



9CFE-1820

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Nueva aplicación informática para la determinación del espesor de la corteza en altura en masas de pinar: estimación de vulnerabilidad a incendios de superficie y aptitud para quemas prescritas

BENITO J. (1), MARTÍNEZ J. (1), ÁLVAREZ-GONZÁLEZ J. D., (2), RUIZ-GOZÁLEZ A.D. (2), CALAMA R. (1), MADRIGAL J. (1)

(1) ICIFOR-INIA (CSIC)

(2) USC. Escuela Politécnica Superior. Campus de Lugo

Resumen

Los espesores de corteza de los inventarios no suelen ser de suficiente detalle para obtener el perfil vertical a lo largo del tronco, dato fundamental para conocer la resistencia al fuego del arbolado. En este trabajo se han llevado a cabo inventarios de espesor de corteza metro a metro en masas de *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *P. sylvestris* y *P. pinea* para generar modelos de espesor de corteza. En el contexto de la prueba de concepto VIS4FIREApp se han generado nuevas herramientas de cálculo que facilitan el uso de estos modelos y sus aplicaciones en la clasificación de masas de pinar vulnerables a incendios de superficie o aquellas potencialmente aptas para la ejecución de quemas prescritas bajo arbolado. Se ha desarrollado unacalculadora en formato Excel (VisualBasic). Los resultados se han utilizado para generar unaApp para móviles VBTApp que determina la vulnerabilidad a fuegos de superficie y la aptitud para quemas prescritas en masas de pinar.

Además, en base a estos algoritmos, se ha desarrollado un visor aplicado a los datos del Inventario Forestal Nacional para que el usuario tenga cartografía de referencia a escala de paisaje. Este programa, desarrollado en lenguaje Phyton, permitiría potencialmente a cualquier usuario enviar su inventario de campo en formato Excel obteniendo datos particularizados para su área de trabajo a escala árbol o parcela sobre vulnerabilidad a incendios y aptitud a quemas prescritas.

Palabras clave

App, Pprueba de Cconcepto (PdC), vulnerabilidad, Pphyton, resistencia al fuego

1. Introducción

La vulnerabilidad a riesgos naturales es una disciplina bien estudiada en Europa (BIRKMANN et al. 2014) aunque con mayor desarrollo teórico y técnico en el ámbito forestal desde el punto de vista de la protección civil en la interfaz urbano-forestal (proyecto WUIWATCH <https://wuiwatch.org/>). En el ámbito de la protección civil, el análisis de la distribución territorial de la vulnerabilidad y del nivel de gravedad potencial de incendios permite tomar las medidas adecuadas en materia de prevención (Directriz Básica de Protección Civil de emergencia por Incendios Forestales modificada en BOE de 7 de diciembre de 2013). En este sentido, la planificación de la defensa contra incendios forestales debe incluir este enfoque como complementario al tradicional del valor intrínseco de los montes.

Los combustibles forestales son determinantes para explicar la vulnerabilidad de los sistemas forestales a los grandes incendios, frecuentemente de alta severidad. Aunque se ha avanzado mucho sobre modelización de combustibles quedan aún importantes huecos de información para que estos modelos se puedan usar de manera rutinaria en la gestión adaptativa. Como consecuencia, primero del proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06) y después del proyecto VIS4FIRE (RTA2017-00042-C05) se están abordando cuestiones importantes como son el efecto de las quemas de baja intensidad sobre diversos componentes del sistema (arbolado, matorral, suelo, riqueza de especies) y la vulnerabilidad del ecosistema al



tratamiento de quema bajo arbolado. El espesor de corteza se ha mostrado como la variable más determinante para reducir los daños en el cambium durante la ejecución de quemas prescritas (MADRIGAL et al. 2023). Sin embargo, son escasos los modelos que predicen el espesor de corteza a lo largo del perfil del tronco (MADRIGAL et al. 2017, 2019) y tampoco existen herramientas que permitan al gestor planificar la vulnerabilidad de masas de pinar al fuego de superficie en función de la protección de los tejidos vivos (MADRIGAL et al. 2019) ni de su aptitud para el uso del fuego en programas de quemas prescrita que permita descartar o seleccionar zonas aptas según su resistencia al fuego a las prescripciones previstas.

Por tanto, las innovaciones propuestas surgen de una necesidad científica pero también de una demanda del sector forestal en general y de los responsables de la gestión de los incendios forestales en particular. La intensa colaboración en los últimos años de los equipos de investigación forestal especializados en incendios forestales con administración forestal y empresas del sector ha generado unas sinergias, que han permitido la transferencia directa e inversa de parte de los resultados. No obstante, existe la necesidad por parte de los gestores, empresas y profesionales de disponer de herramientas de fácil manejo para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas al fuego, así como evaluar adecuadamente parte de sus actuaciones, como es el empleo de las quemas prescritas, una herramienta incipiente en muchas comunidades autónomas, las acciones durante las actuaciones de extinción y emergencia, así como las labores de restauración de áreas incendiadas.

Por todo ello, en el contexto de la prueba de concepto PdC VIS4FIREApp, se planteó la generación de programas de fácil manejo que permitan al gestor: (1) Conocer la vulnerabilidad potencial de masas de pinar a fuegos de superficie que puedan poner en compromiso la resistencia de las cortezas a la protección de los tejidos vivos (2) Evaluar la aptitud de masas de pinar a programas de quema prescrita en función de su distribución vertical de corteza de acuerdo con las prescripciones más habituales ejecutadas en España.

2. Material y Métodos

2.1. Modelos para *Pinus pinaster*, *P. sylvestris* y *P. radiata*

Los datos utilizados provienen de 824 árboles apeados de las tres especies de pino más abundantes en la Comunidad Autónoma de Galicia: *Pinus pinaster* (203 árboles), *Pinus radiata* (385 árboles) y *Pinus sylvestris* (236 árboles). Los árboles fueron apeados, troceados y se midieron los diámetros en la base de cada troza con dos mediciones perpendiculares con forcípula de precisión milimétrica, así como la altura desde el suelo a la que se encontraba la base de la troza, con cinta métrica de precisión centimétrica. Los espesores de corteza se midieron también en las bases de las trozas en las mismas direcciones que los diámetros y con precisión milimétrica. En la tabla 1 se muestran los principales valores descriptivos de diámetros y alturas de los árboles muestreados.

Tabla 1. Valores de estadísticos para el dbh y altura total de la muestra de árboles usadas para ajustar modelos de distribución vertical de corteza

Variable	Estadístico	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus radiata</i>	
<i>n</i> =236	<i>n</i> = 203	<i>n</i> = 385			
d	24.79	37.03		30.10	
67.0	72.9			60.0	
8.7	10.6			5.1	
6.82	11.99			12.71	
Altura total	(<i>h</i>	, m)	12.45	21.90	22.01
26.95	31.57			36.49	
4.23	6.37			4.24	
4.45	5.03			6.14	

El modelo que se ha empleado para ajustar la función de perfil con corteza ha sido el de Riemer et al. (1995):

$$r = \frac{d}{2} = \frac{b_1 \cdot D}{1 - e^{b_1(1.3-H)}} + \left(\frac{D}{2} - b_1 \cdot D\right) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 - e^{b_2(1.3-H)}}\right] + e^{-b_2 \cdot h} \cdot \left[\frac{(D/2 - b_1 \cdot D) \cdot e^{1.3 \cdot b_2}}{1 - e^{b_2(1.3-H)}}\right] - e^{b_2 \cdot h} \cdot \left[\frac{b_1 \cdot D \cdot e^{-b_2 \cdot H}}{1 - e^{b_2(1.3-H)}}\right] \quad [1]$$

Siendo:

Ejerc. 3.						
Donde	D	=				
d	=	h				
H		=				
h	=	d				
b	1,	b	2y	b	3	=

Puesto que la base de datos contiene múltiples observaciones de cada árbol es razonable esperar autocorrelación entre los residuos de cada uno de ellos. Para corregirlo se ha modelizado la estructura del error empleado un modelo autorregresivo continuo de orden 2 CAR(2) cuya estructura es la siguiente:

$$e_{ij} = d_1 \rho_1^{h_{ij}-h_{ij-1}} e_{ij-1} + d_2 \rho_2^{h_{ij}-h_{ij-2}} e_{ij-2} + \varepsilon_{ij}$$

siendo e_{ij} el j th residuo del árbol i th, $d_1=1$ para $j>1$ y 0 para $j=1$, es el parámetro autorregresivo continuo de orden 1 a estimar, $h_{ij}-h_{ij-1}$ es la distancia en el tronco que separa la j th de la j th-1 medición en el mismo árbol con, $h_{ij}>h_{ij-1}$, $d_2=1$ para $j>2$ y 0 para $j \leq 2$, es el parámetro autorregresivo continuo de orden 2 a estimar, y $h_{ij}-h_{ij-2}$ es la distancia en el tronco que separa la j th de la j th-2 medición en el mismo árbol con $h_{ij}>h_{ij-2}$.

Esta estructura se programó en el procedimiento MODEL del programa SAS/ETSâ (SAS Institute Inc. 2004).

La ecuación empleada para estimar el espesor de corteza a diferentes alturas en el tronco ha sido el modelo alométrico siguiente:

$$e_{corteza} = a \cdot d^b \cdot D^c \cdot (H - h)^f$$

Donde

$$e_{corteza}$$

a

b

c

d

f

Finalmente, la ecuación del diámetro sin corteza se obtiene como diferencia entre el diámetro con corteza y el doble del espesor de corteza:

$$d_{sc} = \frac{d_{cc}}{2} = \frac{b_1 \cdot D}{1 - e^{b_2(1.3-H)}} + \left(\frac{D}{2} - b_1 \cdot D \right) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 - e^{b_2(1.3-H)}} \right] + e^{-b_2 \cdot D} \cdot \left[\frac{(D/2 - b_1 \cdot D) \cdot a^{1/b} \cdot b_1}{1 - e^{b_2(1.3-H)}} \right] - e^{b_2 \cdot D} \cdot \left[\frac{b_2 \cdot a \cdot e^{-b_2 \cdot D}}{1 - e^{b_2(1.3-H)}} \right] - a \cdot d^b \cdot D^c \cdot (H - h)^f \quad [3]$$

Las ecuaciones [1], [2] y [3] de la función de perfil con corteza, del espesor de corteza y del diámetro sin corteza constituyen un sistema con restricciones y se ajustaron simultáneamente para cada especie empleando la metodología SUR (“seemingly unrelated regression”).

2.2. Modelos para *Pinus pinea*

En 1966, el IFIE instaló una red de 37 parcelas permanentes en masas 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

El espesor de corteza en una sección “j” dada del árbol “i” (cortij, en mm) se utilizó como variable de respuesta, mientras que como variables explicativas se evaluó el diámetro normal del árbol (dni, en cm), la altura total del árbol (hti, en m), la altura de la sección (hj, en m), la altura relativa de la sección (h/ht)ij, así como sus transformadas logarítmicas. Se planteó el ajuste de un modelo lineal múltiple. En una primera fase se utilizó un criterio de selección secuencial paso a paso, controlando la entrada de variables altamente relacionadas aplicando un criterio de factor de inflación de varianza = 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 procedió 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.

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 (más detalles en MADRIGAL OLMO et al. 2017).

3. Resultados

En base a los modelos desarrollados se han realizado tres programas (Visual Basic para Excel, Apk para móviles y Phyton para ARCGIS online) para determinar la vulnerabilidad y límites de resistencia de los tejidos vivos de un árbol después de un incendio forestal o una quema prescrita. Estas herramientas realizan una simulación del espesor de corteza a lo largo del fuste a partir de la especie, diámetro normal y altura total del árbol, datos proporcionados por el usuario. Basándose en estos modelos y ejecutando el programa Phyton de forma masiva para las parcelas IFN de cada provincia también se ha desarrollado un visor para las especies estudiadas

La salida del programa VBT (Vulnerability Bark Thickness) proporciona los datos numéricos de las estimaciones de espesor de la corteza a lo largo de la altura del fuste. Para cada altura del árbol (m) la aplicación ofrece su espesor de corteza (cm), el diámetro del tronco (cm) y el diámetro sin corteza (cm). A continuación, representa gráficamente el espesor de corteza y calcula la altura máxima de llama en una quema prescrita (1 cm) o un incendio de superficie (2 cm) que se garantizan la supervivencia de los tejidos vivos del árbol (MADRIGAL et al. 2019, ESPINOSA et al. 2021). Si la altura de llama sobrepasa estos límites, la probabilidad de supervivencia del árbol se reduce y a partir de estos límites, el programa señala gráficamente la vulnerabilidad del árbol ante una quema prescrita y un incendio de superficie (Figura 1):

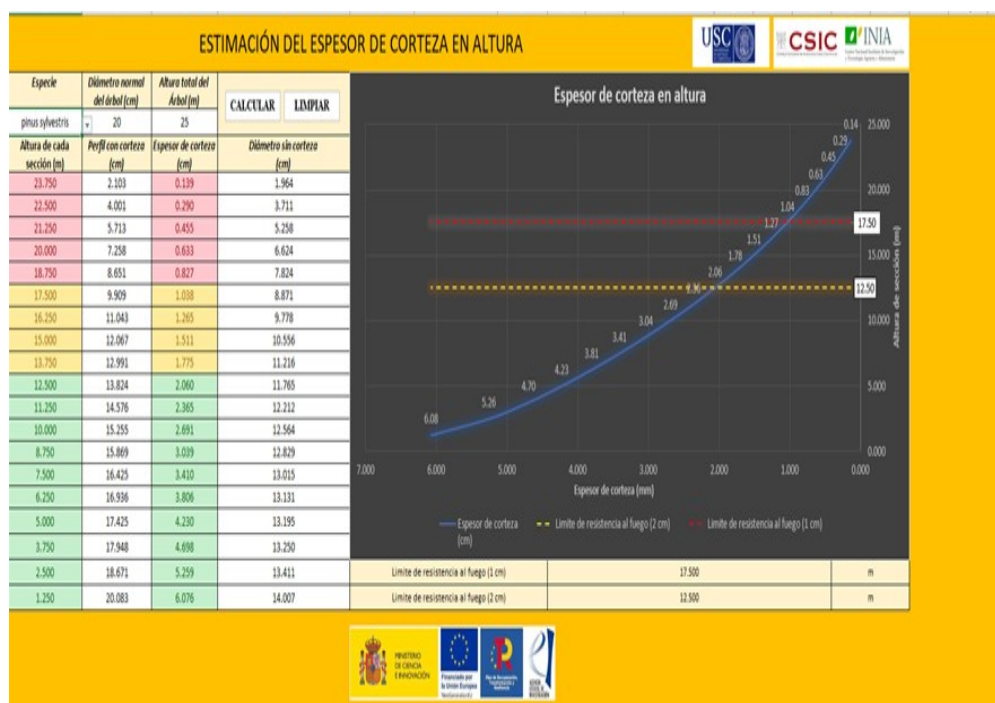


Figura 1. Ejemplo de salida del programa VBT con el que se puede simular el espesor vertical de corteza señalando los límites de resistencia al fuego para quemas prescritas (1 cm) y fuegos de superficie (2 cm).

Esta aplicación para ordenadores de sobremesa (Excel) se ha programado para que

se pueda usar en un dispositivo móvil (VBApp), facilitando su uso en trabajos de campo (Figura 2).

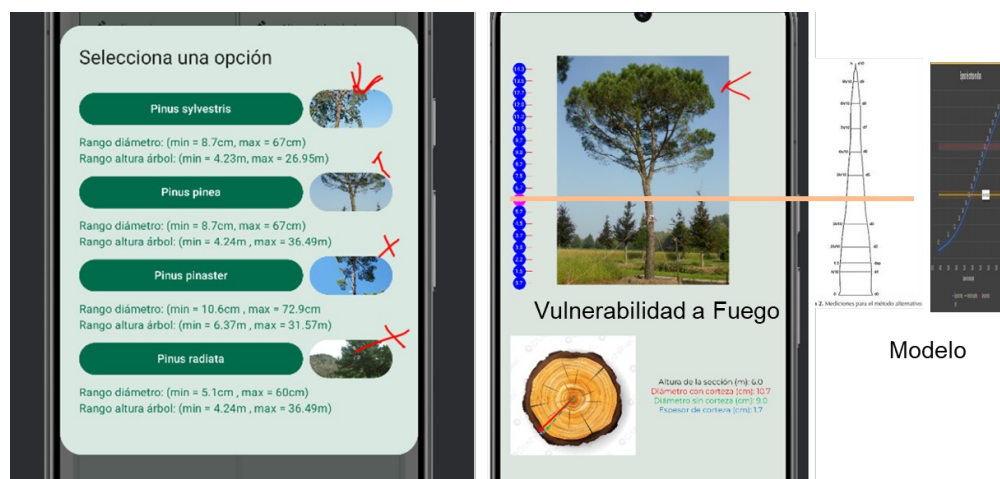


Figura 2. Diseño de aplicación VBApp para móviles con los módulos por especie, rango de aplicación de valores de altura y diámetro y ejemplo de representación del espesor de corteza en altura con los límites de vulnerabilidad al fuego de superficie

El programa Phyton diseñado para extender los modelos a escala nacional extrae automáticamente los datos del IFN de cada provincia para la especie analizadas y aplica automáticamente los modelos matemáticos para acumular los espesores medios de corteza en altura por parcela. El visor, diseñado en ARCGISonline (AGOL), realiza un clúster automático y una clasificación de dichos espesores, mostrando las alturas a partir de la cual tenemos espesores inferiores a 2cm (vulnerabilidad a incendios de superficie) o alturas para espesores superiores a 2 cm (aptitud para quemas prescritas bajo arbolado). (Figura 3).

La operatividad interna observada de la aplicación programada en Phyton trabajando en local ha permitido ejecutar los cálculos en tiempos reducidos. Por ejemplo, una provincia media que dispone de aproximadamente 1500 parcelas IFN, el tiempo de cálculo es de 5 minutos. Estos resultados sugieren que si se ofreciera esta aplicación para usuarios externos que quisieran clasificar su red de parcelas o inventarios de ordenación (< 500 parcelas), la respuesta sería prácticamente inmediata o en tiempos inferiores a 1 min.

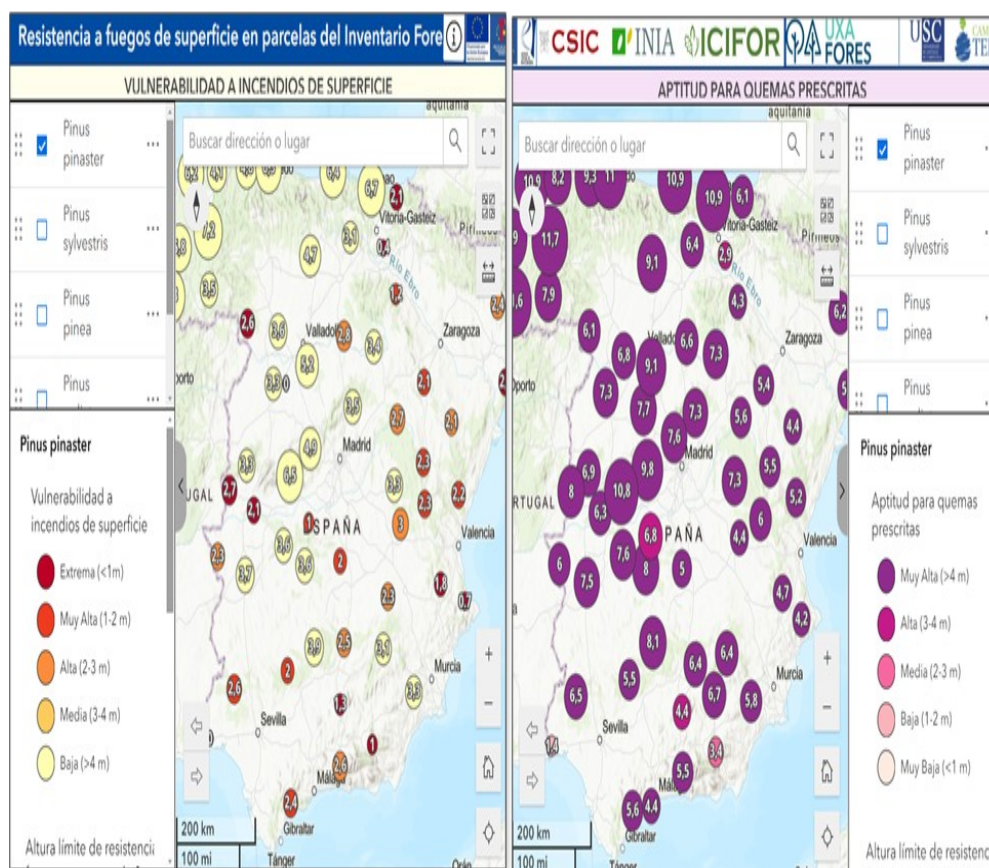


Figura 3. Ejemplos del visor en base a las parcelas IFN para las especies con disponibilidad de modelos de distribución vertical de corteza, mostrando la vulnerabilidad a fuegos de superficie según la altura esperada de resistencia al fuego según la altura de llama (espesor de corteza 2 cm) y la aptitud para quemas prescritas según la altura prevista de llama.

4. Discusión

Se han desarrollado por primera vez modelos de espesor de corteza en altura para especies de amplia distribución en España como *Pinus pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris*. 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, MADRIGAL et al., 2019). El producto propuesto dentro de la prueba de concepto PdC VIS4FIREApp ha alcanzado un grado alto de madurez tecnológica previsto TRL7 desde el TRL3 original, aunque algunas funcionalidades son mejorables en un futuro cercano, habiéndose diseñado el sistema con una arquitectura abierta que permita la inclusión de novedades y nuevos resultados de investigación, por ejemplo más modelos de perfil de distribución vertical de corteza en especies de importante distribución como *P. nigra* y *P. halepensis* en la península y *P. canariensis* en la Islas Canarias. También consideramos importante la inclusión de frondosas con resistencia al fuego en su corteza como es el caso paradigmático de *Quercus suber* de las que ya se existen modelos disponibles (SÁNCHEZ GONZÁLEZ et al. 2007). El uso de 2 cm de corteza como límite de resistencia al fuego de los ejidos vivos ha ratificado las observaciones de otros autores (FERNANDES et al. 2008, PAUSAS 2017). Se ha planteado como una herramienta en abierto, por tanto el objetivo es que tenga una transferencia directa al sector que se prevé implantará progresivamente según se conozca la herramienta por parte de servicios forestales y empresas



Para integrar la herramienta descrita con sus diferentes programas con el resto de aplicaciones desarrolladas en la PdC se ha desarrollado una web que funciona como caja de herramientas. Dicha web se ha programado en base a ARCGIS-online dispone de licencia indefinida del CSIC y por tanto existe garantía que la web permanecerá activa indefinidamente para poder incluir mejoras en los visores, programas y nuevas herramientas que ayuden a la evaluación adecuada de la vulnerabilidad integral a incendios forestales.

5. Conclusiones

El producto propuesto dentro de la prueba de concepto PdC VIS4FIREApp ha alcanzado un grado alto de madurez tecnológico previsto TRL7 desde el TRL3 original, aunque algunas funcionalidades son mejorables en un futuro cercano, habiéndose diseñado el sistema con una arquitectura abierta que permita la inclusión de novedades y nuevos resultados de investigación, por ejemplo más modelos de perfil de distribución vertical de corteza en especies de importante distribución como *P. nigra* y *P. halepensis* en la península y *P. canariensis* en la Islas Canarias.

Para integrar la herramienta descrita con sus diferentes programas con el resto de aplicaciones desarrolladas en la PdC se ha desarrollado una web que funciona como caja de herramientas. Dicha web se ha programado en base a ARCGIS-online dispone de licencia indefinida del CSIC y por tanto existe garantía que la web permanecerá activa indefinidamente para poder incluir mejoras en los visores, programas y nuevas herramientas que ayuden a la evaluación adecuada de la vulnerabilidad integral a incendios forestales

65. Agradecimientos

Las aplicaciones descritas se han realizado en el contexto de la prueba de concepto PDC2021-120845-C51 "Aplicación informática de apoyo a la gestión forestal mediante la reducción de la vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a los incendios (VIS4FIREapp)", financiada por la Agencia Española de Investigación con cargo a fondos de Recuperación y Resiliencia. El proyecto original del cual deriva esta PdC es RTA2017-00042-C05-01. Vulnerabilidad integral de los sistemas forestales frente a incendios: implicaciones en las herramientas de gestión forestal VIS4FIRE.

76. Referencias

- BIRKMANN J, KIENBERGER S, ALEXANDER DE. 2014. Assessment of vulnerability to natural hazards. A European perspective. Elsevier, Amsterdam. 219 p. ISBN 978-0-12-410528-7.
- 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
- ESPINOSA J, RODRÍGUEZ DE RIVERA J, MADRIGAL J, GUIJARRO M, HERNANDO C (2020). Predicting potential cambium damage and fire resistance in *Pinus nigra* Arn. ssp. *Salzmannii*. Forest Ecology and Management. Volume 474, 118372.
- FERNANDES, P.M.; VEGA, J.A.; JIMÉNEZ, E.; RIGOLOT, E.; 2008. Fire resistance of European pines. For Ecol Manag 256: 246-255
- 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
- MADRIGAL, J.; RODRÍGUEZ DE RIVERA, Ó.; CARRILLO, C.; GUIJARRO, M.;



- HERNANDO, C.; VEGA, J.A.; MARTIN-PINTO, P.; MOLINA, J.R.; FERNÁNDEZ, C.; ESPINOSA, J. 2023. Empirical Modelling of Stem Cambium Heating Caused by Prescribed Burning in Mediterranean Pine Forest. *Fire* 2023, 6, 430.
<https://doi.org/10.3390/fire6110430>
- MADRIGAL J, SOUTO-GARCÍA J, CALAMA R, GUIJARRO M, PICOS , HERNANDO C (2019) Resistance of *Pinus pinea* L. bark to fire. *International Journal of Wildland Fire* 28, 342-353.
- MADRIGAL OLMO, J., SOUTO GARCÍA J., CALAMA SANZ, R., GUIJARRO GUZMÁN, M., PICOS MARTÍN, J., HERNANDO, LARA C. (2017). Inflamabilidad de la corteza y evaluación de la resistencia al fuego de *Pinus pinea* L. 7º Congreso Forestal Español, Plasencia 26-30 junio 2017
- PAUSAS, J.; 2017. Bark thickness and fire regime: another twist. *New Phytol* 213(1): 13-15.
- RIEMER, T., GADOW, K.V., SLOBODA, B. 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *Allg. Forst-u. J.- Ztg.* 166: 144-147.
- 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
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/ETS 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.