al fuego de media y baja intensidad de las especies estudiadas (PAUSAS et al., 2017) de forma que se puedan proponer medidas para aumentar la resiliencia de estos ecosistemas.

A pesar de que las pruebas de laboratorio no permiten reproducir completamente las condiciones del campo, la variabilidad de la inflamabilidad está controlada por rasgos biológicos que pueden ser evaluados en experimentos estandarizados (PAUSAS et al., 2012). Con estos antecedentes, se ha propuesto una nueva metodología (DEHANE et al., 2015), que permite caracterizar la inflamabilidad de la corteza a partir de cinco variables que describen el proceso de combustión vegetal y que están asociadas a los cuatro componentes clásicos de la inflamabilidad (MADRIGAL et al., 2009). En el presente trabajo se pretende aplicar esta metodología para el análisis exhaustivo de la inflamabilidad y la resistencia al fuego de cortezas de *Pinus pinea*.

Pinus pinea L. es una especie emblemática en la flora mediterránea, tanto por su singularidad en el Mediterráneo occidental como por el aprovechamiento económico de su piñón. Su escasa extensión superficial actual la hace merecedora de la máxima atención para conservar su variabilidad genética. En concreto, es en la Península Ibérica donde se encuentra la mayor superficie arbolada de esta especie, y también donde se produce la mayor cantidad de piñón piñonero del mundo. Es una especie con adaptaciones al fuego debido principalmente a su gruesa corteza y su alta copa sin ramas bajas. Su supervivencia al fuego es muy variable, pero los datos existentes apuntan a una mayor resistencia al fuego en comparación con los restantes pinos de la Cuenca Mediterránea (FERNANDES et al., 2008). Un rasgo que lo diferencia de otros pinos es que su copa puede verse afectada por el fuego hasta 2/3 sin que el árbol muera. A pesar de que hay muchos estudios de crecimiento, la producción de madera y fruto (CALAMA et al., 2007; CALAMA et al., 2016) y la regeneración natural de la especie (MANSO et al., 2014), hay pocos de sus adaptaciones al fuego (TAPIAS et al., 2004; FERNANDES et al., 2008) y en concreto no se ha encontrado ninguno que relacione la corteza con la protección de tejidos vivos.

2. Objetivos

Los dos objetivos principales de este estudio son: (1) Demostrar el efecto del espesor de la corteza de *Pinus pinea* sobre su inflamabilidad y las temperaturas bajo la corteza, con el fin de caracterizar la probabilidad de supervivencia de los tejidos vivos después de un incendio forestal y su implicación en la resistencia del árbol al fuego; (2) Modelizar el espesor de la corteza de *P. pinea* en función de su altura para evaluar la vulnerabilidad del tronco al efecto de la llama como consecuencia de incendios forestales y quemas prescritas. En concreto se pretende ajustar una ecuación para predecir el espesor de corteza a una altura dada del fuste en función de atributos del árbol y de la

posición relativa dentro del fuste. La ecuación debe ser preferentemente invertible al objeto de poder determinar, para un árbol dado, a qué altura de fuste se alcanza un espesor de corteza determinado.

3. Metodología

3.1. Ensayos de inflamabilidad y resistencia al fuego

Las muestras utilizadas en el presente estudio procedían de tres árboles de *Pinus pinea* de la zona del Centro Peninsular (Valores medios \pm desviación estándar: Altura=17,6 \pm 2,1 m, Diámetro normal=30,4 \pm 1,7 cm, Espesor de corteza=22,6 \pm 2,7 mm), de la finca de las instalaciones del INIA en Madrid (Valores medios \pm desviación estándar: Altura =17,5 \pm 1,82 m; Altura primera rama=10,4 \pm 1,35 cm; Diámetro normal=28,3 \pm 3.9 cm; Espesor medio de corteza= 19 \pm 5.6 mm; Densidad=600 pies/ha; Fracción de cabida cubierta=98%). Se seleccionaron tres alturas diferentes (1,30 cm, 5m, 10m) de los tres árboles seleccionados obteniéndose nueve trozas que se guardaron durante 6 meses para permitir su secado natural sin alterar sus propiedades físico-químicas. Se extrajeron al azar mediante corte de sierra de cinta, un total de 4-5 probetas de la parte perimetral de las trozas (de forma que incluyeran albura y corteza). Se fijó una superficie de 10 x 10 cm² para adecuarse al tamaño del porta-muestras (ver apartados siguientes), siendo variable el espesor de la muestra según el espesor de corteza ensayado. El resultado final fue la selección de 40 probetas comprendidas entre 5,5 y 9,0 cm de espesor total y una variabilidad de espesores de corteza entre 4 y 73 mm representativas de la distribución de cortezas a lo largo del fuste de los tres árboles muestreados (Figura 1).



Figura 1. Muestras de *Pinus pinea* L. con diferentes espesores de corteza utilizadas en los ensayos.

Los test de inflamabilidad se realizaron con el calorímetro de pérdida de masa (Mass Loss Calorimeter, FTT®, Figura 2) usando la metodología propuesta por DEHANE et al. (2015). Las variables de inflamabilidad evaluadas fueron: tiempo de ignición (TTI, s), tasa de calor emitido (HRR, kW/m²) y máxima tasa de calor emitido (PHRR, kW/m²), calor total emitido (THR, MJ/m²), y proporción de masa residual (RMF, %). Para realizar el seguimiento de la temperatura a la profundidad del cambium de cada muestra durante los ensayos se utilizaron 4 termopares de tipo K, de 1 mm de diámetro, y un Datataker DT500. Uno de los termopares se situó sobre la corteza en el punto central de la probeta y los otros tres en diferentes posiciones entre la corteza y la albura.

Para todas las muestras, se midió el espesor de corteza máxima y mínima, el espesor total de la muestra por todas las caras, y el espesor de corteza sobre cada uno de los tres termopares a la profundidad del cambium (al menos 5 medidas de espesor por cara), y se pesó tanto la corteza como el total de la muestra. Estas determinaciones se llevaron a cabo antes y después del ensayo.

El porta-muestras se situó en el calorímetro de pérdida de masa a 23 mm de la resistencia para obtener un flujo de calor incidente de 25 kW/m² sobre la muestra. Los ensayos se llevaron a cabo con presencia de chispa piloto. Una vez inflamada la muestra, se registró ese instante como tiempo de ignición (*Time To Ignition*, TTI) y se retiró el chispómetro. Se registró el momento de extinción (*Time To Flame Out*, TFO), así como cualquier evento o anomalía (varias igniciones, etc.) que ocurría durante el ensayo. El software MLCalc FTT® permitió observar en tiempo real la curva de tasa de calor emitido

(HRR). Cada ensayo se mantuvo hasta que se observó que la curva de HRR se estabilizaba y se comportaba de forma asintótica. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente hasta que la curva de temperatura a la profundidad del *cambium* bajó de 60 °C (Figura 3).

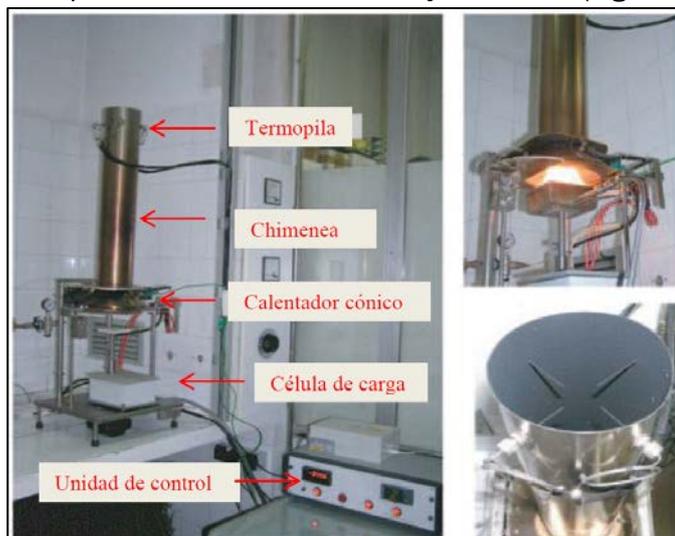


Figura 2. Calorímetro de pérdida de masa. Detalle de un ensayo y de la termopila.



Figura 3. Muestras de *Pinus pinea* L. de diferentes espesores de corteza tras la ejecución de los ensayos.

Se generó una base de datos para las variables descriptivas de la muestra, las variables de inflamabilidad y las variables de resistencia (ver párrafo posterior) para cada uno de los test realizados (N=40). Se realizó un análisis previo de depuración de los datos con el objeto de eliminar valores fuera de rango (*outliers*) o ensayos cuyos datos no tenían sentido físico por errores en la toma de datos de temperaturas. El resultado final fue la eliminación de tres ensayos, con lo que la muestra final fue de 37 ensayos (N=37).

En primer lugar, se analizó la matriz de correlaciones mediante el estadístico de Pearson no paramétrico. De las variables cuya relación resultó significativa ($p < 0,05$) se exploraron ajustes a modelos lineales o no lineales dos a dos.

Con el objeto de obtener un modelo descriptivo de la resistencia al fuego de las cortezas analizadas de *Pinus pinea*, se exploraron modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares* PLS). Este método combina el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis de Regresión Múltiple explorando las relaciones entre variables respuesta de forma simultánea y permitiendo obtener modelos con un elevado número de variables explicativas para un reducido número de datos de partida. El presente estudio cuenta con 37 datos de partida (N=37 muestras) y gran cantidad de variables explicativas, estando muchas de ellas correlacionadas. Como variables dependientes se seleccionaron el tiempo medio (s) en el que el *cambium* alcanzó temperaturas letales para los tejidos vivos (60 °C) y la tasa media de las máximas de aumento de temperatura a la profundidad del *cambium* (°C/s) como principales variables indicadoras de la

resistencia al fuego de las cortezas. Como variables independientes (predictoras) se seleccionó un conjunto reducido de las mismas apoyado en la matriz de correlaciones que incluyó las principales componentes de la inflamabilidad de la corteza y las características de la muestra:

$$[Y_q] = a_q^p [X_p]$$

Donde Y_q es el vector de variables dependientes (en este caso $q=2$, Tiempo y Tasa máxima en que el cambium alcanza 60°C), X_p es el vector de variables independientes y a_q^p son los coeficientes escalados del modelo que a su vez evalúan la importancia relativa y el signo de influencia en cada una de las variables dependientes. El resultado final es la obtención de dos modelos lineales múltiples para cada una de las variables dependientes:

$$Y_1 = \sum_{p=1}^n a_p^1 X_p$$

$$Y_2 = \sum_{p=1}^n a_p^2 X_p$$

Esta técnica evita los problemas de multicolinealidad entre las múltiples variables explicativas iniciales, siendo su principal ventaja el considerar la variación simultánea de las variables dependientes, además de hallar una combinación lineal de las variables explicativas a pesar de conocer que están autocorrelacionadas de una manera robusta. Se ha trabajado con dos algoritmos complementarios entre sí para obtener las componentes del modelo:

1. *General Partial Least Squares Model*
2. *NIPALS, Nonlinear Iterative Partial Least Squares*

El modelo únicamente debe incluir las componentes significativas, y para la determinación del número óptimo de componentes se ha utilizado el método de validación cruzada mediante el estadístico Q^2 de Stone-Geiser. Con el objeto de valorar la contribución relativa de cada variable independiente en el modelo se comprueba el valor y sentido físico de los coeficientes escalados y la importancia de predicción de cada variable mediante el estadístico VIP (*Variance Importance in Projection*). La salida final es un modelo lineal múltiple con un ajuste estimado mediante el estadístico R^2Y , que es equivalente al R^2 ajustado de un modelo lineal múltiple obtenido por mínimos cuadrados generalizados, y el estadístico R^2X , que evalúa la autocorrelación existente entre las variables independientes.

3.2. Ajuste de ecuación de perfil del espesor de corteza

En 1966, el IFIE instaló una red de 37 parcelas permanentes en mases puras y regulares de *Pinus pinea* en las provincias de Valladolid (15 parcelas), Madrid (4 parcelas), Huelva (13 parcelas) y Sevilla (5 parcelas). En el momento de la instalación se midió el diámetro normal en todos los pies de la parcela, y la altura en una submuestra de 40 árboles (incluyendo los 10 dominantes de la parcela).

En cada una de las parcelas se seleccionaron 15 árboles (555 árboles en total) en los que se procedió a medir el diámetro de la sección - con forcípula - y el espesor de corteza de la sección - utilizando un calibrador de corteza - en intervalos de 1 metro de longitud (empezando por la altura 0,50 m) en los primeros 10 metros de fuste, y de 2 metros de longitud en el resto del fuste, hasta alcanzar el límite de diámetro de sección en punta delgada de 7 cm con corteza. Las mediciones se realizaron sobre los árboles en pie, utilizando los operarios escaleras, y en cada sección el diámetro y el espesor se midieron en dos direcciones perpendiculares. Estas mediciones se realizaron al objeto de elaborar tablas y tarifas de cubicación para la especie (PITA, 1967). La Tabla 1 recoge los valores

referidos a la muestra de árboles tipo.

Tabla 1.
la
de
tipo.

	Huelva	Madrid	Sevilla	Valladolid	TOTAL
nº parcelas	13	4	5	15	37
nº pies	195	60	75	225	555
nº secciones	1394	326	645	1431	3795
dn (cm)	20,8	20,0	21,3	25,3	22,5
ht (m)	11,9	7,6	11,9	9,5	10,6
Rango dn (cm)	6,5 - 43,0	9,5 - 29,2	7,8 - 30,4	6,9 - 39,2	6,5 - 43,0
Rango_ht (m)	3, 0- 23,5	3,3 - 10,8	6,0 - 16,8	2,9 - 15	2,9 - 23,5
Cort (mm)	12,8	17,3	12,0	19,0	15,4
Cort_max (mm)	50	60	41	65	65

Datos de
muestra
árboles

Dn=Diámetro normal dbh, Ht=Altura total, Cort=espesor de corteza medio, Cort_max=espesor de corteza máximo

El espesor de corteza en una sección “j” dada del árbol “i” ($cort_{ij}$, en mm) se va a utilizar como variable de respuesta, mientras que como potenciales variables explicativas se van a evaluar el diámetro normal del árbol (dn_i , en cm), la altura total del árbol (ht_i , en m), la altura de la sección (h_j , en m), la altura relativa de la sección $(h/ht)_{ij}$, así como sus transformadas logarítmicas.

Se plantea el ajuste de un modelo lineal múltiple. En una primera fase se utilizará un criterio de selección secuencial paso a paso, controlando la entrada de variables altamente relacionadas aplicando un criterio de factor de inflación de varianzas = 10. Una vez seleccionado el conjunto de variables explicativas, y teniendo en cuenta el carácter jerárquico de los datos (observaciones repetidas en un árbol, árboles medidos en una misma parcela), se procede al ajuste de un modelo mixto lineal, incluyendo sendos efectos aleatorios de parcela y de árbol. Una vez ajustado el modelo, se procederá a evaluar los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos, así como a presentar los estadísticos de bondad del ajuste, referido a las predicciones marginales (no considerando los efectos aleatorios) y condicionales.

4. Resultados

Régimen térmico y espesor de corteza

Las curvas de temperatura medidas entre la corteza y la albura (profundidad del *cambium*) muestran comportamientos claramente diferentes para las muestras de más y de menos de 2 cm de espesor medio (Figura 4). Por tanto, los tiempos en alcanzar las temperaturas letales en el *cambium* no sólo son menores en los espesores más reducidos sino que la duración de llama y la tasa media de transmisión de temperatura es significativamente superior en las muestras de espesores reducidos de menos de 2 cm (Figura 4)

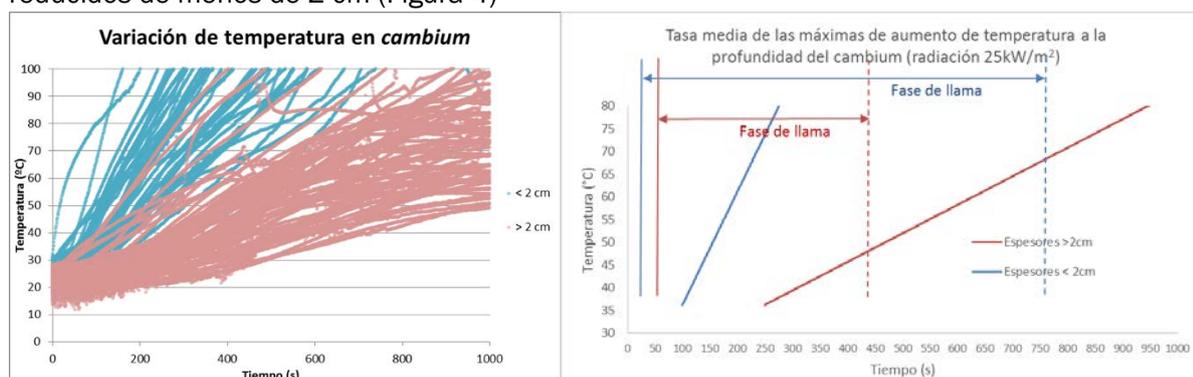


Figura 4. Variación de Temperatura (°C) en el cambium para cortezas de *Pinus pinea* L. de espesor mayor y menor a 2 cm y rectas de regresión que muestran la diferencia de las tasas promedio de aumento de temperatura para espesores de más y menos de 2 cm ($r^2=0,4$; $p<0,01$)

Modelos de estimación de la resistencia al fuego

Una vez analizada la matriz de correlaciones, se han explorado modelos múltiples PLS para predecir la resistencia al fuego (tiempos medios en alcanzar temperaturas letales y tasas medias de las máximas de incremento de temperatura) en función de las características de la corteza (espesores) y su inflamabilidad. El modelo PLS obtenido (Tabla 2) presenta un ajuste global del 70% ($R^2Y=0,70$; $R^2X=0,70$; Q^2 Stone-Geiser 0,58; 2 componentes). Los resultados muestran que se puede predecir la resistencia al fuego de *P. pinea* midiendo o estimando las siguientes variables: espesores máximos y mínimos (variables anterior al fuego), tiempo de ignición y duración de llama (variables dependientes del fuego), calor total emitido por la corteza (combustibilidad de la corteza) y porcentaje de corteza residual (variable tras el paso del fuego).

Tabla 2. Coeficientes escalados del modelo PLS para estimar simultáneamente los tiempos medios de temperaturas letales en *cambium* (TPBmed) y la tasa media de aumento de temperatura (Pte promedio).

	Masa residual corteza (%)	Tiempo de ignición (s)	Duración de llama (s)	Calor total emitido (MJ/m ²)	Espesor max medio pre quema (mm)	Espesor min medio pre quema (mm)
Tpbmed (s)	0,36	0,02	0,06	-0,06	0,39	0,20
Pte promedio (°C/s)	-0,37	-0,02	-0,06	0,06	-0,41	-0,21

Los coeficientes escalados indican la importancia relativa (valor absoluto del coeficiente) y el signo de influencia de las variables explicativas seleccionadas (sentido físico) en cada una de las variables dependientes, mostrando que los espesores y la masa residual son las variables más significativas.

Una vez obtenido el modelo se compararon los valores de las variables que predice con los valores reales observados en cada uno de los ensayos. En la Figura 5 se presentan las gráficas de los valores observados frente a los valores predichos para cada variable dependiente

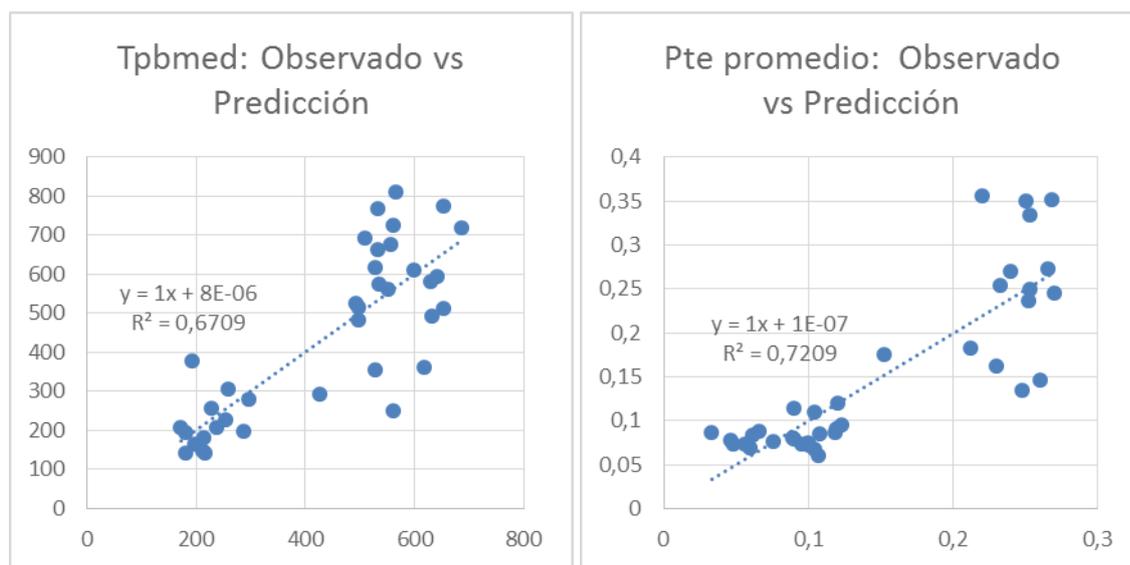


Figura 5. Comparación de los valores observados durante los ensayos y los valores predichos con el modelo PLS para las variables dependientes, Tpbmed (s) (Tiempo medio para alcanzar 60°C) y Pte promedio (°C/s) (Tasa media de aumento de temperatura a la profundidad del cambium). El ajuste global del modelo es $R^2Y=0,70$

Modelo de perfil de corteza

Un análisis exploratorio preliminar permitió identificar que la variable más relacionada con el espesor de corteza es la altura relativa de fuste (Figura 6), aunque en su transformada logarítmica. El método secuencial permitió seleccionar a las variables $\log(h/ht)$, dn y ht como las potenciales explicativas. Aunque la entrada de más variables suponía una mejora significativa del modelo, fueron descartadas porque implicaban aumentos notables de la multicolinealidad. El modelo finalmente seleccionado fue:

$$cort_{ij} = \mu + a \cdot \log\left(\frac{h_{ij}}{ht_i}\right) + b \cdot dn_i + c \cdot ht_i + u + v + e_{ij}$$

Donde μ , a , b y c son parámetros estimables, u y v representan los efectos aleatorios de parcela y árbol, distribuidos según una normal de media cero y varianzas σ_u^2 y σ_v^2 respectivamente, y e representa el término residual del error condicional. La Tabla 3 muestra el valor obtenido para los parámetros en el ajuste. Se comprueba cómo todos los parámetros son altamente significativos.

Tabla 3. Estimadores de los parámetros del modelo

Tipo efecto	Parámetro	Estimador	p-valor
Fijo	μ	-3,9174	<0,0001

	a	-9,9302	<0,0001
	b	0,6764	<0,0001
	c	-0,7221	<0,0001
Aleatorio	σ_u^2	2,5297	0,0005
	σ_v^2	1,6457	<0,0001
	σ_e^2	14,0743	<0,0001

El signo de los estimadores de los parámetros indica que para una sección determinada, el espesor de corteza disminuye con la altura relativa del fuste, aumenta con el diámetro normal del árbol y, a igualdad de los dos parámetros anteriores, disminuye con la altura total del árbol.

El modelo permite realizar predicciones marginales insesgadas, alcanzando una eficiencia del modelo MEF (estadístico análogo al R^2) de 81,82%, con un valor de la raíz del error medio cuadrático (RMSE) de 4,25 mm (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticos de bondad del ajuste

Predicción	E	p-valor	RMSE	MEF
Marginal	-0,0827	0,2311	4,257	81,82%
Condicional	0	1	3,6245	86,82%

Al analizar el comportamiento del sesgo de las predicciones marginales a lo largo del fuste (Figura 6) se observa cómo el modelo tiende a sobreestimar el espesor de corteza tanto en la parte baja como en la parte alta del fuste, mientras que predice adecuadamente en todo el tramo intermedio del fuste (el comprendido entre alturas relativas de 0,15 y 0,8). Mientras que en la parte baja la importancia en términos relativos es menor (puesto que es la zona con mayores espesores de corteza), en la parte alta del fuste puede conducir a errores relativos notables, ya que en esa zona la corteza suele tener espesores muy pequeños. Este sesgo en la parte superior viene motivado por dos razones: (i) el modelo no está forzado matemáticamente a que en el punto altura total el espesor de corteza sea cero, (ii) errores de medición en las alturas relativas más elevadas, donde la corteza es muy fina.

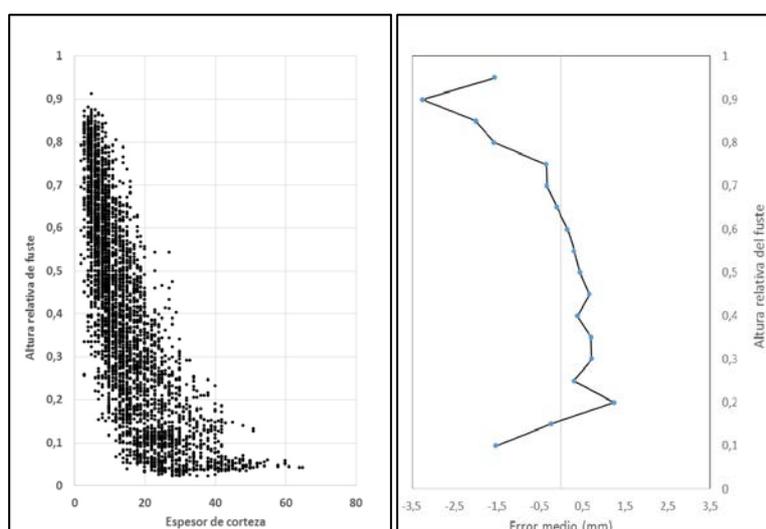


Figura 6. Variación del espesor de corteza con la altura relativa del fuste (altura de sección dividida por altura total) y Error medio en la estimación del espesor de corteza en función de la altura relativa del fuste

5. Discusión

El avance de temperatura a través de la corteza de *Pinus pinea* se caracteriza por dos tasas de calentamiento diferenciadas en función del espesor de corteza. Así, espesores de corteza de menos de 2 cm, alcanzan temperaturas críticas (60 °C) en el *cambium* en menor tiempo que las de más de 2 cm, además de inflamarse en menos tiempo, extinguirse más tarde (mayor duración de la fase de llama), y presentar mayor dispersión en el comportamiento de las curvas de temperatura. Por tanto, el análisis del régimen térmico mostró que el espesor de corteza de *Pinus pinea* es un buen indicador de su resistencia al fuego (FERNANDES et al., 2008). El espesor de corteza a partir del cual los daños no son críticos se sitúa en torno a un valor de 2 cm por encima del cual disminuye la probabilidad de muerte del *cambium* (PAUSAS et al., 2015).

El espesor de corteza y la combustibilidad (calor total emitido y duración de llama) y la masa residual de corteza son las variables que mejor explican la resistencia al fuego. Estos resultados coinciden en gran medida por los obtenidos por DEHANE et al. (2015) para *Quercus suber*. El hecho de que los espesores mínimos (presencia de grietas, irregularidades y rugosidad) influyan significativamente en la resistencia al fuego contradice los resultados de estudios anteriores desarrollados con otras metodologías (FREJAVILLE et al., 2013) que consideran el espesor máximo como la variable más determinante para explicar el efecto protector de las cortezas.

El modelo de perfil presentado permite realizar dos tipos de estimaciones:

- Analizar la variación del espesor de corteza a lo largo del fuste, para un árbol con un diámetro normal y altura total dados, aplicando directamente la ecuación.
- Determinar a qué altura del fuste se alcanza un espesor de corteza en concreto. Para ello es necesario despejar de la ecuación el valor de altura del fuste h en función de dn , ht y el valor de corteza dado (Figura 7).

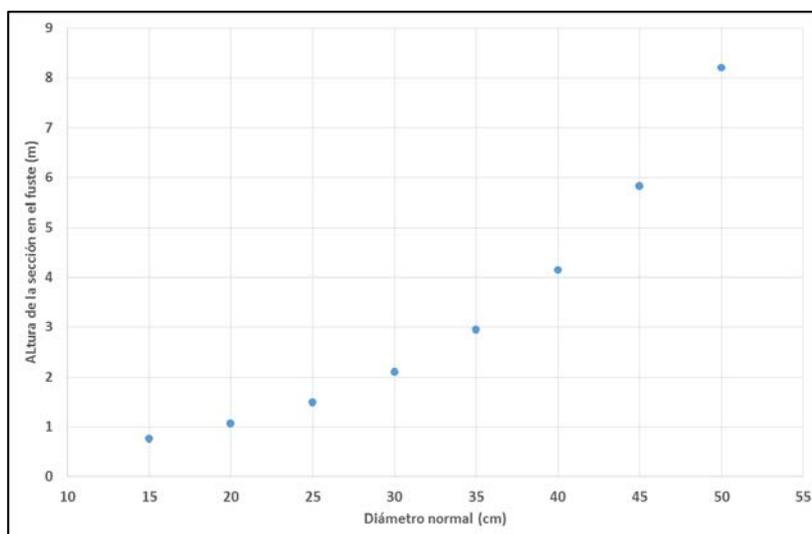


Figura 7. Altura de fuste a la que un árbol de 12 m de altura alcanza un espesor de corteza de 25 mm, en función del diámetro normal del pie

Según el modelo, los pies con diámetros normales de más de 20 cm aseguran espesores de corteza de 25 mm por debajo del metro de altura. Eso implica que fuegos de baja intensidad (o quemas prescritas) con alturas de llama menores de 1 m no afectarían significativamente a la mortalidad del arbolado. Sin embargo, fuegos de mayor intensidad con alturas de llama de, por

ejemplo 4 m, muy frecuentes en incendio de matorral bajo arbolado, conllevaría alta probabilidad de mortalidad de arbolado para todos aquellos pies con diámetros normales inferiores a 40 cm. De igual forma, el modelo ayudaría a predecir la probabilidad de mortalidad del *cambium* tras un incendio en función de las alturas de chamuscado en los pies afectados. Este dato es de especial interés debido a la capacidad de recuperación de *P. pinea* tras el paso del fuego, aunque afecte a una proporción importante del volumen de su copa.

6. Conclusiones

Las quemas prescritas y experimentales a menudo son monitorizadas con termopares para medir las temperaturas alcanzadas en los tejidos vivos y la resistencia de la corteza al fuego. Los resultados obtenidos en este estudio permitirán contrastar los resultados obtenidos en laboratorio y validar los modelos propuestos en el caso de quemas prescritas bajo arbolado de *P. pinea*. Los resultados sugieren que, como primera aproximación, se puede trabajar con las bases de datos existentes de espesor de corteza que, por la forma en que se mide en campo, se consideran espesores máximos o medios en la sección definida. No obstante, si se quiere profundizar en la caracterización de las cortezas y su relación con la resistencia al fuego, otros factores como la rugosidad, irregularidad o presencia de grietas que expongan al *cambium* a temperaturas letales podrían ser también variables interesantes a estimar en futuros estudios.

Se han generado modelos de perfil para estimar el espesor de corteza a lo largo del fuste. Esta combinación de datos de laboratorio y campo tiene resultados con aplicaciones en la ecología de los pinares de *Pinus pinea*, así como en la selvicultura preventiva (desbroces, podas) para evaluar alturas críticas de chamuscado de tronco durante incendios y quemas prescritas. De igual forma, los resultados abren la puerta a futuras investigaciones sobre interacciones genéticas y fenotípicas de la corteza y sobre cómo la selvicultura podría influir en el proceso de formación de cortezas más gruesas cuando el objetivo principal de la masa no sea la producción de madera, como es el caso de la mayoría de las masas de *P. pinea*.

Se propone aplicar la metodología empleada en el presente estudio a ensayos en otras especies. De esta manera se podrá cuantificar cómo las cortezas protegen los tejidos vivos a nivel de la masa forestal en un rango amplio de ecosistemas. Los resultados serían de aplicación en el campo de la ecología y la gestión forestal, ya que adaptaciones como el espesor de la corteza podría tener un papel determinante en un contexto de cambio climático

7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado en el contexto de la estancia de prácticas en el Laboratorio de incendios forestales del INIA (Centro de Investigación Forestal) y del trabajo fin de grado de la Escuela de Ingeniería Forestal de la Escuela de Pontevedra (Universidad de Vigo) de Jennifer Souto. El trabajo se ha completado en el contexto del proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06-01.). Parte de los datos utilizados en este trabajo proceden de la red SEGEFORS, mantenida con cargo al proyecto AT2013-04.

8. Bibliografía

CALAMA, R.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; MONTERO G.; 2007. Management oriented growth models for multifunctional Mediterranean forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). EFI Proceedings 56: 57-70.

CALAMA, R.; GORDO, J.; MADRIGAL, G.; MUTKE, S.; CONDE, M.; MONTERO, G.; PARDOS, M.; 2016. Enhanced tools for predicting annual stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production at tree and forest scale in Inner Spain. *For Syst*, 25(3), e079

CELLINI, J.M.; GALARZA, M.; BURNS, S.L.; MARTINEZ-PASTUR, G.J.; LENCINAS, M.V.; 2012. Equations of bark thickness and volume profiles at different heights with easy-measurement variables. *For Syst* 21(1): 23-30

CATRY, F.X.; MOREIRA, F.; PAUSAS, J.G.; FERNANDES, P.M.; REGO, F.; CARDILLO, E.; CURT, T.; 2012. Cork oak vulnerability to fire: The role of bark harvesting, tree characteristics and abiotic factors. *PLoS ONE* 7(6): e39810

DEHANE, B.; MADRIGAL, J.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; 2015. New bench-scale protocols to characterize flammability and fire resistance of trees: application to Algerian cork. *J Fire Sci* 33(3): 202-217

FERNANDES, P.M.; VEGA, J.A.; JIMÉNEZ, E.; RIGOLOT, E.; 2008. Fire resistance of European pines. *For Ecol Manag* 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): 1-8

LI, R.; WEISKITTEL, A.R.; 2011. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach: comparison of model forms and subsampling strategies. *Eur J For Res* 130:219–233

MANSO, R.; PARDOS, M.; CALAMA, R.; 2014. Climatic factors control rodent seed predation in *Pinus pinea* L.stands in Central Spain. *Ann For Sci* DOI 10.1007/s13595-014-0396-y

MADRIGAL, J.; HERNANDO, C.; GUIJARRO, M.; DÍEZ, C.; 2009. Evaluation of forest fuel flammability and combustion properties with an adapted mass loss calorimeter device. *J Fire Sci* 27: 323–342.

PAUSAS, J.; 2015. Bark thickness and fire regime. *Funct Ecol* 29: 315-327.

PAUSAS, J.; 2017. Bark thickness and fire regime: another twist. *New Phytol* 213(1): 13-15.

PAUSAS, J.; ALESSIO, G.; MOREIRA, B.; CORCOBADO, G.; 2012. Fires enhance flammability in *Ulex parviflorus*. *New Phytol* 193: 18–23.

PITA, P.A.; 1967. Tablas de cubicación por diámetros normales y alturas totales. IFIE. Madrid, 73 pp

RYAN, K.; 2000. Técnicas para establecer prescripciones que minimizen o reduzcan la mortalidad del arbolado. *Cuad Soc Esp Cienc For* 9: 59-77

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.O.; SÁNCHEZ, M.M.; CAÑELLAS, I.; 2007. Modelo de predicción del calibre de bornizo mediante funciones de perfil del tronco. *Cuad Soc Esp Cienc For* 23: 239.-243

TAPIAS, R.; CLIMENT, J.; PARDOS. J.A.; GIL, L.; 2004. Life histories of Mediterranean pines. *Plant Ecol* 171 (1-2): 53-68

VALOR, T; GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R.; PIQUÉ M.; 2015. Assessing the impact of prescribed burning on the growth of European pines. *For Ecol Manag* 343: 101-109