



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-113

---

---

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Generación de un inventario forestal regional y una cartografía de modelos de combustible para Castilla- La Mancha

BLANCO MARTÍNEZ, J.<sup>1</sup>, RODRÍGUEZ PUERTA, F.<sup>2</sup>, MARTÍNEZ SÁNCHEZ-PALENCIA, S.<sup>3</sup>, MARTÍNEZ TORRES, A.A.<sup>3</sup>, ROLDÁN MARTÍNEZ, A.<sup>4</sup>, DIEZ VIZCAÍNO, F.J.<sup>1</sup>, LIZARRALDE TORRE, I.<sup>2</sup>, CABRERA BONET, M.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Tecnosylva, SL.

<sup>2</sup> föra forest technologies SLL

<sup>3</sup> Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Medio Rural. Dirección General de Política Forestal y Espacios Naturales

<sup>4</sup> Empresa Pública de Gestión Ambiental de Castilla-La Mancha – GEACAM.

<sup>5</sup> Aranzada Gestión Forestal, SLP

### Resumen

El empleo de los datos LiDAR generados en los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea y de las imágenes satelitales, además de los correspondientes datos de campo, ha permitido obtener, de forma paralela y sinérgica, un inventario forestal sobre los 11 estratos de vegetación arbolada de mayor representación en la Castilla-La Mancha. El resultado es una cartografía de las distintas variables dasométricas generada a partir de modelos estadísticos derivados de la métrica de la nube de puntos LiDAR. Su uso permite su aplicación a escala local a través del empleo de una herramienta de calibración, implementada vía web, basada en geoprocetos y análisis estadísticos que permite la entrada de datos dasométricos en la zona de estudio.

También se ha obtenido una cartografía de modelos de combustibles para toda la Comunidad Autónoma a través del empleo de diferentes imágenes satelitales (espaciales, radiométricas y temporales) realizándose un análisis orientado a objetos con métodos de clasificación basados en árboles de decisión apoyado con los productos obtenidos en la nube de puntos. Para su validación se ha empleado la modelización cartográfica del comportamiento previsible del fuego.

### Palabras clave

LiDAR, teledetección, análisis de imágenes orientado a objetos, análisis estadístico, calibración, geoproceto, modelización.

### 1. Introducción

La Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha tiene una superficie de 7,95 millones de hectáreas, de las que algo más de la mitad pueden ser categorizadas como monte. A pesar de esta importancia del territorio forestal, había dos carencias importantes en lo que a información forestal se refiere, y que se han tratado de paliar con los trabajos aquí expuestos. Por un lado, no se contaba con una cartografía detallada de modelos de combustible. Y por otro, desde el tercer inventario forestal nacional, no se tenían datos actualizados sobre existencias a nivel regional.

Por ello, se acometió el proyecto para la elaboración de un mapa de modelos de combustible y de un inventario forestal regional en Castilla-La Mancha licitado por la empresa pública GEACAM, adjudicado y desarrollado por las empresas Tecnosylva y föra en UTE desde agosto de 2015 a mayo de 2016, en un periodo de ejecución de 9 meses.

Con este trabajo, se pretendió dar una perspectiva diferente a ambos productos, de modo que formaran parte de un sistema de información forestal y aportasen criterios importantes en la toma de

decisiones de gestión de modo integrador y que permitiesen un análisis multicriterio en las labores de manejo forestal, tanto selvícola como de riesgo de incendios.

Para ello, se optó por el empleo de fuentes de percepción remota disponibles al público en general. Así, se emplearon tanto imágenes satelitales como datos derivados de LiDAR, ya que su adecuado procesado permite generar información útil para modelizar diferentes campos de interés forestal, como el cálculo de existencias (Hyypä et al., 2008, Naesset, 2002, 2004, Maltamo et al., 2005) o la clasificación de combustibles (Mutlu et al., 2008, Riaño et al., 2007).

Además, siguiendo con la filosofía de interés y divulgación pública, se partió de la premisa del desarrollo de una plataforma para compartir la información con todos los interesados en la información forestal generada.

## 2. Objetivos

Inicialmente, en este trabajo se plantearon tres objetivos básicos: (1) generar una cartografía de modelos de combustible para la comunidad autónoma, (2) obtener un inventario forestal regional y (3) desarrollar y poner en producción una aplicación informática para la divulgación de los datos.

Estos objetivos se matizaron en las primeras fases del proyecto para convertirse en: (1) Generar información de interés para un sistema de gestión del riesgo de incendios, basada en una cartografía de modelos de combustible de alta resolución; (2) obtener un inventario forestal regional que pueda ser empleado para la ordenación de montes; y (3) desarrollar y poner en producción una aplicación web, para la divulgación de los datos y el cálculo automático de datos de inventario válidos para la planificación forestal.

## 3. Metodología

Si bien puede parecer que este trabajo tiene dos líneas de trabajo totalmente independientes, el trabajo no se planteó de este modo, sino como se aprecia en el diagrama de flujo (Figura 1), existe una única línea sinérgica en las primeras fases y en la generación de resultados.

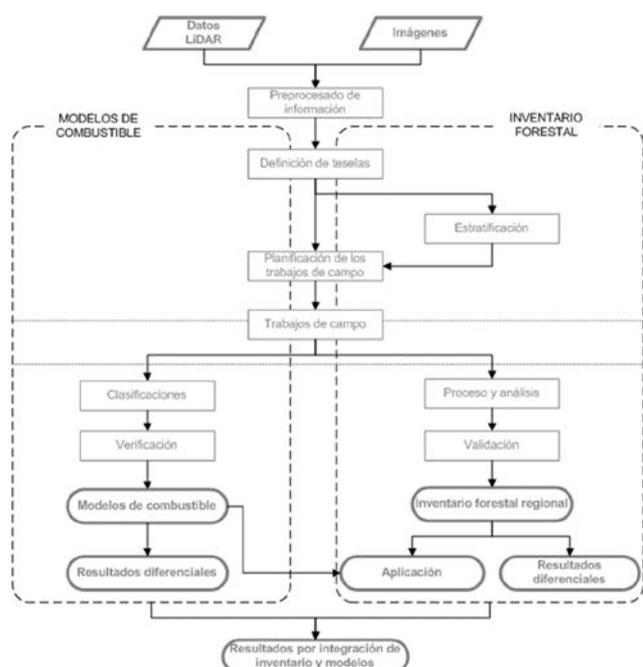


Figura 1. Diagrama de flujo de los trabajos

Este diagrama se expondrá agrupado como sigue:

- Materiales y datos
- Fases iniciales, que incluye: preprocesado de la información; definición de teselas; estratificación; planificación de los trabajos de campo; trabajos de campo
- Modelización de combustibles, que incluye: clasificaciones; verificación; generación de la cartografía de modelos; obtención de otros resultados
- Modelización para la generación del inventario forestal regional, que incluye: proceso y análisis estadístico; validación; creación del inventario forestal regional; obtención de otros resultados
- Generación de resultados comunes, que incluye: generación de resultados complementarios comunes; desarrollo y puesta en producción de la aplicación de consulta y descarga (GINFOR)

### **Materiales y datos**

Para facilitar el seguimiento de los trabajos, en cada una de las fases se irá detallando qué datos han sido utilizados en ella, así como algunos de los motivos de elección. Los principales materiales empleados son los siguientes:

#### *Escenas satelitales*

La utilización de imágenes de satélite en los procesos de análisis y caracterización de la cubierta forestal y en los estudios para la identificación de los diferentes modelos de combustible existentes en el terreno es de enorme importancia.

La amplia información espectral que ofrecen estos productos, se ve reforzada por una resolución espacial variable y fácilmente adaptable a cada una de las escalas de trabajo definidas como óptimas a la hora de llevar a cabo análisis, procedimientos y de obtener buenos resultados. Por esta variabilidad de resoluciones espaciales, información radiométrica o periodicidad temporal, se seleccionaron tres tipos diferentes de escenas satelitales procedentes de tres sensores diferentes: (1) imágenes de los sensores OLI y TIRS del Landsat-8, (2) imágenes MODIS y (3) imágenes SPOT

La elección de cada una de las escenas anteriormente vistas viene acompañada por razones técnicas de gran peso:

Las escenas SPOT 5 son elegidas por su buena resolución espectral (4 bandas) pero, especialmente, por su excelente resolución espacial (5 metros).

Las escenas Landsat 8, aunque no poseen una resolución espacial tan buena como las del SPOT 5 (30 metros), presentan una excelente información espectral lo que posibilita la generación de numerosos productos derivados (por ejemplo: índices de vegetación). Por esta razón, se han seleccionado escenas Landsat de 4 momentos fenológicos opuestos: primavera, verano, otoño e invierno.

En lo que se refiere a las escenas MODIS, estas no poseen ni la mejor resolución espacial (250 metros) ni la mejor resolución espectral (2 bandas). Sin embargo, es un producto con tres grandes ventajas: (1) Buena frecuencia temporal (8 días), (2) producto corregido atmosférica y terrestremente y (3) eliminación de nubes y otros obstáculos atmosféricos en todas las escenas disponibles. Estas tres características, pero en especial la tercera de ellas, garantiza el uso de todas las escenas disponibles en el periodo de análisis/estudio que se seleccione.

Las imágenes MOD09Q1 y las escenas L8 han sido adquiridas desde servicios de descarga públicos. Las imágenes SPOT han sido facilitadas por el Servicio de SIG y Cartografía de la Junta de

Castilla-La Mancha. Esta es la única fuente de datos que no puede adquirirse de forma libre y gratuita de las empleadas.

#### *Nube de puntos LiDAR*

Se ha empleado el vuelo LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) que en Castilla-La Mancha data de 2009. Los análisis en todos los casos se llevaron a cabo teniendo en cuenta esa distribución. Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, y posteriormente clasificadas de manera automática. Desde el punto de vista de la extensión, el vuelo LiDAR en la Comunidad está dividido en 20 lotes/bloque. Estos lotes/bloque agrupan hojas de la nube de puntos de 2x2 km (archivos .LAS). En total, se trabajó con 30.000 hojas de 2x2.

#### *Otras fuentes de información*

Además, se emplearon otros datos disponibles como el Mapa Forestal Español (MFE), Inventario Forestal Nacional (IFN), SIGPAC, Montes de Utilidad Pública, entre otros. De este modo, se cuenta con más fuentes de información que mejoren los resultados, y se potencia la trazabilidad y armonización entre este trabajo y otros previos

#### **Fases iniciales**

Dentro de las fases iniciales, se incluyen todas aquellas que se realizaron de manera común para las dos modelizaciones necesarias. De este modo, se logró eficiencia temporal y económica.

#### *Preprocesado de la información*

En lo que se refiere a datos satelitales, a excepción de las escenas MODIS, todos los productos satelitales seleccionados han sido preparados/procesados para su correcto uso en los futuros análisis a desarrollar. Desde el punto de vista atmosférico, todas las escenas venían correctamente corregidas con los valores de radiancia convertidos a reflectividad, razón por la que no ha sido necesario emplear la fórmula del método del objeto oscuro de Chávez (1996). Desde el punto de vista de la extensión, sin embargo, no todas las escenas abarcan la totalidad de la Comunidad de Castilla-La Mancha, por lo que para poder ser efectivos en las siguientes fases, se optó por realizar mosaicos. Una vez generados los mosaicos para cada una de las bandas, se unen todas ellas en un solo producto final (composite). Además, se calcula el NDVI para cada uno de los momentos fenológicos seleccionados (Figura 2).

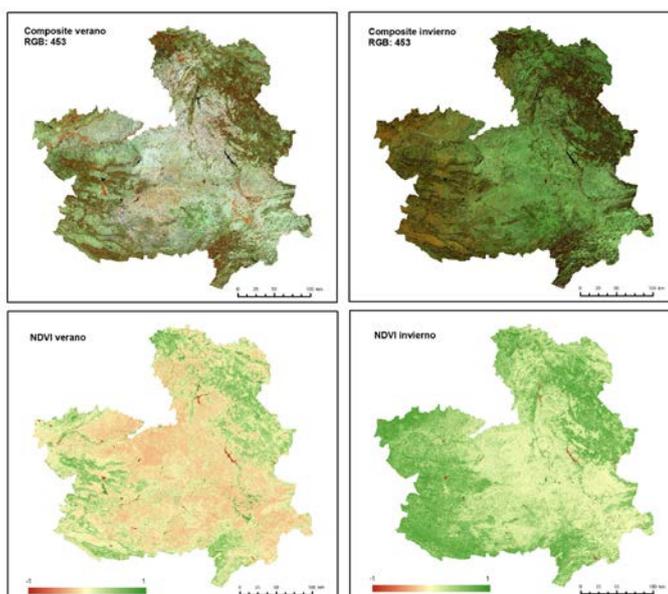


Figura 2. Composite (arriba) y NDVI (abajo) de Castilla-La Mancha en dos momentos fenológicos opuestos: verano (izquierda) e invierno (derecha), utilizando imágenes L8

Los procesos LiDAR implicaron el análisis de la nube de puntos para generar derivados de interés. Estos derivados son las variables independientes que se utilizaron en las modelizaciones tanto de combustibles como de inventario. En cada una de las hojas de 2x2km en formato .LAS se realizó el siguiente análisis de la nube de puntos (Figura 3):

- Modelos Digitales de Elevaciones con una resolución espacial de 5x5m
- Análisis de uniformidad de estadísticos de la nube de puntos
- Extracción de los estadísticos de la nube de puntos con una resolución espacial de celdas de 25x25m en donde finalmente se aplicarán los modelos de inventario
- Frecuencia relativa de puntos a diferentes alturas, para evaluar la continuidad vertical

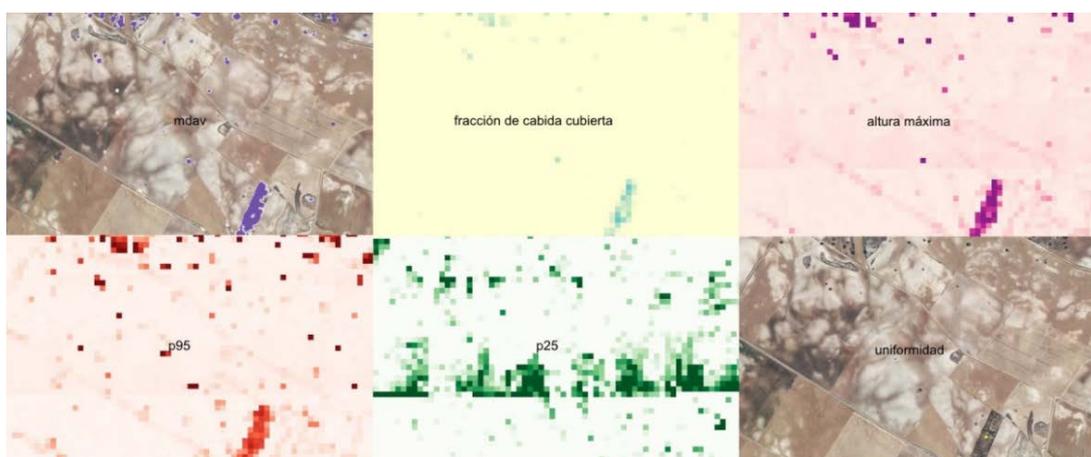


Figura 3. Preprocesado de la información de la hoja PNOA-L4-2009-CLM-25CM-VLC-LAS-CLA-540-4394\_Ho

Debido a la gran cantidad de información, se han utilizado tres equipos de última generación, dedicados 24 horas al día, durante un tiempo aproximado de 7-10 días. Posteriormente fue necesario realizar mosaicos de las hojas de 2x2km para toda la extensión lo que requirió también del uso intenso de recursos de hardware.

### *Definición de teselas*

Entendiendo tesela como la unidad mínima de trabajo, es necesario realizar una división del territorio en estas unidades. Para ello, se realizó un análisis de imágenes orientado a objetos, técnica empleada para analizar imágenes satelitales basada en la información de un conjunto de píxeles similares llamados objetos. Los objetos de la imagen son los grupos de píxeles que son similares entre sí y están basados en el color, la forma, la textura, y la ubicación de estos en relación con otros objetos no clasificados o clasificados (Blaschke, 2010). Para definir esta segmentación en teselas de la comunidad de Castilla-La Mancha, mediante el uso del software eCognition, se seleccionaron las imágenes Landsat 8 y SPOT.

### *Estratificación*

La estratificación es una fase específica para el inventario forestal, ya que el resultado principal de un inventario basado en datos LiDAR es la cartografía de detalle de cada una de las variables objetivo a nivel de estrato. El estrato, en definitiva, es la unidad de inventario LiDAR, ya que el diseño del muestreo se define a nivel de estrato, así como las ecuaciones generadas. En este caso, el estrato viene definido por la especie principal.

Con el objetivo de adaptar o armonizar los estratos a lo propuesto en el MFE vigente, se analizó su Diccionario de datos y se consideró adecuada la agrupación de Formación Arbolada recogida.

### *Planificación de los trabajos de campo*

El diseño de los trabajos de campo buscaba que estos trabajos lograsen una caracterización dasométrica de los diferentes sistemas forestales y una tipificación de los modelos de combustible existentes para lograr una categorización-clasificación adecuada de los mismos en base a diversas metodologías tanto de inventario como de combustibles forestales. Para lograr dicho fin se hacía necesario llevar a cabo dos inventarios, de forma paralela, en este proceso de caracterización forestal, realizando tanto un inventario de modelos de combustible como un inventario dasométrico.

En los trabajos de modelos de combustible se evaluaron tanto los modelos de Scott & Burgan (2005) como de Rothermel (1972). La toma de datos planteada recoge tanto la tipificación de los modelos de combustible como su caracterización para describir la continuidad vertical y horizontal, así como las especies presentes. Además, se planteó la toma de imágenes fotográficas georreferenciadas.

Para garantizar que la muestra seleccionada recogía las diferentes tipologías de modelos, se realizó una clusterización de todas las teselas generadas en base a los valores espectrales de las imágenes de partida. Posteriormente, para los clústeres forestales, se seleccionaron entre 15 y 60 teselas (en función del número de elementos del clúster).

En los de inventario dasométrico, en una primera fase se plantearon 60 parcelas por estrato (salvo en el estrato 11, de menor entidad, donde se plantearon 50). Se dejó una reserva de otras 50 parcelas para reforzar algunos estratos tras un primer ajuste de los modelos estadísticos. Para la ubicación de las parcelas se debía garantizar que se recogía toda la variabilidad del estrato, en un doble sentido: (1) de todos los estadios de desarrollo y (2) de la distribución territorial del estrato en la comunidad.

Las mediciones realizadas incluyeron todos los diámetros normales y las alturas de los cinco árboles dominantes y de los dos más cercanos al centro. La dimensión de la parcela elegida fue

circular de 14,1 m de radio, para que su superficie fuera la misma que la de los píxeles finales de la cartografía generada (de 25x25 m).

### *Trabajos de campo*

Durante los trabajos de campo, se realizaron las mediciones de las parcelas diseñadas tal cual se ha comentado anteriormente. Estas parcelas, tanto de modelos de combustible como de inventario dasométrico, se denominaron parcelas destino. Pero los equipos de campo, en los desplazamientos hacia parcelas, fueron seleccionando otros hitos. A estas parcelas se les denominó transecto y se realizó la identificación de modelos de combustible y un inventario relascópico. El objeto del primero es aumentar los elementos de partida para clasificar toda la comunidad, y del segundo, contar con una muestra de contraste para verificar la bondad de los modelos dasométricos obtenidos. Así, en total se levantaron 1741 parcelas.

Durante los trabajos de campo, desde gabinete se realizó un seguimiento intensivo para garantizar que lo medido realmente se adecuaba con lo previsto, con el fin de lograr una muestra que realmente fuese representativa de toda la población. Así, en los casos necesarios, se realizó un rediseño para compensar las posibles desviaciones.

### **Modelización de combustibles**

La modelización de combustibles se realizó usando como variables independientes básicamente los datos espectrales y los derivados de la nube de puntos LiDAR, con el objetivo de predecir las dependientes (los modelos de combustible según las familias anteriormente indicadas).

### *Clasificaciones*

El proceso de clasificación se llevó a cabo mediante el método basado en árboles de decisión o modelo de clasificación ID3. Dados los resultados de las pruebas, es el método que mejores resultados arrojó.

Las clasificaciones se ensayaron con la muestra tomada en campo, para las que se contaba con los pares de valores de variables independientes y dependientes. Una vez seleccionadas las mejores clasificaciones, se podían predecir los modelos de combustible en función de los valores de las variables espectrales y LiDAR que tuviera cada tesela del territorio.

El proceso de clasificación en árbol se llevó a cabo mediante el software de tratamiento estadístico SPSS. Esta tecnología permite la asignación de modelos de combustible a las teselas procedentes de la segmentación previa del territorio castellano-manchego. Se trata de un método recurrente de partición que va construyendo árboles dicotómicos en función del valor de una variable en cada nodo. El árbol va creciendo hasta que ha maximizado la homogeneidad en un nodo, que se convierte en terminal del que nacen dos hojas (la identificación de dos modelos).

Los clasificadores de árbol pueden predecir variables cualitativas (como es el caso de los modelos de combustible) basándose en reglas de decisión a partir de las variables de entrada (bandas y otra información temática empleada), que pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas. Estos clasificadores han sido ampliamente empleados en teledetección aplicada a ecología forestal. Se componen de ramas que representan los atributos o variables, y las hojas, que representan la decisión final. En este caso, el modelo seleccionado.

El árbol comienza en el tronco y sigue por las diferentes ramas hasta alcanzar una hoja. Esto permite una trazabilidad de la clasificación, donde la labor del técnico puede ser muy intensa e interactiva.

Se realizó una validación cruzada como elemento de diagnóstico de la bondad de las clasificaciones.

#### *Verificación*

Una vez generada la cartografía, se verificó la idoneidad de la modelización del comportamiento del fuego con incendios reales acaecidos. Para ello, se empleó el simulador corporativo que emplea la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Wildfire Analyst (WFA) (2011).

#### *Generación de cartografía de modelos*

Con esto, se realizó la producción cartográfica definitiva tanto en formato vectorial como ráster. Para ello, se realizó una actualización de la cartografía con los incendios ocurridos desde la fecha de referencia de la imagen SPOT, verano de 2014. Para ello, se realizó un análisis de severidad de todos los incendios, y se aplicó un modelo de afectación en función del nivel de severidad y del modelo de combustible previo al incendio.

### **Modelización para la generación del inventario forestal regional**

La modelización para la realización del inventario forestal regional de Castilla-La Mancha (IRCLM) buscaba predecir cuantitativamente, a partir de la métrica derivada de la nube de puntos LiDAR (variables independientes), las variables dasométricas de un inventario forestal. En este trabajo se emplearon los dos principales tipos de inventario basados en LiDAR: métodos de masa y métodos de árbol individual.

Los métodos de masa utilizan la nube de puntos compartimentada por una cuadrícula (en este caso de 25 m). En estos casos, la ubicación horizontal de cada individuo no es relevante y lo que se estudia es la estructura vertical del conjunto de la nube de puntos. Las variables forestales se obtienen para cada celda de la cuadrícula por regresión de sus valores en parcelas de campo con los valores de la métrica de la nube de puntos. Estos métodos se emplearon en las masas densas de la comunidad.

En los métodos de árbol individual, empleados para la superficie adhesionada de la Comunidad Autónoma, a partir de la información LiDAR sobre cada árbol, se obtiene su altura y se estima el resto de sus características dendrométricas. Hay que tener en cuenta que la individualización requiere la localización y delineación de la copa de cada árbol, independientemente de su forma y estado.

#### *Proceso y análisis estadístico*

El proceso de datos para el inventario basado en LiDAR siguió el siguiente esquema (Figura 4)



Figura 4. Esquema de trabajo LIDAR para el proceso de datos en inventario forestal

Así, en primer lugar, deben prepararse los datos base para ser empleados. Por un lado, la nube de puntos debe procesarse para generar su métrica, como se ha comentado. Por otro, a partir de las mediciones de campo, deben calcularse las variables dasométricas a predecir. Para ello, se realizaron los procesos de datos habituales y se emplearon las fórmulas del IFN (para cubicación) y de Ruiz-Peinado et al. (2011) para biomasa. Para poder aplicar estas tarifas, se ajustaron modelos dendrométricos para predecir variables necesarias (el más relevante, regresiones altura-diámetro).

Se ajustaron modelos lineales, polinomiales y exponenciales, empleando métodos Stepwise para la selección de las variables independientes significativas. De los modelos ajustados, debía realizarse una diagnosis y validación de los mismos. Para ello, hay diversos métodos que se basan en los estadísticos para evaluar la bondad de ajuste (Schlaegel, 1982; Parresol, 1999; Tedeschi, 2006).

Se realizó un ajuste preliminar que sirvió para decidir cómo repartir las 50 parcelas que se habían dejado de reserva, que se emplearon en reforzar los estratos de especies de género *Pinus* sp. Con esto, se volvieron a realizar y diagnosticar los ajustes que resultaron finales. Una vez seleccionados los modelos, se entra en un proceso de producción cartográfica que incluye la eliminación de valores fuera de rango de las variables dependientes, la aplicación de los diferentes modelos para cada estrato y la generación de mosaicos para toda la Comunidad Autónoma.

#### Validación

De manera independiente al equipo que había realizado los ajustes, se compararon los resultados obtenidos en el IRCLM con ordenaciones recientes en poder de la administración regional.

#### Creación del inventario forestal regional

Se generó el sistema de información geográfico final con los datos validados.

#### Generación de resultados comunes

Uno de los objetivos del proyecto era la divulgación pública de sus resultados. Para ello, se desarrolló la herramienta GINFOR (Gestión de la Información Forestal de Castilla La Mancha). No podrá detallarse aquí GINFOR, sino que únicamente se referirá a su manual, donde se expone la interpretación de los datos reportados por el sistema, y el aporte de la información que se requiere por parte del técnico/usuario.

Para ello, se desarrolló una aplicación web con la siguiente arquitectura: MSSQL Server 2012, IIS 7 y ArcGIS Server 10.2. Para el desarrollo se utiliza ASP.NET y para los procesos de ArcGIS se utiliza Python y R.

#### 4. Resultados

Se exponen a continuación algunos de los principales resultados. En el apartado anterior se han enumerado todos los productos generados, pero por el gran alcance del proyecto, se describen aquí únicamente los resultados más relevantes.

##### Fases iniciales

Con estos procesos se generaron 3.438.179 teselas en Castilla-La Mancha, con un nivel de detalle que se entendió el adecuado para el objetivo del trabajo (Figura 5). Para cada una de estas teselas, se asignaron todas las variables derivadas de las fuentes de información necesarias para realizar las modelizaciones:

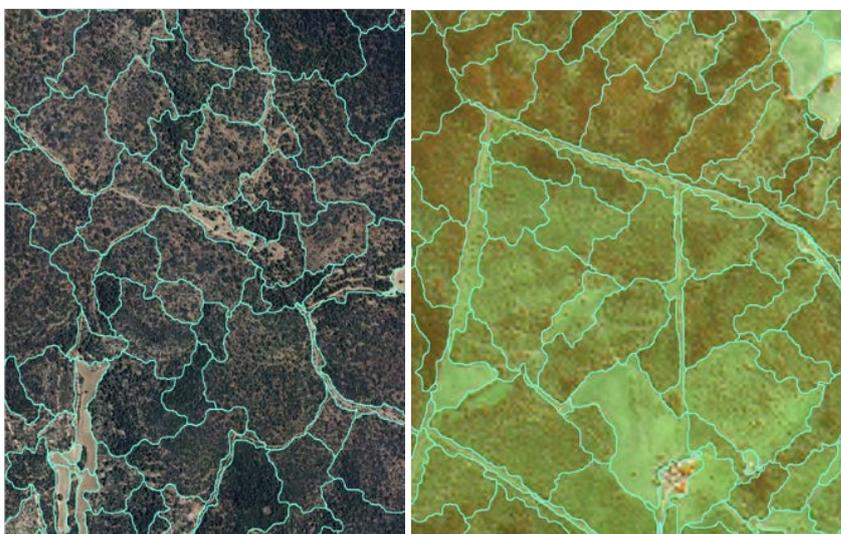


Figura 5. Detalle de la segmentación en base a la imagen del PNOA (izquierda) y a la escena SPOT (derecha)

##### Modelización de combustibles

El desarrollo de este proceso se llevó a cabo siguiendo una estructura de fases que permitieran una mejora progresiva en la certidumbre y precisión a la hora de caracterizar cada una de las teselas en las que el territorio castellano-manchego había sido previamente segmentado. En este sentido, el sistema de clasificación de modelos de combustible desarrollado por Scott & Burgan es idóneo para establecer una base inicial para la clasificación y discriminación de las entidades forestales. Se trata de un sistema de clasificación de carácter modular y progresivo que favorece una clasificación “top down” en niveles de precisión, garantizando un avance desde un nivel de certidumbre elevado, consiguiendo paulatinamente índices de precisión superiores en la clasificación, sin comprometer en ningún momento los niveles de certidumbre alcanzados.

Así, finalmente no hay una clasificación única, sino un abanico de clasificaciones que conforman la cartografía final en las dos familias de combustibles predichas. Todo este conjunto de clasificaciones siempre cumplió con unos criterios de bondad estadística con un nivel de riesgo menor al 20%. Se muestra a continuación un ejemplo de matriz de confusión (Figura 6):

**Clasificación**

Observado	Pronosticado											Porcentaje correcto
	GR1	GR2	GS1	GS2	NB1	NB8	NB9	SH1	SH4	SH_Alto	Tx	
GR1	49	5	2	3	0	0	0	1	0	0	0	81,7%
GR2	0	17	1	0	0	1	0	2	0	0	0	81,0%
GS1	3	0	18	3	0	0	0	5	1	0	0	60,0%
GS2	0	1	1	29	0	2	1	1	0	0	0	82,9%
NB1	1	0	0	0	105	0	4	0	0	0	0	95,5%
NB8	3	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	93,8%
NB9	1	0	0	0	0	0	157	0	0	0	0	99,4%
SH1	2	1	0	3	0	1	0	44	1	0	0	84,6%
SH4	0	0	1	2	0	0	0	3	26	3	0	74,3%
SH_Alto	0	0	1	1	0	0	0	6	4	29	5	63,0%
Tx	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2	278	98,2%
Porcentaje global	6,7%	2,7%	2,7%	4,8%	12,0%	5,6%	18,5%	7,3%	3,6%	3,9%	32,2%	90,8%

Método de crecimiento: CRT  
Variable dependiente: Todos\_Tx\_SHalto

Figura 6. Ejemplo de matriz de confusión

La cartografía generada con las clasificaciones y actualizaciones indicadas en el apartado de metodología se creó en formatos vectorial y ráster. Además, se generó para ser integrada en el escenario empleado en el simulador corporativo del comportamiento del fuego WFA.

Entre otros resultados que se generaron es necesario destacar un análisis del dinamismo fenológico. Una forma fácil y precisa de estudiar esta dinámica vegetal la encontramos en el manejo de diferentes índices de vegetación. Mucho se ha escrito a este respecto en la literatura científica y, de la gran variedad de índices vegetales disponibles, solamente unos pocos permiten estudiar este dinamismo con detalle, entre los que destaca el NDVI, que ha sido el usado, tanto por su difusión y conocimiento como por su cálculo factible con la información de base. Para el cálculo del NDVI se requiere del uso de información espectral, en la región del rojo y del NIR, derivada de las fuentes satelitales disponibles. En esta línea, el sensor MODIS fue la fuente de datos satelitales seleccionada. Si bien este sensor ofrece diferentes productos con información espectral-temporal variada, para el desarrollo de los cálculos de dinamismo se eligió, por su amplia resolución temporal y su buena resolución espectral, el producto MOD09Q1, pues ofrece información espectral de las bandas 1 ( $\rho R$ ) y 2 ( $\rho NIR$ ) a una resolución espacial de 250 metros cada 8 días. El tiempo de análisis de la información en este tipo de estudios influye en la calidad de los resultados alcanzados. Por este motivo, se decidió analizar todas las escenas MODIS MOD09Q1 disponibles desde el año 2000 hasta la fecha actual, 736 escenas, lo que supone una gran fuente de información histórica durante 15 años sobre el comportamiento diario, mensual y anual de la dinámica fenológica. Además, Castilla-La Mancha no está recogida en una sola escena, sino que requiere de dos, por lo que el análisis final fue de dos veces 736 escenas.

Se generaron unos análisis para zonas homogéneas de los grupos de combustibles. Estos análisis cuentan con diferentes hipótesis de criticidad representadas por el análisis de percentiles. Así, cada 8 días (resolución temporal de la fuente de datos), puede evaluarse la situación real. Se muestra un ejemplo para el grupo de combustibles de los pastos (Figura 7):

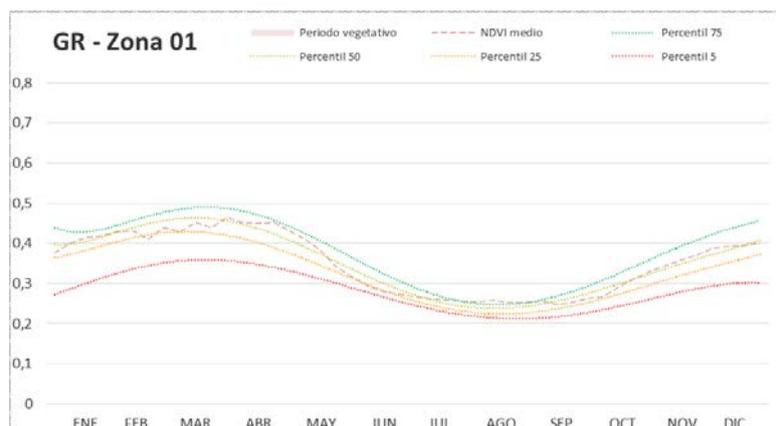


Figura 7. Ejemplo de análisis del dinamismo de modelos de combustible

Otro producto generado fue la actualización del mapa de riesgo de Castilla-La Mancha (JCCM, 2015). Para ello, se empleó la metodología del mapa previo, pero con los datos actualizados.

Por otro lado, mediante modelos y script de cálculo geomorfométrico empleando ArcGIS, se identificaron potenciales elementos críticos para la propagación del fuego. Esto se agrupa en el neologismo pirogeomorfometría. Mediante estos procesos, se identificaron potenciales nudos y líneas de barranco, nodos y líneas de cresta, collados, picos, cuencas, etc.

Por último, se identificaron los lugares prioritarios por riesgo. Para ello, se empleó la metodología de Campbell que relaciona pendiente, exposición y dirección del viento y mediante una simulación de todo el territorio autonómico con WFA, se seleccionaron los lugares con mayores alineaciones. Estos lugares se ponderaron con el número de elementos críticos (obtenidos en los procesos de pirogeomorfometría) seleccionando definitivamente estas zonas de actuación prioritaria por riesgo de incendios.

### Modelización para la generación del inventario forestal regional

Los resultados del inventario forestal regional se generaron para los 11 estratos más importantes de Castilla-La Mancha, definidos en la estratificación (Tabla 1).

Tabla 1. Estratos del inventario forestal

ESTRATO	ALBACETE (ha)	CIUDAD REAL (ha)	CUENCA (ha)	GUADALAJARA (ha)	TOLEDO (ha)	CLM (ha)	DESCRIPCION
<b>Estrato 1</b>	23626.9	0.0	172626.0	43935.6	56.9	<b>240245.4</b>	<i>Pinus nigra</i> monoespecífico
<b>Estrato 2</b>	9352.2	0.0	59580.9	19414.7	0.0	<b>88347.8</b>	<i>Pinus nigra</i> mezclado
<b>Estrato 3</b>	35173.3	44415.7	48564.8	42681.1	21048.9	<b>191883.8</b>	<i>Pinus pinaster</i> monoespecífico
<b>Estrato 4</b>	11908.8	4046.3	17776.0	8146.1	3812.8	<b>45689.9</b>	<i>Pinus pinaster</i> mezclado
<b>Estrato 5</b>	0.0	0.0	48928.8	57993.7	81.9	<b>107004.4</b>	<i>Pinus sylvestris</i> monoespecífico y mezclado
<b>Estrato 6</b>	202661.0	1949.6	91231.3	17836.7	8120.3	<b>321798.9</b>	<i>Pinus halepensis</i> monoespecífico
<b>Estrato 7</b>	18046.5	338.1	21242.6	5964.8	183.1	<b>45775.1</b>	<i>Pinus halepensis</i> mezclado
<b>Estrato 8</b>	105544.0	440930.0	105070.0	113477.0	243914.0	<b>1008935.0</b>	<i>Quercus ilex</i> monoespecífico
<b>Estrato 9</b>	0.0	9244.0	99.2	20989.1	19344.6	<b>49676.9</b>	<i>Quercus pyrenaica</i> monoespecífico
<b>Estrato 10</b>	27313.1	125496.0	54045.8	116868.0	71409.5	<b>395132.4</b>	Mezcla de <i>Quercus</i>
<b>Estrato 11</b>	13713.2	49706.7	24330.0	524.9	16033.2	<b>104308.0</b>	<i>Pinus pinea</i> monoespecífico y mezclado
<b>TOTAL</b>	<b>447339.0</b>	<b>676126.4</b>	<b>643495.4</b>	<b>447831.6</b>	<b>384005.2</b>	<b>2598797.6</b>	

Tras realizar el procesado continuo de métodos de selección, en el que se analizaban todas las variables LiDAR, diversas formulaciones y una diagnosis continua de la bondad del ajuste, el sesgo, la precisión y otros aspectos como la normalidad de los residuos o la homocedasticidad, se obtuvieron los modelos finales. En el presente documento no puede realizarse un profundo análisis de la bondad y de los resultados. Se puede resumir en que los modelos ajustados tuvieron una diagnosis que denota modelos robustos, con buenos parámetros de ajuste, insesgados y parsimoniosos. En la inmensa mayoría de los estratos, las variables dependientes fueron ajustadas mediante formulaciones potenciales y exponenciales, que han mostrado ser las más robustas para la estimación de variables dasométricas a través de datos LiDAR.

Respecto a las variables independientes, la fracción de cuba cubierta de LiDAR (LFCC) forma parte de todas las ecuaciones, denotando la fortaleza de la variable y el enorme sentido biológico que aporta a las ecuaciones. Además, en las distintas variables independientes, se engloban otras variables clásicas como percentiles bajos y altos, que también aportan un fuerte sentido biológico (relacionado con la altura dominante o la altura de inserción de la primera rama, entre otros) junto con otras variables como el rango entre inter-cuartiles de los pulsos o parámetros relacionados con los momentos LiDAR, entre otros. Estas variables, aunque de menor sentido biológico, aportaban la necesaria robustez estadística a los modelos y permitían ajustar modelos parsimoniosos, en los que rara vez se necesitaron más de tres variables independientes para estimar cada una de las variables dependientes.

Además, entre las variables calculadas, se obtuvo el índice de espaciamiento de Hart-Becking. Con esto y valores de referencia para cada especie, se identificaron zonas donde la prioridad de actuación puede ser elevada por competencia.

### **Generación de resultados comunes**

#### *Generación de resultados complementarios comunes*

Tanto desde una perspectiva de riesgo de incendios como desde la de competencia selvícola, ya se ha comentado que se generaron zonas de actuación prioritaria. Ambos análisis se integraron para obtener localizaciones que cumplan uno, otro o ambos criterios.

Por otro lado, a partir de la nube de puntos LiDAR, se generó un modelo digital de terreno a 2,5 m de tamaño de pixel.

#### *Desarrollo y puesta en producción de la aplicación de consulta y descarga (GINFOR)*

Como resultado común destaca la herramienta GINFOR. Se trata de una herramienta web que permite el recorte de la información para un área de interés por el usuario y que puede calibrar automáticamente los resultados de inventario para que sean aplicables en un ámbito local.

La página de acceso es <http://visores.castillalamancha.es/ginfor>.

Tras un formulario, se accede a la aplicación donde se encuentra un manual de uso.

Dentro de esta aplicación, el aspecto más singular implicó que los resultados de inventario fueran válidos para la ordenación forestal. Este proceso de ajuste de un modelo general a otro local se denomina calibración. A continuación (Figura 8) se muestra un esquema divulgativo del concepto de calibración:

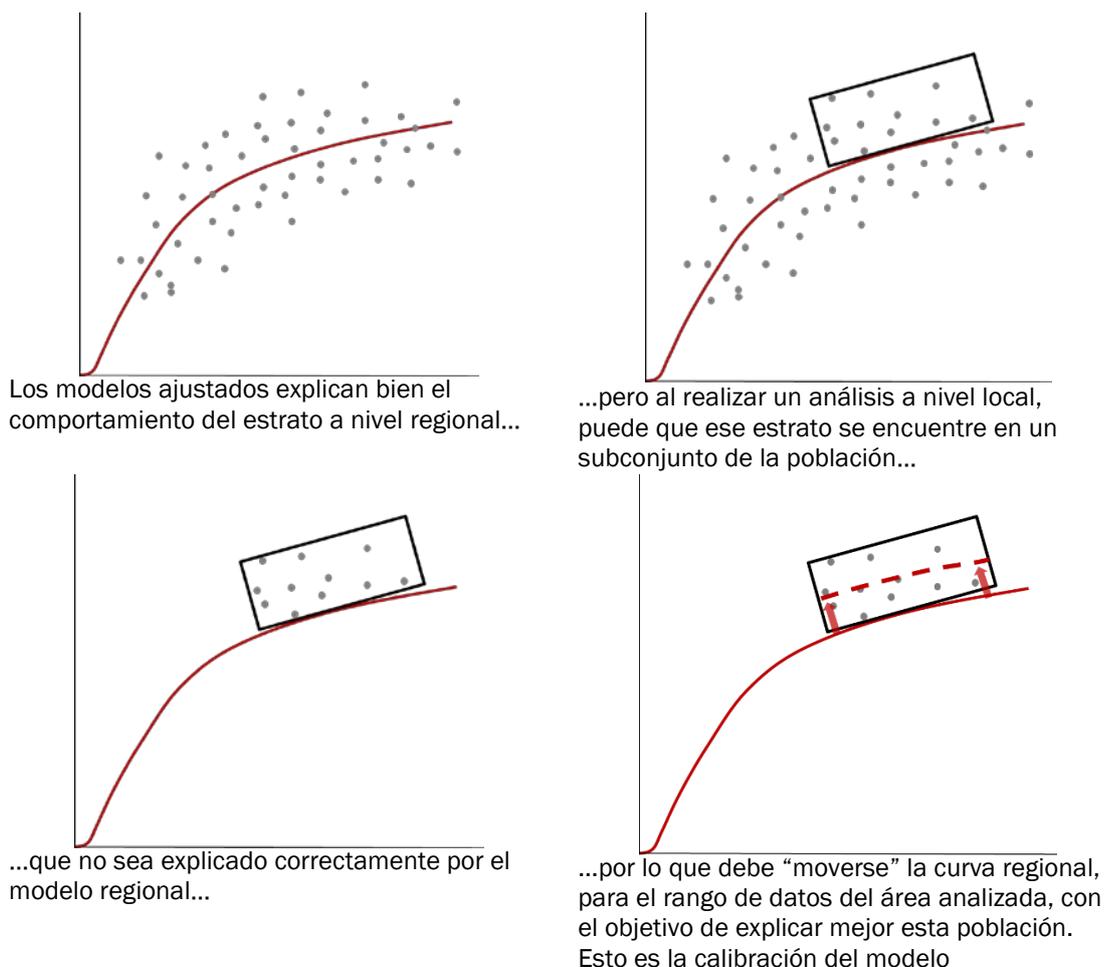


Figura 8. Esquema divulgativo del concepto de calibración

GINFOR cuenta con una herramienta de calibración automática para lo que el técnico debe introducir datos de parcelas (en un número mínimo) que permitan realizar este ajuste.

## 5. Discusión

Este trabajo viene a paliar dos carencias que tenía la Comunidad Autónoma. Por un lado, la ausencia de una cartografía de detalle en modelos de combustible como elemento de base para la gestión del riesgo de incendio, tanto en prevención como en extinción. Por otro lado, la ausencia de actualización de las existencias desde el tercer inventario forestal nacional.

Analizando independientemente cada resultado, cuentan con un elevado grado de bondad. Pero la realización de un proyecto conjunto ha permitido, además de aumentar la eficiencia de la inversión pública, vincular ambos resultados aportando criterios que aúnen la gestión selvícola con la del riesgo de incendios.

Además, se cumple con el fin de servicio público poniendo a disposición pública los resultados a través de la plataforma GINFOR. Además, GINFOR también ahonda en el aspecto de eficiencia de la inversión de modo indirecto, ya que supone una alternativa para la optimización de los inventarios de la ordenación de montes mediante la calibración automática de las existencias.

## 6. Conclusiones

Con la realización de este trabajo se dotó al gobierno regional de una información de interés para el manejo del riesgo de incendios. Uno de los principales elementos es una cartografía de modelos de combustible, que puede ser empleada en la simulación y predicción del comportamiento del fuego, de elevado nivel de detalle. Esta cartografía debe ser objeto de un mantenimiento tanto correctivo (para solventar los errores propios del valor del riesgo implícito al método de análisis estadístico) como evolutivo (derivado, principalmente, de la dinámica forestal). Pero además, se aportó otra información como el dinamismo de los combustibles, la actualización del mapa de riesgo o las zonas de gestión por riesgo.

Por otro lado, a partir de la información LiDAR, se generó un inventario forestal regional de los principales estratos arbolados de Castilla-La Mancha, que además de tener unos buenos resultados para el análisis regional, permite su empleo como opción para minimizar los costes de inventario en ordenación de montes.

Por último, el desarrollo de GINFOR pone a disposición pública los resultados, incluyendo una herramienta de calibración automática que supone la aplicación práctica para el uso del inventario regional a escala monte.

## 7. Agradecimientos

El equipo que ha realizado este trabajo quiere agradecer a los asesores científicos que se sumaron a la idea Dr. David Riaño y Joe H. Scott sus aportaciones siempre constructivas. También es necesario destacar la colaboración, en diferentes fases, de técnicos de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y de la empresa pública GEACAM, para facilitar información, accesos y soporte a los equipos de campo y valiosos aportes gracias a su conocimiento del territorio regional.

## 8. Bibliografía

BLASCHKE, T.; 2010. Object based image analysis for remote sensing, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, pp. 2-16.

CHAVEZ, P.; 1996. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. PE&RS September 1996, pp. 1025-1036.

HYYPÄ, J.; HYYPÄ H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU X.; MALTAMO, M.; 2008. Review of methods of smallfootprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. International Journal of Remote Sensing, Vol. 29 (5), pp. 1339-1366.

JCCM; 2015. Plan Director de Defensa Contra Incendios Forestales de Castilla-La Mancha. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Inédito.

MALTAMO, M; PACKALEN, P; YU, X; EERIKAINEN, K; HYYPÄ, J; PITKANEN, J; 2005. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. For. Ecol. Manage. 216, 41-50.

MUTLU, M; POPESCU, C.S; STRIPLING, C; SPENCER, T; 2008. Mapping surface fuel models using LiDAR and multispectral data fusion for fire behaviour. Rem. Sens. Environ. 112 (1), 274-285.

NAESSET, E; 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne laser using a practical two-stage procedure and field data. *Rem. Sens. Environ.* 80, 88-99.

NAESSET, E; 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *J. For. Res.* 19, 164-179.

PARRESOL, B.R.; 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4): 573–593.

RIAÑO, D; CHUVIECO, E; USTIN, S.L; SALAS, F.J; RODRIGUEZ-PEREZ, J.R; RIBEIRO, L.M; VIEGAS, D.X.; MORENO, J.F; 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.

ROTHERMEL, R.; 1972. A mathematical model for predicting fire spread. Intermountain Forest And Range Experiment Station. Forest Service. US Department of Agriculture. 41 pp. Ogden, Utah.

RUIZ-PEINADO, R.; RÍO, M.; MONTERO, G.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems* 20 (1):176-188.

SCHLAEGEL, B.E.; 1982. Testing, reporting, and using biomass estimation models. In C.A. Gresham (ed.), *Proceedings of the 3rd Annual Southern Forest Biomass Workshop*. Belle W. Baruch Forest Science Institute, Clemson University, Clemson, South Carolina, États-Unis, pp. 95–112.

SCOTT J.; BURGAN, R.; 2005. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. Rocky Mountain Research Station. Forest Service. US Department of Agriculture. 72 pp. Fort Collins, Colorado.

TEDESCHI, L.O.; 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Bibliographie Systems*, 89(2-3): 225–247.

WILDFIRE ANALYST, 2011. Wildfire Analyst Knowledge Framework. Disponible en línea en: <http://wildfireanalyst.com/help/spanish/>