



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



Servidor regional para la evaluación del peligro de incendio forestal y planificación de áreas prioritarias de gestión en Cataluña

BUSQUETS OLIVÉ, E.¹, KRSNIK G.¹, PIQUÉ NICOLAU, M.¹, GARCÍA-GONZALO, J.¹, GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.¹

¹ Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Solsona (Lleida), 25280.

Resumen

Tanto la evaluación del peligro de incendio como la planificación de estrategias de prevención requieren de diferentes recursos de información georeferenciados que representen la compleja interacción entre los diferentes factores y criterios asociados a estos procesos. A continuación, se presenta un servidor que contiene todas las variables necesarias para la simulación del comportamiento del fuego a escala regional. Se ha implementado un proceso innovador, en la asignación de modelos de combustible y parametrización de las variables ambientales y climáticas, con el objetivo de definir con mayor precisión las características de los modelos de combustible y sus comportamientos de fuego en diferentes escenarios meteorológicos. El servidor, abierto para que tanto científicos como técnicos lo puedan usar, pretende ser una plataforma integradora que apoye la elección de decisiones con relación a la prevención y gestión integral de Incendios Forestales (IF) en Cataluña.

Palabras clave

Prevención incendios forestales, peligro de incendios forestales, simulación incendios forestales, servidor abierto, modelización de combustibles, modelización escenarios meteorológicos, base de datos georeferenciada.

1. Introducción

El uso de herramientas espaciales para la ayuda de toma de decisiones se está convirtiendo en una práctica común para reducir los impactos negativos de los incendios (Calkin, D. et al. 2011, Thompson, M. et al. 2013, González-Olabarría, J.R. et al. 2012, Ramirez J. et al. 2019). Los indicadores de peligro de incendio, el potencial de recuperación post-incendio del ecosistema, las opciones de gestión, y en especial, el comportamiento del fuego potencial son fuentes de información básicas a la hora de planificar medidas de prevención.

El uso de imágenes multiespectrales satelitales y datos LIDAR ha comportado un salto cualitativo a la hora de generar información espacial sobre la estructura de la vegetación (Riaño D., et al. 2007, Arellano-Pérez S., et al. 2018, Bottalico, F., et al. 2018, Riaño D., et al. 2003, Valbuena R., et al. 2016), características de las copas (Arellano-Pérez S., et al. 2018, Riaño D., et al. 2003, Riaño D., et al. 2004) y distribución de tipologías de combustible (Arellano-Pérez S., et al. 2018). La evaluación del peligro de incendio se ha beneficiado de estas herramientas, tanto para el apoyo de decisiones a nivel estratégico (Peterson D.L. & Littell J.S., 2012, Calking D.E., et al. 2014, Thompson M., et al. 2018) como táctico (Scott J.H., et al. 2013).

La simulación de IF permite la estimación del comportamiento del fuego en un escenario complejo (Albini F., 1976, Finney M., 2002), considerando diferentes inputs como: puntos de ignición, topografía, modelos de combustible, caracterización de copas, meteorología y humedades del combustible.

A pesar de que diversos estudios sobre caracterización y modelización de IF se han implementado en el sur de Europa (González J.R. & Pukkala T. 2007, González J.R., et al. 2006, Díaz-Delgado R., et al. 2004, Díaz-Delgado R. & Pons X. 2001, Castellnou M., et al. 2010, Badia-Perpinyà A., et al. 2006), investigaciones exhaustivas con un fuerte componente geoespacial que permitan definir modelos de combustible y comportamiento del fuego, con el objetivo de apoyar procesos de planificación del paisaje, aún no son comunes. Con este objetivo, se han desarrollado metodológicamente dos bases de datos diferentes: datos en relación a las características biofísicas medioambientales y datos de meteorología propicia a generar grandes incendios forestales (GIF).

2. Objetivos

A continuación, presentamos la metodología para generar toda la información necesaria para evaluar el peligro de IF y simulación del comportamiento del fuego, combinando múltiples bases de datos, des de variables biofísicas a funciones alométricas, registros meteorológicos, y reajustes en base a conocimiento experto. La base de datos generada se presenta como un servidor en evolución que se desarrollará aún más para explorar medidas preventivas a nivel regional.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio e introducción metodológica

Nuestro estudio se centró en Catalunya. En los últimos 33 años, se detectaron 21.686 IF quemando un total de 260.000 ha de bosque (SPIF, 2020). La gestión en relación al riesgo de IF es crucial a la hora de minimizar impactos (González-Olabarría, J.R. et al. 2005). Por lo tanto, es necesario disponer una base de datos escrupulosa y continua en el espacio, considerando los parámetros específicos que tienen una fuerte influencia en la modelización del comportamiento del fuego (Figura 1).

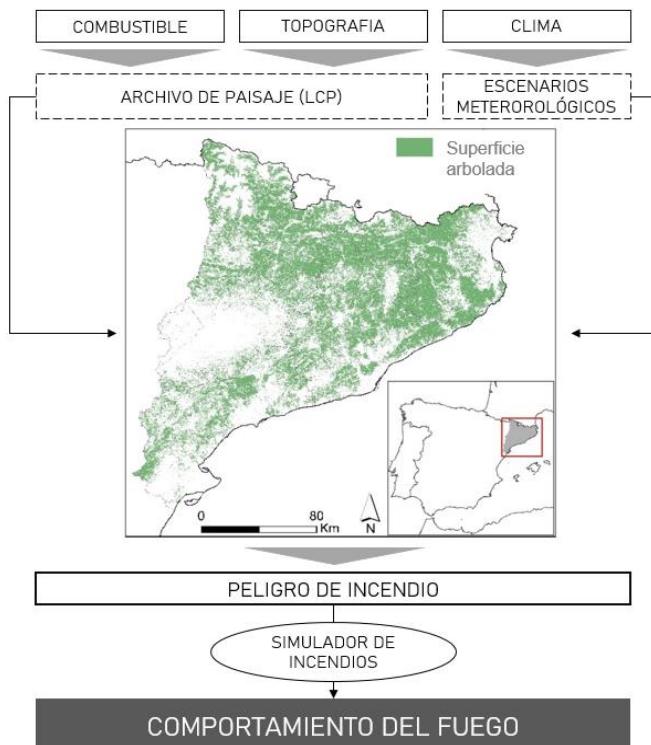


Figura 1. Diagrama esquemático del diseño conceptual del proyecto.

Las variables que forman el archivo de paisaje y los escenarios meteorológicos representan las bases de cada simulación; por este motivo, el objetivo inicial fue unir y organizar estos datos para que pudieran ser usados por los simuladores del comportamiento del fuego.

3.2 Evaluación del riesgo de incendio

3.2.1 Mapa de combustibles y generación del paisaje de simulación del fuego (LCP)

Definiendo un conjunto de variables georreferenciadas, tales como: elevación, pendiente, orientación, modelo de combustible, cobertura arbórea, altura arbolado, altura base de copas, y densidad de copas, es posible predecir el comportamiento del fuego una vez las condiciones meteorológicas sean fijadas. Todas estas variables georreferenciadas (Tabla 1) se recogen en el archivo de paisaje (LCP, Figura 1) y es un input básico en los simuladores más comunes del comportamiento del fuego (Finney M.A., 2006).

Tabla 1. Lista de las variables usadas para generar el archivo de paisaje (LCP).

Variable	Unidades	Procesamiento de los datos
Cobertura arbórea (Fcc)	%	Datos originales, sin procesar
Altura del arbolado (Hm)	m	Datos originales, sin procesar
Altura base copas (CBH)	m	Nueva parametrización
Densidad de copas (CBD)	kg/m ³	Nueva parametrización
Modelo de combustible (FM)	Categórico	Nueva parametrización
Elevaciones (MDE)	m	Datos originales, sin procesar
Pendiente (Pen)	%	Geoespacialmente transformado
Orientación (Ori)	°	Geoespacialmente transformado

Con el objetivo de definir los modelos de combustible y parámetros que influyen en el peligro de incendio en los bosques, nos basamos en un análisis de tipologías forestales. Para ello, se usó el Mapa de Formaciones Forestales Puras y Mixtas de Catalunya (MFFPMC, Vericat P., et al. 2010) para representar la superficie forestal arbolada; y el Mapa de Cubiertas del Suelo de Catalunya (MCSC, 48) para representar la superficie forestal no arbolada y la no forestal.

A parte de estos datos, para generar el LCP, se usaron otras cuatro bases de datos: Mapa de las Variables Biofísicas de Catalunya (MVBC, ICGC 2016), el 4º Inventario Forestal Nacional (4IFN, MAGRAMA 2017), Guía de Tipologías Forestales Arboladas (TFA, Piqué M., et al. 2011) y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE, ICGC 2020). El MVBC es una base de datos formada por 8 rasters generados con datos LIDAR que representan variables estructurales del arbolado. Dos de estas variables (Fcc y Hm) se incluyeron directamente en el LCP. Otras variables disponibles en el MVBC se usaron para parametrizar y calcular otras variables (CBH, CBD y FM) combinadas con otros datos. Las variables CBH y CBD fueron estimadas mediante el uso de alométricas generadas con datos del 4IFN. La definición de los modelos de combustible requirió también el uso de modelos de cobertura de sotobosque (Coll L. et al. 2011). Las parametrizaciones de estas variables se hicieron específicamente para cada especie arbórea según el MFFPMC. Finalmente, las elevaciones se incluyeron directamente en el LCP y las variables pendiente y orientación se obtuvieron con herramientas de proceso geoespacial. El proceso de trabajo y el modelo de parametrización completo se muestra en la Figura 2.

La CBH se define como la altura más baja de copas que contiene suficiente combustible para propagar el fuego a través de ella (Scott J.H. & Reinhardt E.D., 2001). Hemos calculado esta variable para cada especie arbórea usando la siguiente fórmula:

$$CBH = Hm - Hc$$

Dónde: H_m es la altura del arbolado calculada con LIDAR; H_c es la altura de inserción de copa media obtenida con modelos generados con los datos del 4IFN:

$$\text{Si } H_m > 5m \cdot H_c = \beta_0 + (\beta_1 \times H_m)$$

$$\text{Si } H_m < 5m \cdot H_c = \beta_1 \times H_m$$

Las variables β_0 y β_1 son constantes que dependen de las especies arbóreas (Krsnik G., et al. 2020).

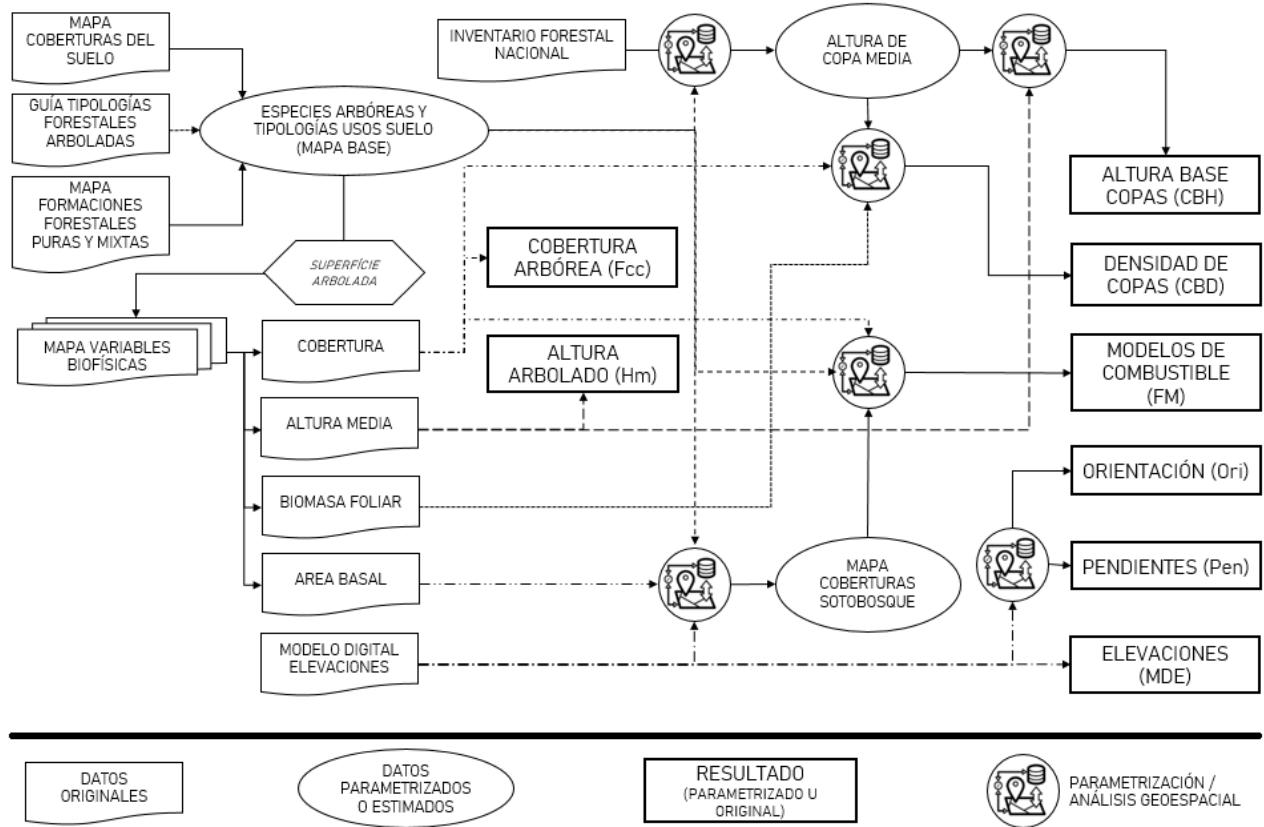


Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de generación del archivo de paisaje (LCP).

El CBD es la carga de combustible de copas disponible en cada unidad de volumen (V) de copas (Scott J.H. & Reinhardt E.D., 2001). Hemos considerado la carga de biomasa foliar (BF), proveniente de datos LIDAR, como el combustible de copas disponible. La fórmula usada ha sido:

$$CBD = \frac{BF}{V}$$

El volumen de copas se calculó a nivel de píxel. Se aplicó la variable de Fcc como factor reductor del volumen de copa. La fórmula del cálculo de volumen es la siguiente:

$$V_{\text{copas}} = Fcc \cdot V_{\text{píxel}} \leftarrow V_{\text{píxel}} = c^2 \cdot H_c$$

Dónde: H_c es la altura de copa ($H_c = H_m - CBH$); c es la resolución de píxel.

Los modelos de combustible son elementos descriptivos del combustible de superficie que tienen una influencia en el comportamiento del fuego según sus características intrínsecas. Los 13 modelos de Anderson H.E. (1982) son los modelos más conocidos y aplicados en la mayoría de simulaciones. Igualmente, acorde con los expertos del GRAF (Bombers de la Generalitat), se decidió usar los modelos de Scott J.H. & Burgan R.H. (2005), ya que estos son más detallados y representan mejor la complejidad real de nuestros ecosistemas.

La asignación del modelo de combustible se ha hecho para cada píxel con la creación de un algoritmo de decisión. Este algoritmo depende principalmente de: tipología cobertura suelo, especie arbórea, cobertura arbórea, cobertura del estrato arbustivo y precipitación estival. Los resultados fueron supervisados y ajustados por expertos del GRAF, de manera que la descripción del modelo de combustible (Scott J.H. & Burgan R.H., 2005) coincidiera con la experiencia del GRAF en relación a la representatividad del modelo de combustible y el comportamiento del fuego observado.

Para estimar la cobertura del estrato arbustivo necesaria para el algoritmo de decisión se usaron los modelos de Coll L. et al. (2011). Como no hay modelos para todas las especies arbóreas presentes en el MFFPMC se agruparon según la similitud entre especies.

En relación con las humedades de extinción de combustibles, Scott J.H. & Burgan R.H. (2005) diferencia dos tipologías de combustible: zonas secas, con déficit de agua en verano y zonas húmedas, sin déficit de agua. Para ello se decidió que las áreas con valores de precipitación media estival por debajo de 150 mm se consideran zonas secas y con valores superiores se consideran zonas húmedas.

Con el objetivo de facilitar la asignación de modelos de combustible, las diferentes tipologías de cobertura del suelo se organizaron en 5 grupos, acorde con las características de los combustibles. Una o más de una tipología de modelo de combustible se asignó para cada grupo (Tabla 2).

Tabla 2. Correspondencias entre la tipología de cobertura del suelo y los modelos de combustible de Scott & Burgan.

Tipología cobertura del suelo	Tipología modelo combustible (Scott y Burgan)
Bosque arbolado	Restos de arbolado por tratamientos o perturbaciones naturales (SB), Restos de arbolado como hojarasca y pies muertos (TL), Sotobosque (TU), Arbustivo (SH), Mixto Arbustivo-Herbáceo (GS), Herbáceo (GR)
Bosque en regeneración	Arbustivo (SH)
Matorrales	Arbustivo (SH), Mixto Arbustivo-Herbáceo (GS)
Praderas	Herbáceo (GR)
Artificial/No combustible	No combustible (NB)

El estrato arbolado se distribuyó en 11 grupos, según TFA, agrupando especies arbóreas según su representatividad espacial y similitud, y términos estructurales y ecológicos específicos. Para cada uno de los 11 grupos, se asignaron un conjunto de modelos de combustible dependiendo de la cobertura arbórea y cobertura del estrato arbustivo observada y estimada. Esta asignación de modelos de combustible buscaba la máxima similitud tanto en términos estructurales como de comportamiento del fuego potencial. Los expertos del GRAF participaron en la generación de estos algoritmos. En la Figura 3 se muestra un ejemplo aplicado para el *Pinus halepensis*, mientras que los otros algoritmos se muestran en los anejos de Krsnik G. et al. (2020).

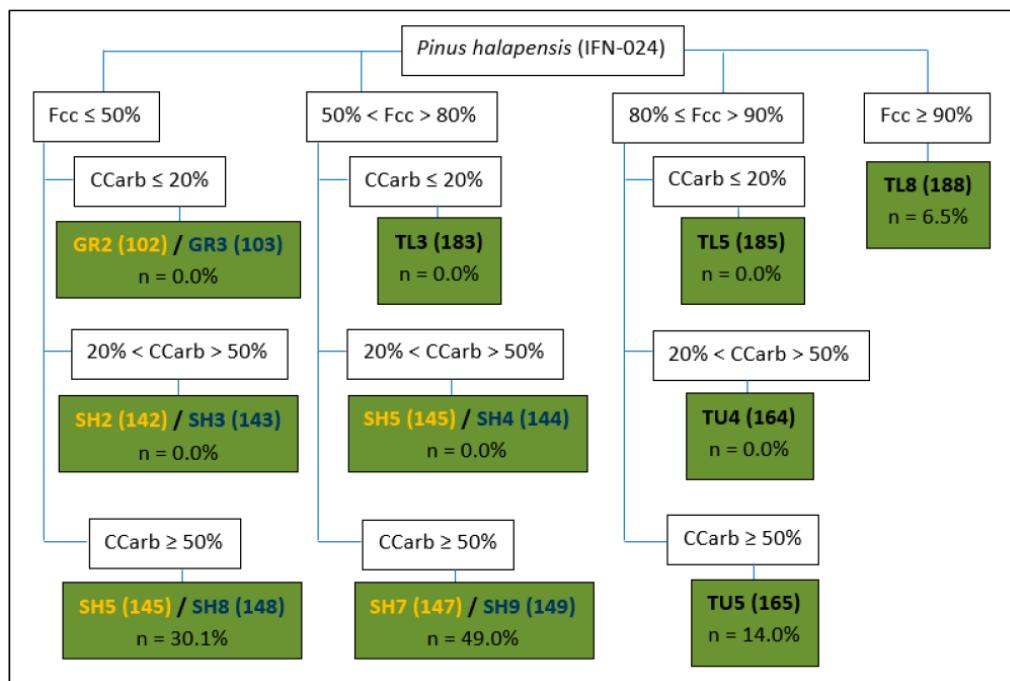


Figura 3. Algoritmo de decisión de modelos de combustible de Scott & Burgan para *Pinus halepensis*; Fcc = cobertura arbórea; CCarb = cobertura estrato arbustivo; letra amarilla = modelo asignado si el píxel se encuentra en una zona con déficit hídrico estival; letra azul = modelo asignado si el píxel se encuentra en una zona con superávit hídrico estival; letra negra = modelo asignado sin importar la disponibilidad hídrica estival; n = porcentaje de representatividad de los modelos en el área ocupada por esa especie en concreto.

3.2.2 Generación escenarios meteorológicos

Los escenarios meteorológicos se generaron usando una serie climática histórica de datos de 20 años (hasta el 2018) para la zona de estudio. Estos datos se sometieron a análisis estadísticos combinándolo con conocimiento experto del Servicio de Prevención de Incendios Forestales de Catalunya de la Generalitat de Catalunya y los GRAF. Las diferentes series climáticas se analizaron para las 15 regiones meteorológicas (Figura 4) que fueron definidas según características homogéneas sinópticas y las Zonas Homogéneas de Régimen (ZHR) de incendios. Las ZHR son regiones del territorio que presentan una homogeneidad en términos de orografía, vegetación, régimen de vientos, periodo de rotación y tipología de incendios (Castellnou M., et al. 2010, Piqué M., et al. 2010).

Dentro de los escenarios meteorológicos se puede elegir dos tipologías: (1) escenarios basados en las condiciones meteorológicas propicias para generar Grandes Incendios Forestales (GIF), según condiciones extremas observadas en la serie meteorológica y (2) escenarios de incendios forestales de referencia ocurridos en el pasado.

La metodología para la generación de los escenarios de condiciones propicias para generar GIF se basó en la combinación de percentiles de diferentes variables meteorológicas: Humedad Relativa (HR), Temperatura (T) y Velocidad del Viento (VV). Se hicieron 4 combinaciones de percentiles (p) para definir las horas de mayor riesgo: (1) p5 HR + p95 T; (2) p5 HR + p95 VV; (3) p10 HR + p90 T + p90 VV; (4) p10 HR + p99 VV. De las horas resultantes se eliminó los registros repetidos y luego se seleccionó solo aquellos días que presentaban una frecuencia mínima de 4 horas de riesgo. Finalmente, se identificó la situación sinóptica de cada día y se calculó la probabilidad de ocurrencia de esta.

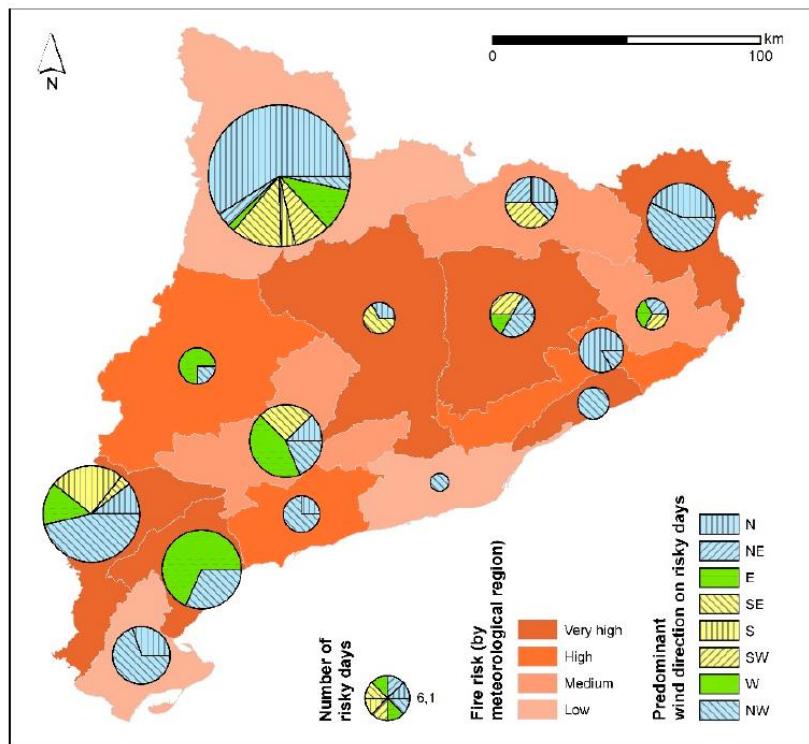


Figura 4. Regiones meteorológicas de Cataluña y situaciones sinópticas características, definidas por la frecuencia de las direcciones del viento dominantes durante los días de alto riesgo de incendio.

En las 15 regiones meteorológicas, los expertos del GRAF, seleccionaron un incendio de referencia, o incendio de relevancia que es representativo para las condiciones meteorológicas y de paisaje para cada ZHR, y los datos registrados durante ese incendio se seleccionaron como escenario meteorológico de referencia. Los incendios seleccionados son de los 20 años anteriores al 2018 debido a que no disponemos de datos meteorológicos previos tan detallados.

Estos escenarios se presentan en dos formatos: (1) estáticos y (2) dinámicos. El formato estático, que sirve para simular en condiciones meteorológicas constantes, es el resultante del promedio horario de las variables meteorológicas según su situación sinóptica diferenciando si está dentro de campaña de incendios o no. Los escenarios estáticos se usan en los simuladores del comportamiento potencial del fuego. El formato dinámico, que sirve para simular en condiciones meteorológicas cambiantes, son los registros horarios de los días de riesgo identificados. Los escenarios dinámicos se usan en los simuladores de propagación del incendio.

4. Resultados

4.1 Base de datos georeferenciada y mapas modelizados

Las variables estructurales del combustible (FM, Fcc, Hm, CBD, CBH) y los condicionantes topográficos (elevación, pendiente y orientación) fueron el primer resultado del proyecto (Figura 5). Estas variables están disponibles en formato ráster con una resolución de 20 m. Además, los escenarios meteorológico, contenidos en tablas están espacialmente asociados para cada región meteorológica.

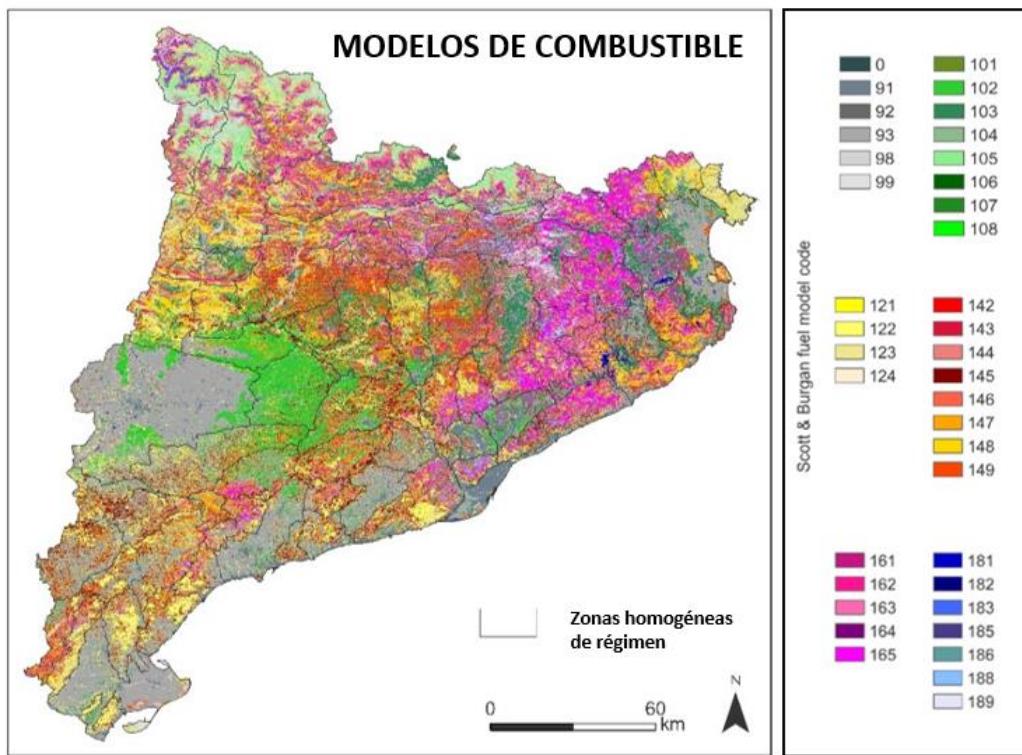


Figura 5. Mapa de modelos de combustible de Catalunya de Scott J.H. & Burgan R.H. (2005).

4.2 Servidor

Con el objetivo de ofrecer un acceso libre y gratuito a todos los usuarios potenciales, se generó un servidor abierto llamado PREVINCAT.cat (Figura 6). Este servidor contiene todas las variables necesarias para simular el comportamiento del fuego a escala regional. Además, el servidor ofrece: (1) Todas las variables del LCP (Tabla 1) por separado, y a la vez el archivo LCP ya generado que consiste en un archivo ráster multicapa que se usa como base para correr las simulaciones; (2) escenarios meteorológicos según la metodología de día de riesgo máximo para generar GIF y según el incendio de referencia, ambos en formato dinámico y estático; (3) Archivo de ajustes de los modelos de combustible, editable para el usuario, para mejorar los resultados obtenidos (Cardil A., et al. 2019); (4) Humedades de combustible según la metodología de Scott J.H. & Burgan R.H. (2005).

Toda la cartografía contenida en el servidor se puede descargar en formato ASCII en el sistema de coordenadas UTM 31N ETRS89. Los datos están espacialmente fragmentados según las diferentes ZHR. Esta forma de fragmentación de datos permite identificar las zonas más vulnerables des del punto de vista de la probabilidad de generar un determinado tipo de GIF, y sirve como base para identificar las zonas en qué son más importantes fijar la prevención de incendios forestales como objetivo preferente de la gestión (Piqué M., et al 2011).



Figura 6. Interfaz del servidor PREVINCAT con todos los datos disponibles distribuidos por las diferentes 77 ZHR.

5. Utilidad del servidor y desarrollo futuro

Los datos que se ofrecen en el servidor se pueden usar en diferentes campos o niveles de gestión forestal. Primero de todo, las variables topográficas y biofísicas se pueden usar directamente para analizar y evaluar el peligro de incendio potencial a escala regional.

Así mismo, los datos ofrecidos en el servidor PREVINCAT.cat se pueden usar directamente en diferentes herramientas de simulación del comportamiento del fuego (Figura 7). Estos simuladores aportan información completa del comportamiento potencial del fuego, tales como: la velocidad de propagación, la longitud o intensidad de llama. Dependiendo de las capacidades del software, se puede simular con datos meteorológicos cambiantes o constantes.

El hecho de que los datos estén organizados por ZHR permite correr simulaciones, diseñar incendios teóricos, crear condiciones extremas virtuales, o recrear incendios históricos a un nivel regional, teniendo en cuenta toda la variabilidad espacial de condiciones meteorológicas y mejorando así las predicciones.

Finalmente, tanto los datos generados como el servidor pretenden ser una fuente de información para los profesionales que trabajan en la prevención y extinción de incendios en Cataluña, con el objetivo de proveer las variables necesarias para la simulación de incendios forestales y dar apoyo a la toma de decisiones en la gestión de incendios y gestión forestal para la reducción del riesgo de incendio, a escala regional.

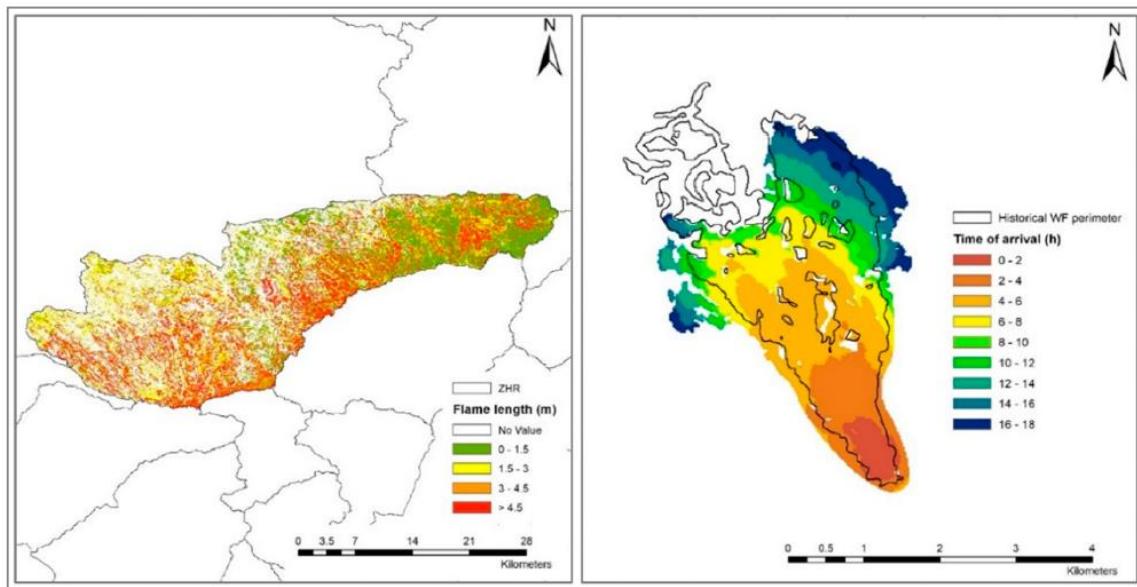


Figura 7. Ejemplos de los resultados del comportamiento del fuego simulado. (Izquierda: longitud de llama potencial con un simulador estático como FlamMap; Derecha: reconstrucción de un incendio histórico con la representación del tiempo de llegada del frente con un simulador dinámico como FARSITE) en dos regiones diferentes de Catalunya.

Además, el servidor y la información actualmente disponible es una parte de un proyecto más amplio, que incorpora dos módulos más (Figura 8). Los Módulos 1 y 2 corresponden a los que ya están disponibles en el servidor y se han expuesto en este artículo. Los módulos 3 y 4 están en desarrollo. El módulo 3 se focaliza en la localización de dónde los tratamientos deberían priorizarse acorde a diversos criterios de decisión. Para este propósito, se está generando información adicional (exposición, accesibilidad, etc.) que se cargará también el servidor. Estos nuevos criterios se están eligiendo mediante un proceso participativo dónde se fijan la influencia e importancia relativa de estos. Finalmente, la prioridad a escala regional se estimará mediante análisis de multi-criterio. Una vez las prioridades se hayan identificado, el Módulo 4 seleccionará las localizaciones, generalmente rodales forestales, y los tratamientos que reducirán mejor los niveles de prioridad, considerando las limitaciones económicas y de superficie a tratar. Este objetivo se logrará mediante métodos matemáticos de optimización.

Hay que destacar que este proyecto tiene un componente multidisciplinario importante, y no sólo debido a la necesidad de recopilación y gestión de múltiples fuentes de información diferentes. Los procesos de participación y la modelización experta juegan un papel vital en el proyecto, de manera que usuarios finales del servidor han participado activamente en su creación, definiendo el objetivo, y en la modelización des de un inicio.

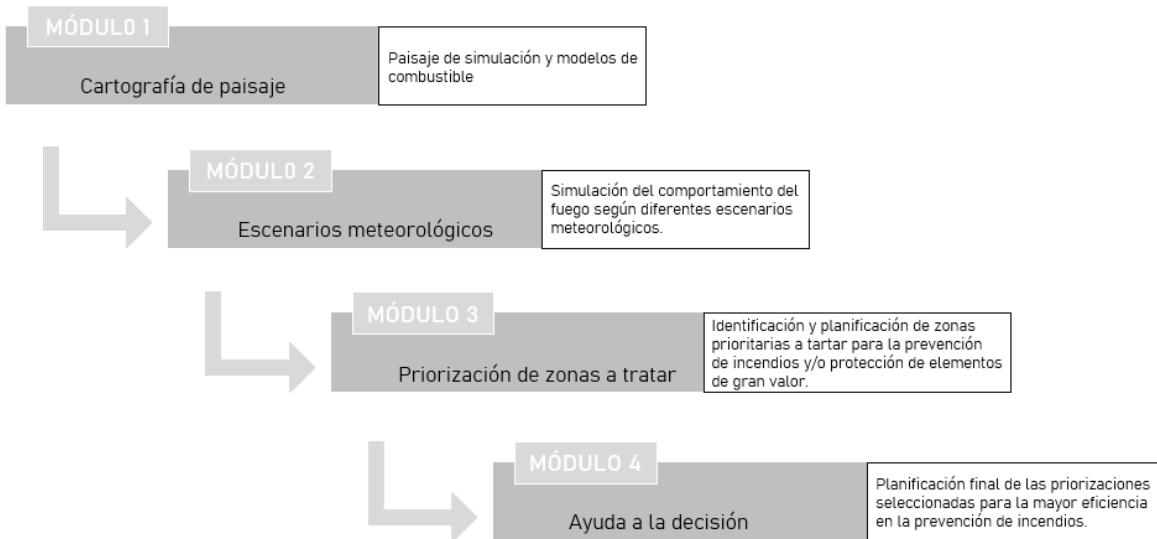


Figura 8. Organización teórica del servidor PREVINCAT.cat

6. Conclusiones

Este estudio presenta el proceso de modelización elaborado para definir las características del combustible y el comportamiento del fuego potencial en diferentes escenarios meteorológicos. Con el objetivo de centralizar todos los datos y modelos desarrollados, como también todas las variables necesarias para poder hacer simulaciones de incendios a escala de toda Cataluña, se desarrolló el servidor abierto y gratuito de PREVINCAT.cat. Ahora mismo ofrece dos productos: los archivos de paisaje y los escenarios meteorológicos. Estos datos están principalmente destinados para estimar el comportamiento del fuego con el uso de diferentes simuladores. El servidor está estructurado en módulos y los datos e información disponibles están organizados por Zonas Homogéneas de Régimen (ZHR), espacios del territorio con unas características homogéneas en cuanto a orografía, vegetación y tipología de incendios que suceden en la zona, que pueden ser una buena base geográfica para la planificación de instrumentos y políticas forestales en relación a la prevención y extinción de incendios. Los resultados que se presentan en este artículo forman parte de un proyecto más amplio en proceso de desarrollo.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Direcció General d'Ecosistemes Forestals y Gestió del Medi del Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural de la Generalitat de Catalunya. Agradecimientos especiales a los colaboradores y expertos que han participado en este proyecto: Asier Larrañaga y Marc Castellnou (UT-GRAF, Bombers de la Generalitat de Catalunya); Carlos San Román y Carles Furriol (Servei de Gestió Forestal, Generalitat de Catalunya), Esteve Canyameres y José A. Terés (Servei de Prevenció d'Incendis Forestals, Generalitat de Catalunya) y Irina Cristal (FBS).

8. Bibliografía

ALBINI, F.; 1976. Estimating Wildfire Behavior and Effects; General Technical Report INT-30; USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA, 92p.

ANDERSON, H.E.; 1982. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior; General Technical Report INT-122; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA, 22p.

ARELLANO-PÉREZ, S.; CASTEDO-DORADO, F.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; YANG, Z.; DÍAZ-VARELA, R.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.; VEGA, J.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.; 2018. Potential of Sentinel-2A Data to Model Surface and Canopy Fuel Characteristics in Relation to Crown Fire Hazard. *Remote Sens.*, 10, 1645.

BADIA-PERPINYÀ, A.; PALLARES-BARBERA, M.; 2006. Spatial distribution of ignitions in Mediterranean periurban and rural areas: The case of Catalonia. *Int. J. Wildland Fire*, 15, 187–196.

BOTTALICO, F.; CHIRICI, G.; GIANNINI, R.; MELE, S.; MURA, M.; PUXEDDU, M.; MCROBERTS, R.E.; VALBUENA, R.; TRAVAGLINI, D.; 2017. Modeling Mediterranean forest structure using airborne laser scanning data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 57, 145–153.

CALKIN, D.E.; COHEN, J.D.; FINNEY, M.A.; THOMPSON, M.P.; 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 746–751.

CALKIN, D.E.; THOMPSON, M.P.; FINNEY, M.A.; HYDE, K.D.; 2011. A real-time risk-assessment tool supporting wildland fire decision-making. *J. For.*, 109, 274–280.

CARDIL, A.; MONEDERO, S.; SILVA, C.A.; RAMIREZ, J.; 2019. Adjusting the rate of spread of fire simulations in real-time. *Ecol. Model.*, 395, 39–44.

CASTELLNOU, M.; PAGÉS, J.; LARRAÑAGA, A.; PIQUÉ, M.; 2010. Mapa de Risc D'incendi Tipus de Catalunya (Map of Wildfires in Catalonia Using Fire Types Concept); GRAF-Bombers; Ministry of Home Affairs, Generalitat of Catalonia and Forest Science and Technology Centre of Catalonia: Barcelona, Spain.

CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I APLICACIONS FORESTALS (CREAF); 2009. Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya v4 (Land Cover Map of Catalonia v4); Ministry of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food, Ministry of Home Affairs and Ministry of Territory and Sustainability, Generalitat of Catalonia: Barcelona, Spain.

COLL, L.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; MOLA-YUDEGO, B.; PUKKALA, T.; MESSIER, C.; 2011. Predicting understory maximum shrubs cover using altitude and overstory basal area in different Mediterranean forests. *Eur. J. Forest Res.*, 130, 55–65.

DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X.; 2004. Spatial patterns of fire occurrence in Catalonia, NE, Spain. *Landsc. Ecol.*, 19, 731–745.

DÍAZ-DELGADO, R.; PONS, X.; 2001. Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975–1995: Analysis of vegetation recovery after fire. *For. Ecol. Manag.*, 147, 67–74.

FINNEY, M.; 2002. Fire growth using minimum travel time methods. *Can. J. For. Res.*, 32, 1420–1424.

FINNEY, M.A.; 2006. An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. In *Fuels Management—How to Measure Success: Conference Proceedings*, Portland, OR, USA, 28–30 March 2006; Andrews, P.L., Butler, B.W., Eds.; *Proceedings RMRS-P-41*; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA, pp. 213–220.

GONZÁLEZ OLABARRÍA, J.R.; PUKKALA, T.; PALAHI, M.; 2005. Optimising the management of *Pinus sylvestris* L. Stand under risk of fire in Catalonia (north-east of Spain). *Ann. For. Sci.*, 62, 493–501.

GONZÁLEZ, J.R.; PALAHÍ, M.; TRASOBARES, A.; PUKKALA, T.; 2006. A probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Ann. For. Sci.*, 63, 169–176.

GONZÁLEZ, J.R.; PUKKALA, T.; 2007. Characterization of forest fires in Catalonia (north-east Spain). *Eur. J. For. Res.*, 126, 421–429.

GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MOLA-YUDEGO, B.; 2012. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *For. Ecol. Manag.*, 282, 149–156.

ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya); 2016. Mapa de Variables Biofísiques de L'arbrat de Catalunya (Map of Biophysical Variables of Wooded Forest Areas of Catalonia); Cartographic and Geological Institut of Catalonia, Ministry of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food and Ministry of Territory and Sustainability, Generalitat of Catalonia: Barcelona, Spain.

KRSNIK, G.; BUSQUETS, E.; PIQUÉ, M.; LARRAÑAGA, A.; CARDIL, A.; GARCÍA-GONZALO, J.; GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R.; 2020. Regional Level Data Server for Fire Hazard Evaluation and Fuel Treatments Planning. *Remot. Sens.*, 12, 1-17.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación); 2017. Cuarto Inventory Forestal Nacional (The Fourth National Forest Inventory); Ministry of Agriculture, Fisheries and Food: Madrid, Spain.

PETERSON, D.L.; LITTELL, J.S.; 2012. Appendix 2: Risk-Based Framework and Risk Case Studies. Risk Assessment for Wildfire in the Western United States. In *Effects of Climatic Variability and Change on Forest Ecosystems: A Comprehensive Science Synthesis for the U.S. Forest Sector*; Vose, J.M., Peterson, D.L., Patel-Weynand, T., Eds.; General Technical Report PNW-GTR-870; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Portland, OR, USA, pp. 249–252.

PIQUÉ, M.; VERICAT, P.; CERVERA, T.; BAIGES, T.; FARRIOL, R.; 2011. Tipologies Forestals Arbrades. In *Orientacions de Gestió Forestal Sostenible per a Catalunya (ORGEST)* (Typologies of Wooded Forest Areas. Orientacions of Sustainable Forest Management in Catalonia),

Ministry of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food, Generalitat of Catalonia: Barcelona, Spain.

RAMIREZ, J.; MONEDERO, S.; SILVA, C.A.; CARDIL, A.; 2019. Stochastic decision trigger modelling to assess the probability of wildland fire impact. *Sci. Total Environ.*, 694, 133505.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; CONDÉS, S.; GONZÁLEZ-MATESANZ, J.; USTIN, S.L., 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. *Remote Sens. Environ.*, 92, 345–352.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.L.; SALAS, J.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R.; RIBEIRO, L.M.; VIEGAS, D.X.; MORENO, J.M.; FERNÁNDEZ, H.; 2007. Estimation of shrub height for fuel-type mapping combining airborne LiDAR and simultaneous color infrared ortho imaging. *Int. J. Wildland Fire*, 16, 341–348.

RIAÑO, D.; MEIER, E.; ALLGÖWER, B.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.L.; 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sens. Environ.*, 86, 177–186.

SCOTT, J.H.; BURGAN, R.E.; 2005. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model; USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA.

SCOTT, J.H.; REINHARDT, E.D.; 2001. Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior; USDA Forest Service: Fort Collins, CO, USA.

SCOTT, J.H.; THOMPSON, M.P.; CALKIN, D.E.; 2013. Wildfire Risk Assessment Framework for Land and Resource Management; General Technical Report RMRS-GTR-315; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA.

SPIF (Servei de Prevenció d'Incendis Forestals); 2020. Nombre D'incendis i Superficie Cremada per Anys. Període: 1986–2019 (Number of Fires and Burned Area per Years. Period: 1986–2019) Forest Fires Prevention Service, Ministry of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food, Generalitat of Catalonia: Barcelona, Spain.

THOMPSON, M.; LAUER, C.; CALKIN, D.; RIECK, J.; STONESIFER, C.; HAND, M.; 2018. Wildfire Response Performance Measurement: Current and Future Directions. *Fire*, 1, 21.

THOMPSON, M.P.; CALKIN, D.E.; FINNEY, M.A.; GEBERT, K.M.; HAND, M.S.; 2013. A Risk-Based Approach to Wildland Fire Budgetary Planning. *For. Sci.*, 59, 63–77.

VALBUENA, R.; MALTAMO, M.; PACKALEN, P.; 2016. Classification of forest development stages from national low-density lidar datasets: A comparison of machine learning methods. *Revista Teledetección*, S.I., 15–25.

VERICAT, P.; PIQUÉ, M.; KOUA, O.; PLA, M.; 2010. Mapa de Formacions Forestals Pures i Mixtes de Catalunya a Partir del Mapa Forestal de España 1:50,000 Digitalitzat (Map of Pure and Mixed Forest Formations of Catalonia Based on the Digitalized Forest Map of Spain 1:50,000); Forest Science and Technology Centre of Catalonia (CTFC): Solsona, Spain.