COLABORACIÓN | TÉCNICA

Cartografía de alta resolución de modelos de combustible forestal: metodología de bajo coste basada en datos LIDAR

Eva Marino, Doctora Ingeniera de Montes

> Pedro Ranz Vega, Ingeniero Forestal y Diplomado en Estadística

> > José Luis Tomé, Ingeniero de Montes

Miguel Ángel Noriega, Licenciado en Geografía

AGRESTA Sociedad Cooperativa Se plantea una nueva metodología para la generación de cartografía de modelos de combustible forestal de alta resolución en las islas Canarias, basada en datos LiDAR y cartografía de vegetación previa y sin necesidad de datos de inventario de campo. Los resultados demuestran el potencial de la tecnología LiDAR para cuantificar y clasificar los combustibles a gran escala y con gran nivel de detalle a partir de los datos disponibles, empleando una metodología de bajo coste y con gran capacidad de actualización. La cartografía obtenida mejora sustancialmente los mapas de combustible existente hasta la fecha, permitiendo incrementar la resolución de las cartografías previas y poniendo a disposición de los gestores una información clave para la prevención y extinción de incendios forestales.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son una de las principales amenazas de los ecosistemas forestales, no solo en Canarias sino también en el resto de España, ocasionando un grave impacto tanto a nivel ecológico como social y económico. Los gestores del territorio necesitan disponer de herramientas fiables para poder evaluar el riesgo de incendio y predecir el comportamiento del fuego potencial que les permitan planificar las actuaciones encaminadas a la prevención de incendios (tratamientos selvícolas preventivos, ubicación de áreas cortafuegos, etc.) y extinción del fuego (áreas prioritarias de actuación, recursos necesarios, localización de infraestructuras lineales de defensa, etc.). Para ello, la información cartográfica relativa a los combustibles forestales existentes en un territorio es fundamental, ya que permite clasificar y cuantificar la vegetación de acuerdo a unos modelos previamente definidos, es decir, tipificar los ecosistemas según la cantidad de biomasa disponible para arder, así como su facilidad de ignición y de propagación del fuego bajo unas condiciones medioambientales dadas.

La mayoría de experiencias previas utilizadas para la generación de cartografías de modelos de combustible se han basado en una combinación de fotointerpretación y de asignación de modelos sobre el terreno. Esa metodología conlleva, por un lado, una alta inversión económica y de recursos humanos en la movilización de equipos para la realización del trabajo de inventario en campo; y por otro lado, una difícil actualización de los resultados en el tiempo: las cartografías se quedan obsoletas según los ecosistemas vegetales se ven afectados por diferentes fenómenos (incendios, plagas, vendavales, cortas, tratamientos silvícolas, etc.), así como por la propia evolución natural de los mismos (crecimiento vegetativo, cambios sucesionales, regeneración, etc.). Sin embargo, el empleo de nuevas tecnologías de teledetección mediante sensores remotos activos, como es el caso del LiDAR, supone un gran potencial para mejorar significativamente la caracterización de los combustibles forestales, ya que permite conocer con elevado nivel de detalle la estructura tridimensional de la vegetación de forma continua en grandes superficies.

El objetivo final de este trabajo es obtener una cartografía detallada, fiable y actualizable de modelos de combustible para las cinco islas forestales que no necesite trabajo de campo, y por tanto, con un mínimo grado de inversión para su consecución, mediante el empleo de datos LIDAR e información de cartografía previa existente.

2. MATERIAL Y MÉTODOS 2.1. Zona de estudio

La zona objeto del trabajo incluye las cinco islas forestales de Canarias (Tenerife, Gran Canaria, La Palma, La Gomera y El Hierro), con una superficie forestal total de 3.678 km², que representa aproximadamente el 74 % de la superficie de estas cinco islas.

2.2. Modelos de combustible forestal

En el año 2002 se definieron unos modelos de combustible específicos para la isla de Tenerife, creando una nueva clasificación basada en la estructura de los 13 modelos clásicos NFFL (Northern Forest Fire Laboratory, USDA Forest Service, USA) que aparecen en el sistema BEHAVE (Anderson 1982, Burgan y Rothermel 1986), que ya habían sido equiparados por el ICONA a los combustibles forestales españoles (ICONA 1987), pero ampliándolos y adaptándolos a las particularidades de



la vegetación canaria (Gil Muñoz 2002). Aunque estos modelos de combustible fueron inicialmente creados para la isla de Tenerife, sus tipologías son fácilmente extrapolables al resto de las islas forestales de Canarias, dado que Tenerife es la isla más representativa y que recoge la mayoría de los ecosistemas vegetales terrestres que se dan en el resto de la geografía canaria. Por lo tanto, esta clasificación fue la utilizada en el presente trabajo.

Los modelos de combustible forestal se clasifican siguiendo como criterio fundamental el estrato vegetal que va a condicionar la propagación del fuego. La clasificación utilizada de modelos de combustible de Canarias mantiene la estructura general de los modelos clásicos NFFL a nivel de clases y grupos, es decir, en lo que se refiere a la diferenciación básica según el tipo de formación vegetal combustible (pastizal, matorral, arbolado, etc.) previa a los criterios estructurales (altura, cobertura, etc.). Cada modelo de combustible incluye una descripción de la composición y estructura del complejo de combustible y cómo influye en el comportamiento del fuego, así como una tabla y análisis de los parámetros específicos de comportamiento del fuego. En la clasificación se definen originalmente un total de 25 modelos de combustible canarios, con algunos submodelos para los casos de matorral bajo arbolado, siendo en realidad la mayoría de ellos una subclasificación de los modelos clásicos NFFL. Para la realización de este trabajo no se han considerado todos los modelos canarios originales incluidos en la clasificación, sino una adaptación de los mismos. Por ejemplo, los submodelos de matorral bajo arbolado inicialmente definidos para los modelos 7.C, 7.D y 7.F no se incluyen, por ser una subclasificación en función de la variabilidad de la composición del sotobosque cuya discriminación no era



posible con las fuentes de datos utilizadas. Tampoco se incluyen los modelos 10 (restos bajo arbolado) ni otros modelos de matorral (4.A y 5.A), que han sido sustituidos por modelos equivalentes según el comportamiento esperado del fuego. En la siguiente Tabla se puede ver una descripción de los modelos canarios utilizados y su correspondencia con los 13 modelos clásicos NFFL que aparecen en el sistema BEHAVE (**Tabla 1**).

2.3. Datos de partida

Para la obtención de la cartografía de modelos de combustibles se empleó una combinación de dos fuentes de información principales: Estructura tridimensional de la vegetación: información sobre la cantidad de combustible en los diferentes estratos, así como sobre su continuidad vertical y horizontal. Para el análisis de la estructura de la vegetación se han seleccionado los siguientes estadísticos: Fracción de Cabida Cubierta (FCC), Altura media y Canopy Relief Ratio, un estadístico relacionado con la longitud libre de copa de la masa calculado a partir de observaciones de las alturas (Parker y Russ 2004). A partir de los datos LiDAR se crearon para cada isla ocho archivos cartográficos de estructura de la vegetación en formato raster (Tabla 2, Figura 1), generados con un tamaño de píxel de 25 x 25 m, que permitían caracterizar la vegetación en función de los principales parámetros estructurales necesarios para su posterior asignación según los modelos de combustible definidos en la clasificación utilizada. Dadas las particularidades de la vegetación canaria, el umbral para discriminar entre el estrato del arbolado y el de matorral/sotobosque se estableció a 4 m. Los datos LiDAR fueron capturados por la empresa GRAFCAN entre los años 2011 y 2013, con una densidad media de 1 pulso/m²,

Modelo de combustible canarios	Breve descripción del modelo de combustible	Modelo clásico
No combustible		
0	Rocas, suelo desnudo, agua, superficies artificiales	0
Herbazales		
1.A	Pastizal o cultivos herbáceos (h< 1m)	1
2.A	Pastizal con presencia de matorral (FCC matorral máx. 25-50 %)	2
3.A	Cañaverales o carrizales	3
Matorral		
Porte alto y muy denso	Altura h > 2m, densidad variable (FCC > 50 %)	
4.B	Matorral de especies muy inflamables	4
4.C	Matorral de especies moderadamente inflamables	4
Porte bajo	Altura h < 1,2m, densidad variable (FCC > 50 %)	
5.B	Matorral de especies moderadamente inflamables	5
5.C	Matorral de alta montaña	5
5.D	Matorral de especies muy inflamables	5
Porte medio	Altura 1,2m < h < 2m, densidad variable (FCC > 50 %)	
6.A	Matorral de especies inflamables, invasoras de terrenos agrícolas	6
6.B	Matorral de especies moderadamente inflamables	6
6.C	Matorral de especies muy inflamables	6
Sotobosque	Matorral bajo arbolado (FCC arbolada > 30 %, FCC matorral > 30 %)	
7.A	Eucaliptar (y otras frondosas muy inflamables)	7
7.B	Monteverde (y vegetación de ribera) con porte arbolado	7
7.C	Pinares con sotobosque predominante de brezo (h>1,2m)	7
7.D	Pinares con sotobosque mixto de brezo y monteverde (h>1,2m)	7
7.E	Pinares húmedos con sotobosque de monteverde (h>1,2m)	7
7.F	Pinares con sotobosque de porte bajo (h<1,2m)	7
7.G	Pinares termófilos con sotobosque inflamable (h>1,2m)	7
Hojarasca	Arbolado sin sotobosque (FCC arbolado > 30 %, FCC matorral < 30 %)	
9.A	Monteverde (y otras frondosas poco o moderadamente inflamables)	8
9.B	Pinares (y otras frondosas muy inflamables)	9
Formaciones xerófilas		
11.A	Modelo específicos para formaciones xerófilas	2

Tabla 1. Modelos de combustible canarios utilizados, adaptados de la clasificación original, y su equivalencia con los modelos clásicos NFFL

Nombre	Descripción	Variable forestal asociada	
FCC_4a50	% de primeros retornos entre 4 m y 50 m respecto al total	FCC del estrato arbolado	
FCC_04a4	% de retornos entre 0,4 m y 4 m respecto al total	FCC del estrato de matorral	
FCC_04a50	% de todos los retornos de la vegetación entre 0,4 m y 50 m	FCC total de la vegetación	
Н _О	Altura correspondiente al percentil 95 entre 0,4 m y 50 m	Altura dominante del estrato arbolado	
Hm_04a4	Altura media calculada para los retornos entre 0,4 m y 4 m	Altura media del estrato de matorral	
Hm_04a50	Altura media calculada para el total de los retornos de la vegetación entre 0,4 m y 50 m	Altura media de toda la vegetación	
CRR_04a50	<i>Canopy Relief Ratio</i> para los retornos entre 0,4 m y 50 m	Indicador de estructura vertical del total de la vegetación	
CRR_4a50	Canopy Relief Ratio para los retornos entre 4 m y 50 m	Indicador de estructura vertical del estrato arbolado	

Tabla 2. Resumen de las variables obtenidas a partir de los datos LiDAR



Figura 1. Ejemplos de la nube de puntos LiDAR (alturas normalizadas) en dos casos representativos de masas arboladas, distinguiendo los retornos de vegetación (verde) y los retornos de suelo (rosa): pinar sin sotobosque (arriba) y pinar con sotobosque (abajo)

en el marco de un proyecto piloto para la detección de cambios en el territorio con el que se está volando periódicamente la superficie de las islas desde el año 2010 (Rosales y Rodrigo 2012).

 Mapa de formaciones forestales: cartografía actualizada, originalmente en formato vectorial (.shp), que indica la composición a nivel fitosociológico de las diferentes regiones de cada isla. Esta cartografía es una revisión del Mapa de Vegetación de Canarias (escala 1:25.000), que incluye una caracterización fisionómica de los ecosistemas vegetales, posteriormente revisada y actualizada para este trabajo mediante foto-

interpretación, así como comprobación mediante cartografías existentes a nivel local más recientes. Para cada unidad de vegetación fitosociológica del mapa se estudió qué modelos de combustible podrían corresponderle. Una vez obtenido una lista completa de correspondencias entre unidades de vegetación y modelos de combustible, se procedió a crear nuevos grupos de unidades de vegetación (denominadas formaciones forestales) que fueran homogéneas además de en su composición, en su potencial correspondencia a diferentes modelos de combustible (ej. diferentes unidades de pinares con especies de sotobosque termófilo se agrupan en una única formación forestal). Las actualizaciones de la cartografía de formaciones forestales se hicieron teniendo en cuenta cómo máximo la fecha de vuelo para la toma de datos LiDAR de cada isla, de forma que la información de estructura y de composición fueran coetáneas. Se utilizó una transformación del mapa de formaciones forestales a formato raster, ya que genera resultados cartográficos más robustos, más claros (con menos ruido) y con una considerablemente mayor facilidad de interpretación.

2.4. Algoritmos de decisión

La metodología empleada se basa en el desarrollo de algoritmos de decisión para la asignación automática de modelos de combustible basados en la información que aportan las diferentes variables LiDAR (ocho capas *raster* de parámetros estructurales) en combinación con el mapa de formaciones forestales. Para ello, se analizó para cada píxel (25 x 25 m) de toda la zona de estudio la información estructural y el tipo de vegetación existente.

Una vez identificada la clase fundamental a la que pertenece una formación (arbolada, matorral o pastizal), la tipificación de los modelos de combustible forestal se basa fundamentalmente en la estructura y distribución de la vegetación. No obstante, para la asignación de los modelos de combustible no solo se han tenido en cuenta parámetros cuantitativos estructurales (altura, cobertura, continuidad vertical), sino también el comportamiento esperado del fuego en función de parámetros cualitativos (inflamabilidad asociada a su composición específica). Por lo tanto, es posible que a diferentes asociaciones vegetales se les asigne un mismo modelo de combustible forestal por tener un comportamiento parecido frente al fuego.

Los modelos de combustible definidos en la clasificación utilizada fueron creados para la isla de Tenerife. Por tanto, aunque Tenerife es la isla más representativa que recoge la mayoría de los ecosistemas vegetales terrestres de la geografía canaria, no todas las formaciones forestales estaban representadas en los modelos de combustible definidos (e.j. palmerales, sauzales). Incluso para algunas de las formaciones previamente incluidas en la clasificación, las definiciones de los modelos no permitían una asignación directa por no cubrir toda la casuística encontrada tras el análisis de la caracterización estructural de la vegetación obtenida con los datos LiDAR (ej. pinares con sotobosque de densidad variable). En este sentido, a aquellas formaciones que no estaban previamente definidas de forma explícita en la clasificación de modelos de combustible de Canarias

se les asignaron los modelos más adecuados en función no solo de variables estructurales similares sino también del comportamiento potencial del fuego asociado. En caso de dudas ante la asignación de varios posibles modelos de combustible, se ha seguido el criterio de la seguridad, eligiendo siempre el que presenta un comportamiento del fuego más peligroso.

2.5. Validación

La cartografía de modelos de combustible fue validada con datos de campo con un doble objetivo: por un lado, detectar posibles errores, realizando las mejoras oportunas en los algoritmos de decisión para la correcta asignación de modelos de combustible; y por otro lado, evaluar el grado de fiabilidad de la cartografía generada y analizar la bondad de la metodología de asignación de modelos de combustible utilizada para futuras actualizaciones de las fuentes de datos.

Se verificaron los modelos de combustible en un total de 220 puntos de campo, localizados en cuatro islas: Tenerife, Gran Canaria, La Palma y La Gomera (**Figura 2**). En cada punto se asignó el modelo de combustible real existente sobre el terreno, teniendo en cuenta los valores medios de los parámetros de entrada utilizados en los algoritmos (alturas, coberturas y continuidad vertical del combustible) en una superficie equivalente a la resolución espacial utilizada para los datos LiDAR (25 x 25 m). En las **Figuras 3** y **4** se muestran ejemplos de algunos de los modelos de combustible identificados para formaciones arboladas y no arboladas, respectivamente.

Para evaluar la fiabilidad de la cartografía se crearon matrices de confusión, con el fin de verificar los modelos de combustible clasificados en la cartografía frente a los valores de referencia obtenidos en campo. Esta metodología se basa en la creación de una matriz cuadrada (n x n) que incluye tantas filas (modelos asignado en la cartografía) y columnas (modelos reales sobre el terreno) como modelos de combustible a analizar. A partir del porcentaje de puntos bien clasificados respecto al total de puntos muestreados se obtuvo el acierto global (%) de la cartografía de modelos de combustible. También se calculó el coeficiente Kappa (Cogalton



1991), que elimina la parte de la probabilidad de acierto debida al azar por cruce de clases.

2.6 Post-proceso

Tras la aplicación de los algoritmos de decisión a la combinación de la información del mapa de formaciones forestales y las diferentes cartografías de parámetros estructurales derivados de los datos LiDAR se obtiene para cada isla una capa *raster* con tamaño de celda 25 x 25 m. Cada celda posee un código numérico que hace referencia al modelo de combustible asignado.

Estos resultados tan precisos (píxeles de 625 m², es decir, 0,06 ha) son de gran utilidad para su utilización como información en simuladores de incendios, ya que permiten predecir el comportamiento del fuego según la localización espacial de los combustibles con gran nivel de detalle. Sin embargo, para otro tipo de usos tales como la generación de cartografía impresa o la planificación de actuaciones (ya sean de prevención o de extinción), se han obtenido cartografías más depuradas con recintos más manejables mediante la aplicación de una serie de procedimientos de agrupación de píxeles comunes y eliminaciones de píxeles aislados. El resultado de este post-proceso de filtrado y suavizado de cartografía inicial de modelos de combustible de alta resolución es una capa raster con "resolución media", que presenta un tamaño mínimo de agrupación de 0,19 ha (tres píxeles). Finalmente, para estos raster de resolución media se realizó una conversión a formato vectorial (.shp), obteniendo una cartografía operativa y con un tamaño de archivo manejable.

En la **Figura 5** se muestra un esquema metodológico donde se resumen las fuentes de datos utilizadas y los procesos realizados para la generación y posterior validación de la cartografía de modelos de combustible de Canarias.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la **Figura 6** se muestra un ejemplo de la salida cartográfica en formato *raster* generada para la clasificación de modelos de combustible de alta resolución (píxel de 25 x 25 m, 625 m²), así como el aspecto de la cartografía de resolución media para la misma zona obtenida tras la aplicación de los procesos de filtrado de píxeles aislados y agrupación de píxeles comunes.



Pinar con sotobosque y discontinuidad vertical (7.F)

inar con sotobosque y continuidad vertical (7.C)

Figura 3. Ejemplos de modelos de combustible identificados en zonas arboladas



Figura 4. Ejemplos de modelos de combustible identificados en zonas desarboladas

Esta última es la que se convierte a su vez en formato vectorial, obteniendo teselas con una superficie mínima de 0,19 ha. Tanto la cartografía de alta resolución como la de resolución media fueron también obtenidas para la clasificación de modelos de combustible clásicos NFFL, que es la más comúnmente utilizada hasta la fecha, mediante la equivalencia descrita en la **Tabla 1**.

Los resultados de validación obtenidos a partir de los 220 puntos de campo indican una **fiabilidad global de la cartografía del 65** %. El coeficiente Kappa es 0,63, lo que indica que la cartografía de modelos de combustible obtenida es un 63 % mejor que la esperada mediante una asignación al azar. Analizando el porcentaje de aciertos del usuario (aquellos modelos del mapa creado que están bien asignados en la clasificación en relación con los valores reales de referencia) de esta cartografía encontramos los siguientes



resultados:

- Modelos con un <u>nivel bajo de acier-</u> tos (< 30 %):
 - Modelos de matorral de porte bajo: modelos 5 (altura del matorral < 1,2 m)
- Modelos con un <u>nivel de aciertos</u> medio (30-60 %):
 - Modelos de pastizal: 1.A (herbazales) y 2.A (mezcla de pastizal y matorral)
 - Modelo de matorral alto y denso asociado a especies menos inflamables: 4.B
 - Modelo de matorral bajo arbolado asociado a especies termófilas: 7.G
 - Modelo 0 (no combustible)
- Modelos con un <u>nivel alto de acier-</u> tos (> 60 %):
 - Modelos de matorral: 4.C, 6.A, 6.B, 6.C
 - Modelos de arbolado con sotobosque: 7.A, 7.B, 7.C, 7.D, 7.E, 7.F
 - Modelos de arbolado con hojarasca: 9.A, 9.B
 - Modelo para las formaciones xerófilas: 11.A

Con el fin de obtener una correcta validación de la metodología de asignación de modelos de combustible a partir de los datos LiDAR (es decir, excluyendo una validación del mapa de formaciones forestales), se evaluó la fiabilidad potencial de la cartografía obtenida con los mismos algoritmos de decisión propuestos pero suponiendo que los mapas de vegetación base utilizados (que sirven de dato para identificar los distintos tipos de formaciones forestales) fuesen más precisos. Para ello, se calculó de nuevo la matriz de confusión, pero depurando los datos para eliminar los puntos cuya fuente de error estuviera asociada con discrepancias en la composición de la vegetación debidas a imprecisiones del mapa de formaciones forestales (ej. dada la escala de trabajo, las zonas de interfaz urbano-forestal están agrupadas en un clase común denominada "Restos de áreas", en las que no se dispone de información sobre la presencia y, en su caso, tipo de vegetación existente, por lo que se les asigna por defecto el modelo 0 "no combustible"). Esto permitió verificar la capacidad de la metodología propuesta para la correcta asignación de los modelos de combustible basada exclusivamente en la evaluación de los



Figura 5. Diagrama de flujo para la obtención de la cartografía de modelos de combustible



Figura 6. Ejemplo de las salidas cartográficas en formato raster obtenidas para los mapas de modelos de combustible de Canarias de alta resolución (arriba) y de resolución media (abajo)

parámetros derivados de los datos Li-DAR, es decir, suponiendo que el tipo de vegetación existente obtenida mediante la cartografía de base fuese el correcto. Estos resultados, obtenidos a partir de 174 puntos de referencia (tras depurar los datos de campo), indicaron una mejora significativa de la precisión de la cartografía. La **fiabilidad global aumen**- **ta hasta el 82** %, con un coeficiente Kappa del 0,81.

En relación al porcentaje de acierto del usuario de la cartografía, los resultados indican que todos los modelos de combustible alcanzan un alto nivel de aciertos (> 67 %), excepto los modelos asociados a matorral de porte bajo (modelos 5), que son los más difíciles de discriminar, confundiéndose con los modelos de pastos (en especial, con el 2.A) y con el modelo 0 (no combustible). Esto se debe fundamentalmente a que los datos LiDAR subestiman la cobertura del matorral cuando la altura es baja. Hay que tener en cuenta también que los retornos de los primeros 40 cm más próximos al suelo fueron eliminados de los estadísticos de cálculo de los parámetros estructurales de la vegetación para evitar errores de imprecisión inherentes a la obtención del modelo digital del terreno (MDT). Sin embargo, los modelos de matorral más peligrosos (modelos 4 y 6) alcanzan un porcentaje de aciertos superior al 70 %.

Cabe destacar que los modelos con un mejor nivel de acierto son los modelos de arbolado (porcentaje de aciertos entre 75-100 %), en los que además se discrimina con gran fiabilidad entre las formaciones forestales con presencia de estrato arbustivo en el sotobosque (modelos 7) y aquellas en las que el combustible predominante es la hojarasca (modelos 9). Este resultado es de especial relevancia, ya que los modelos de matorral bajo arbolado (modelos 7) son los más peligrosos por su potencial de subida a copas en caso de incendio.

Los resultados obtenidos son muy prometedores, ya que ponen de manifiesto que, a pesar de las limitaciones encontradas y de la ausencia de trabajo de campo, la metodología propuesta para la asignación de modelos de combustible de alta resolución a partir de los datos LiDAR para grandes superficies tiene un alto grado de fiabilidad si se consiguen mejorar los mapas de vegetación de entrada (básicamente, haciendo una actualización con una mayor escala e incorporando nuevas técnicas de teledetección para la discriminación semiautomática previa del tipo de vegetación existente).

4. CONCLUSIONES

La metodología presentada permite la obtención de cartografía de modelos de combustible en diferentes formatos (vectorial y *raster*) con elevado nivel de detalle (alta y media resolución) y para diferentes tipos de clasificaciones de modelos de combustible (canarios y clásicos NFFL) a partir de la **información estructural de la vegetación proporcionada por datos LiDAR y su combinación con cartografía previa** sobre el tipo de formación forestal existente (mapas de vegetación).

Las principales ventajas de la metodología presentada son:

- 1. Obtener cartografías de modelos de combustible de grandes superficies a bajo coste. Se trata de una metodología de muy bajo coste; el ahorro que supone el trabajo de campo ha permitido abordar un trabajo a gran escala (cinco islas forestales de Canarias, en concreto más de 367.000 ha estudiadas), en un contexto como el actual de escasez presupuestaria en las administraciones públicas.
- Trabajar con un alto nivel de detalle. Se obtienen cartografías continuas de modelos de combustible de alta resolución (celdas de 25 x 25 m), mucho mayor que cualquier cartografía utilizada hasta la fecha.
- 3. Resultados fácilmente actualizables. En cuanto a la información de estructura, GRAFCAN realiza vuelos LiDAR periódicos al menos bienales. Además, el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea prevé actualizaciones cada 2 o 3 años de las ortofotos. Respecto a la composición vegetal, es posible la aplicación de técnicas combinadas de procesamiento de datos procedentes de sensores remotos activos y pasivos para obtener cartografías más precisas y actualizadas a bajo coste.

Por otro lado, también existen ciertas limitaciones que es necesario mencionar. Algunas consideraciones importantes a tener en cuenta sobre la metodología propuesta son las siguientes:

- La clasificación no tiene en cuenta la presencia y proporción de combustibles vivos y muertos, o su distribución en finos y gruesos (cargas de combustible por clases de tamaño).
- Aunque la información de estructura (obtenida a partir de datos LiDAR) posee un grado de fiabilidad muy alta, la obtención de buenos resultados depende de disponer de ma-

pas de vegetación precisos con un moderado nivel de detalle y un alto grado de actualización que permitan identificar correctamente la composición del ecosistema. No obstante, hay otras clasificaciones que no requieren este tipo de información para la correcta asignación de los modelos de combustible (ej. clasificación Prometheus (1999), solo basada en datos estructurales).

- Los mapas de vegetación no suelen informar sobre la composición del matorral bajo arbolado, ya que es una cuestión difícilmente identificable, lo que va a condicionar la correcta asignación de algunos modelos (modelos 7). La posible mejora en la clasificación para este tipo de modelos solo sería posible mediante la realización de trabajo de campo, puesto que con teledetección únicamente disponemos de la información relativa a las copas y no del sotobosque existente bajo el arbolado.
- En general, el procesado LiDAR subestima la cobertura real de las herbáceas y el matorral bajo por tener alturas muy próximas al suelo. Además, no es posible discriminar entre la cobertura del matorral y del pastizal mediante datos LiDAR, por lo que sería conveniente verificar la existencia de formaciones de porte bajo, como son los herbazales (ya sean de tipo puro 1.A o mixto 2.A). así como el matorral de porte bajo (modelos 5), mediante índices de vegetación obtenidos a partir de sensores remotos pasivos, para discriminarlas mejor de las zonas con ausencia de vegetación (modelo 0). El apoyo de campo con muestreos dirigidos a estas zonas permitiría garantizar una adecuada estimación de la cobertura y altura de la vegetación.
- No se han incluido los modelos de restos leñosos bajo masas arboladas (modelos 10), ya que no podemos discriminar si los restos en el sotobosque son de origen natural (plagas, enfermedades) o de explotaciones (tratamientos selvícolas). La asignación de este tipo de modelos asociados a masas arboladas solo sería válida mediante su verificación en campo. Además, la identificación mediante cartografía previa o datos LiDAR no estaría justificada



si no se corresponde con datos actualizados dado el carácter temporal de estas perturbaciones.

 No se proporciona información diferenciadora en las zonas de interfaz urbano-forestal, ya que en este caso no se disponía de datos sobre la presencia de vegetación combustible en los mapas de base utilizados. La mejora de la cartografía en estas áreas sería automática, siempre que se disponga de una descripción más precisa de la presencia y tipo de vegetación existente.

A pesar de las limitaciones anteriores, y las posibilidades de mejora mencionadas, hay que destacar que los resultados obtenidos alcanzaron un **ele**vado grado de fiabilidad sin realizar tra-

bajo de campo. Además, la cartografía resultante mejora de forma evidente la existente tanto en grado de detalle como de actualización en las zonas donde hubiera mapas de combustible previos, y aporta información espacial de enorme relevancia en las zonas donde no la hubiera. Una primera aplicación directa es su uso en simuladores de incendios forestales como una fuente de entrada de datos adicional con la que poder anticipar el comportamiento de potenciales incendios forestales. Otras aplicaciones relevantes son su uso como herramienta esencial tanto en trabajos de extinción de incendios como en la planificación y gestión de los ecosistemas (localización de tratamientos selvícolas preventivos, infraestructuras, etc.).

Estamos, por tanto, ante una metodología de bajo coste de gran interés para mejorar las cartografías de modelos de combustible obsoletas en muchas comunidades autónomas, alimentándose de los datos LiDAR disponibles a nivel nacional capturados por el PNOA y el mapa forestal. En aquellos casos en los que la disponibilidad presupuestaria no sea limitante, recomendamos complementar la metodología con apoyo en campo y trabajo de teledetección a partir de sensores pasivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa GRAFCAN y al Gobierno de Canarias la posibilidad de realizar este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON H.E., 1982. Aids to determining fuel models for estimation fire behavior. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-122, 20 pp.
- BURGAN R., ROTHERMEL R.C., 1986. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System – FUEL subsystem. Rep. No. GTR INT-167. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- COGALTON R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- DEL ARCO M., WILDPRET W., PÉREZ DE PAZ P.L., RODRÍGUEZ O., ACEBES J.R., GARCÍA A., MARTÍN V.E., REYES J.A., SALAS M., DÍAZ M.A., BERMEJO J.A., GONZÁLEZ R., CABRERA M.V., GARCÍA S., 2006. Cartografía 1:25.000 de la Vegetación Canaria. GRAFCAN S.A. (Santa Cruz de Tenerife)

- GIL MUÑOZ P. (Director), 2002. Identificación y caracterización de los combustibles forestales de Tenerife, tomo I Memoria. Gobierno de Canarias, Consejería de Política Territorial y Medio Ambiente. Tecnoma 307 p.
- ICONA, 1987. Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Instituto para la Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- PARKER G.G., RUSS M.E., 2004. The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. Forests Ecology and Management, 189: 307-315.
- PROMETHEUS S.V. Project (1999). Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects. System Validation). European Commission - Contract number ENV4-CT98-0716.
- ROSALES J.J., RODRIGO J.J., 2012. Tecnología LiDAR aplicada a la gestión del territorio. Tierra y Tecnología, 41: 57-59.