



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

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



Estimaciones de carga y estructura vertical de formaciones de matorral a partir de mediciones de obstrucción visual en campo

ARELLANO-PÉREZ, S.¹, ALONSO-REGO, C.¹, LÓPEZ-FERNÁNDEZ, M.¹, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.¹, VEGA, J.A.² y RUIZ-GONZÁLEZ, A.D.¹

¹ Unidad de Gestión Ambiental y Forestal Sostenible (UXAFORES), Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Benigno Ledo s/n, 27002 Lugo, España.

² Centro de Investigación Forestal de Lourizán, PO Box 127. 36080, Pontevedra, España.

Resumen

La estructura de las formaciones de matorral propensas al fuego, definida por factores como su altura, distribución de cargas por estado vegetativo (vivo-muerto) y fracciones de tamaño, o la densidad aparente, desempeña un papel fundamental en el comportamiento del fuego, afectando a variables como la velocidad de propagación o la intensidad lineal. Las metodologías habituales de estimación de la estructura vertical de complejos de combustible se basan en muestreos destructivos o sensores remotos como el láser escáner terrestre, siendo laboriosas y/o costosas y, por ello, de difícil implementación a gran escala. En este trabajo se describe una técnica de campo robusta y no destructiva para estimar la estructura del complejo de combustible basada en la obstrucción visual de una banda graduada colocada verticalmente en el mismo. La metodología se aplica a 55 parcelas en formaciones de *Ulex europaeus*, *Ulex gallii*, *Erica australis* y *Pterospartum tridentatum*. A partir de observaciones sencillas se obtuvieron métricas usadas posteriormente como variables independientes para ajustar un sistema de ecuaciones de estimación de cargas por fracciones y estado vegetativo. Esta metodología puede utilizarse también para evaluar la biomasa, el stock de carbono o la densidad y estructura del matorral como hábitat de fauna.

Palabras clave

Ajuste simultáneo, combustible forestal, inventario no destructivo, noroeste de España.

1. Introducción

La carga de combustible, definida como la cantidad de biomasa expresada en peso de materia seca por unidad de superficie, es una característica fundamental del combustible forestal ya que, junto con otras características estructurales, afecta en gran medida al comportamiento del fuego, regulando la velocidad de propagación, la intensidad lineal o la longitud de la llama (Chandler et al., 1983; Pyne et al., 1996). La adecuada caracterización de los combustibles, incluyendo la carga de combustible desagregada por clases de tamaño y estado vegetativo (fracciones vivas y muertas), es esencial para obtener estimaciones fiables de los simuladores de comportamiento del fuego que puedan ser utilizadas en los procesos de toma de decisiones en la gestión del combustible y la predicción del riesgo de incendios (Finney et al., 2007; Ager et al., 2011). Además, la carga de combustible es también un componente esencial en la evaluación del ciclo del carbono y de las emisiones de gases de efecto invernadero en los incendios forestales (ver, por ejemplo, Jiménez et al., 2013; Lasslop & Kloster, 2015).

En Galicia, el rápido crecimiento de la vegetación como consecuencia de las suaves temperaturas anuales y a las elevadas precipitaciones genera grandes acumulaciones de combustible, tanto superficial como arbóreo, que favorecen los incendios forestales de alta intensidad (Arellano et al., 2017), siendo una de las zonas más afectadas por los incendios en Europa (Koutsias et al., 2015; San Miguel-Ayanz et al., 2019). Esto es especialmente notorio en las formaciones de matorrales, ya que el 63% de la superficie total quemada en esta región en los últimos 20 años ha afectado a comunidades arbustivas no arbóreas (Xunta de Galicia, 2019), a pesar

de que estas comunidades representan sólo un 30% de la superficie forestal total y un 20% de la superficie total de la región (MARM, 2011a).

La carga de combustible de las comunidades de matorral, incluyendo tanto la capa arbustiva como la de hojarasca, puede cuantificarse tanto mediante muestreo destructivo como no destructivo (Catchpole & Wheeler, 1992). El muestreo destructivo es el método más preciso para determinar la carga de combustible, pero también el más complejo y costoso en tiempo y dinero, por lo que es difícil de aplicar a grandes áreas (Bonham, 2013). El muestreo no destructivo permite la estimación indirecta de la carga de combustible, normalmente mediante el uso de relaciones alométricas entre dichas cargas y variables del combustible que se miden fácilmente en el campo (De Cáceres et al., 2019; Montero et al., 2020).

En las dos últimas décadas se han desarrollado nuevos modelos que relacionan las principales características de los combustibles con datos de teledetección provenientes tanto de imágenes de satélite (Riaño et al., 2002, Viana et al., 2012) como de escáner láser aerotransportado (ALS) (Estornell et al., 2011a; Li et al., 2017). Esto ha permitido la construcción de mapas temáticos de combustible para la simulación del comportamiento del fuego y para la evaluación del riesgo de incendios. Sin embargo, la precisión de tales estimaciones depende en gran medida de la exactitud del modelo digital del terreno (MDT) generado previamente que, a su vez, se ve afectado por la densidad de la vegetación y la orografía del terreno (Estornell et al., 2011b). Así, en zonas de matorrales muy densos y terrenos escarpados, típicos del territorio gallego, la altura y el volumen de los arbustos tienden a ser subestimados (Glenn et al., 2011).

Por otro lado, también el escáner láser terrestre (TLS) ha mostrado un gran potencial para su uso en la evaluación de la biomasa y otras características de las formaciones de matorral, fundamentalmente a partir de la reconstrucción de la forma de los arbustos a partir de la nube de puntos, ya sea por aproximación a trozos del volumen o por voxelización (Alonso-Rego et al., 2020). En general, estos estudios con el TLS requieren varios escaneos desde diferentes posiciones, a menudo al menos de 5 a 9 escaneos, lo que implica la realización de un inventario de campo muy costoso en tiempo al margen de la importante inversión que supone contar con un equipo de estas características. Por otro lado, otras alternativas de estimación más rápidas y sencillas de aplicar, como puede ser el uso de foto-guías de combustible, no siempre aportan el nivel de detalle requerido.

Por todo ello, es necesario emplear metodologías basadas en mediciones sencillas en campo que permitan una estimación robusta de la carga de combustible, distinguiendo entre fracciones y estado vegetativo del matorral. Una posible opción es el uso del método FuelRule propuesto por Davies et al. (2004) y que se basa en la relación existente entre las principales variables de interés de los combustibles relacionadas con los incendios, su estructura espacial y la obstrucción visual que dicha estructura espacial provoca al visualizar un objeto situado en el interior de dicha estructura.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es probar el uso potencial de las técnicas de obstrucción visual en la toma de datos en campo para la obtención de métricas que puedan ser utilizadas como variables independientes en modelos de estimación de carga de combustible de matorral diferenciando por fracciones de tamaño y estado vegetativo (vivos/muertos) para cuatro de las principales comunidades de matorral no arbolado en Galicia.

3. Metodología

3.1. Selección de las parcelas

Las formaciones de matorral predominantes en el área de estudio están dominadas por especies de los géneros *Ulex*, *Erica*, *Pterospartum*, *Cytisus*, *Genista* y *Retama*. En este trabajo se seleccionaron 4 formaciones de matorral ampliamente representadas en Galicia (MARM, 2011b) y que figuran entre las más frecuentemente afectadas por incendios forestales. En la Tabla 1 se muestran las principales características en cuanto a especies dominantes y secundarias de estas cuatro formaciones.

Tabla 1. Principales especies presentes en las comunidades de matorral seleccionadas para este estudio.

Comunidad	Parcelas	Código	Especie principal	Especies secundarias
Brezos de gran porte	15	Ea	<i>Erica australis</i> L.	<i>Pterospartum tridentatum</i> , <i>Halimium alyssoides</i> (Lam.) Greuter, <i>Erica arborea</i> L., <i>Ulex europaeus</i>
Carqueixales	10	Pt	<i>Pterospartum tridentatum</i> (L.) Willk.	<i>Erica umbellata</i> Loefle ex L., <i>Halimium alyssoides</i> , <i>Erica australis</i> L., <i>Ulex gallii</i> , <i>Ulex europaeus</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn
Tojos de gran porte	15	Ue	<i>Ulex europaeus</i> L.	<i>Ulex gallii</i> , <i>Erica umbellata</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Pterospartum tridentatum</i> , <i>Ulex europaeus</i> , <i>Erica umbellata</i> , <i>Daboecia cantábrica</i> (Huds.) K.Koch, <i>Pterospartum tridentatum</i> , <i>Pteridium aquilinum</i>
Tojos de porte bajo	15	Ug	<i>Ulex gallii</i> Planch./ <i>Ulex minor</i> Roth.	

Un total de 55 parcelas de las cuatro comunidades fueron seleccionadas en la zona de distribución de cada una de ellas, de modo que la muestra fuera representativa de la dispersión observada en cuanto a composición de especies y altura media del matorral y que la cobertura fuera mayor del 80%. En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de la muestra empleada.

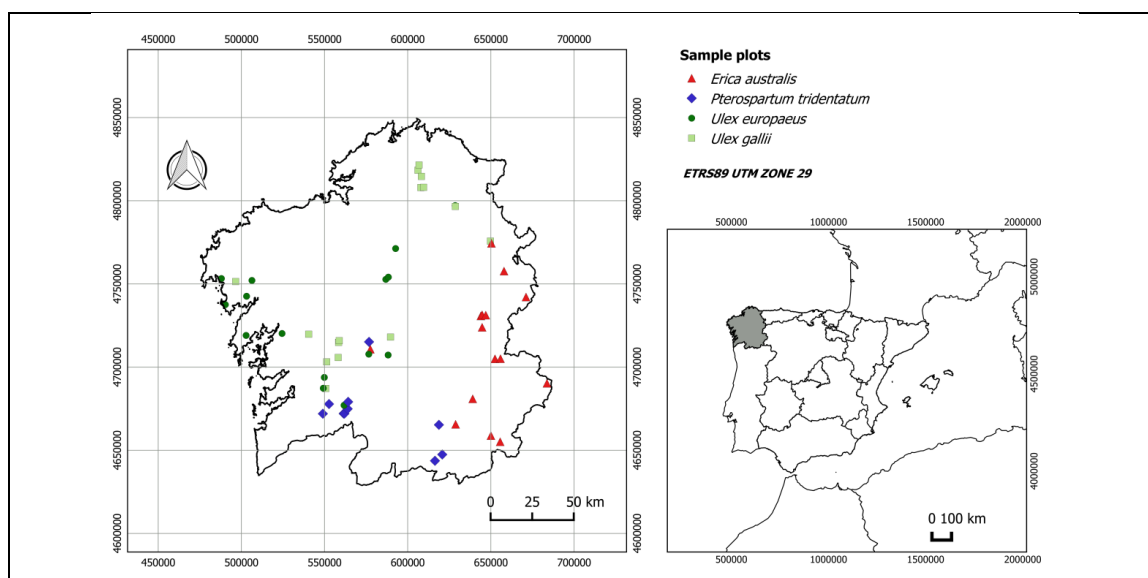


Figura 1. Localización geográfica de las parcelas empleadas en este estudio.

3.2. Medición de variables estructurales y estimación de cargas

En cada parcela se marcó sobre el terreno de forma aleatoria un cuadrado de 2x2 metros con los lados paralelos a la línea de máxima pendiente y a la curva de nivel. Cada cuadrado fue delimitado con jalones de madera y toda la vegetación exterior en una franja de 0.5 metros fue eliminada para facilitar las mediciones en el área delimitada. Se estableció un transecto formado por el perímetro completo del cuadrado más una diagonal interior que se utilizó como referencia para medir la longitud horizontal sobre el transecto de cada especie de matorral presente (cm), información que se utilizó para estimar la cobertura linear (Cov_m) siguiendo la metodología propuesta por Canfield (1941). También, cada 50 cm, se midió la altura total de cada especie interceptada por el transecto, la altura de la base de combustible de matorral vivo y muerto y la profundidad de la capa de mantillo, incluyendo en ella la hojarasca dado que la separación entre ambas capas no era siempre evidente. A partir de las mediciones de altura del matorral y de profundidad del mantillo se obtuvieron los valores medios por parcela ($\overline{h_m}$ y $\overline{h_{mant}}$, respectivamente).

Para cada comunidad las cargas de los combustibles se estimaron usando los sistemas de ecuaciones de estimación por especie desarrolladas para las comunidades de matorral en Galicia (Arellano-Pérez, 2011), y que emplean Cov_m , $\overline{h_m}$ y $\overline{h_{mant}}$ como variables de entrada. Esos sistemas incluyen ecuaciones para las siguientes 7 fracciones: combustible matorral fino muerto (diámetro<0.6 cm; $W_{m_G1_m}$); combustible matorral fino vivo (diámetro<0.6 cm; $W_{m_G1_v}$); combustible matorral fino (diámetro<0.6 cm; W_{m_G1} , muerto+vivo); combustible matorral grueso (diámetro≥0.6 cm; W_{m_G23}); combustible matorral total (W_m , fino+grueso); combustible mantillo (W_{mant}) y combustible total (W_{m+mant}). La Tabla 2 muestra los valores descriptivos de las variables estructurales por comunidad.

Tabla 2. Descripción de las principales características de los combustibles. Ea=Erica australis, Pt=Pterospartium tridentatum, Ue=Ulex europaeus y Ug=Ulex gallii/ Ulex minor. d.e.= desviación estándar, n= número de parcelas, $\overline{h_m}$ = altura media del matorral, Cov_m = cobertura, $\overline{h_{mant}}$ = profundidad media del mantillo, $W_{m_G1_m}$ = carga del combustible fino muerto, $W_{m_G1_v}$ = carga del combustible fino vivo, W_{m_G1} = carga del combustible fino, W_{m_G23} = carga del combustible grueso, W_m = carga total del matorral, W_{mant} = carga del mantillo y W_{m+mant} = carga total incluyendo matorral y mantillo.

Var.	Estadístico	Ea (n=15)	Pt (n=10)	Ue (n=15)	Ug (n=15)
$\overline{h_m}$ (cm)	Media (d.e.)	84.91 (31.48)	90.37 (33.94)	108.18 (19.95)	65.43 (21.77)
	Rango	38.24-150.76	42.86-151.05	59.71-113.10	13.90-109.33
Cov_m (%)	Media (d.e.)	99.80 (0.52)	99.34 (1.20)	99.64 (0.77)	98.32 (3.17)
	Rango	98.15-100	96.3-100	97.69-100	87.5-100
$\overline{h_{mant}}$ (cm)	Media (d.e.)	2.38 (1.17)	4.03 (1.19)	5.49 (2.11)	4.56 (0.98)
	Rango	0.78-5.60	2.02-5.86	3.08-10.55	2.40-5.81
$W_{m_G1_m}$ (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	0.41 (0.12)	0.84 (0.17)	0.89 (0.09)	0.75 (0.18)
	Rango	0.20-0.63	0.58-1.01	0.65-1.00	0.20-1.00
$W_{m_G1_v}$ (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	1.19 (0.23)	1.47 (0.25)	1.40 (0.07)	1.53 (0.23)
	Rango	0.76-1.53	1.08-1.73	1.18-1.48	0.72-1.69
W_{m_G1} (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	1.60 (0.36)	2.31 (0.42)	2.29 (0.16)	2.28 (0.41)
	Rango	0.96-2.16	1.66-2.74	1.83-2.47	0.92-2.69
W_{m_G23} (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	0.48 (0.36)	0.62 (0.40)	1.17 (0.31)	0.37 (0.28)
	Rango	0.06-1.38	0.12-1.37	0.46-1.58	0-1.09
W_m (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	2.08 (0.71)	2.93 (0.80)	3.47 (0.47)	2.65 (0.63)
	Rango	1.02-3.54	1.77-3.99	2.29-4.05	0.93-3.78
W_{mant} (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	1.00 (0.36)	1.38 (0.49)	1.89 (0.64)	1.70 (0.35)
	Rango	0.45-1.91	0.71-2.25	1.14-3.40	0.93-2.14
W_{m+mant} (kg m ⁻²)	Media (d.e.)	3.08 (0.99)	4.31 (1.11)	5.35 (1.02)	4.35 (0.84)
	Rango	1.70-5.45	2.54-6.24	3.98-7.45	2.51-5.75

3.3. Mediciones de obstrucción visual con la banda y estimación de variables relacionadas

En cada una de las parcelas se realizaron las mediciones de obstrucción visual por parte del matorral de una barra de 2 metros de longitud y 5 cm de anchura dividida en bandas de 10 cm siguiendo la metodología de Davies et al. (2008). Para ello la barra se situó en posición vertical en el interior del cuadrado de 2x2 metros, a una distancia del 50 cm del centro del lado del cuadrado situado en curva de nivel en la parte inferior de la ladera. La barra se introdujo hasta llegar a la superficie del suelo mineral cubriendo, por tanto, la totalidad de la capa de hojarasca y mantillo. En cada banda de 10 cm se ha estimado visualmente la cobertura del matorral o de la capa de hojarasca y mantillo en porcentaje, distinguiendo entre especies y estado vegetativo (vivo o muerto). No se han considerado aquellas especies que no fueran leñosas. Además se ha estimado la altura de la capa de hojarasca y mantillo (h_{bmant}) y la altura total del matorral (h_{bm}), tomando como referencia para esta última la superficie de la capa de hojarasca y mantillo y las alturas de cada especie (Davies et al., 2008).

Con estos datos de cobertura de la banda de cada parcela se ha ajustado un modelo logístico:

$$p_i = \frac{e^{a+b \cdot h_i}}{1 + e^{a+b \cdot h_i}} \quad [1]$$

donde p_i es el tanto por uno de cobertura de la banda i ($i = 1$ a 20) e h_i es la altura a la que está el punto medio de la banda i cuando el matorral sobrepasa la banda en altura y, en el caso de que la altura del matorral no llegue a sobrepasar la banda (última banda parcialmente ocupada), entonces h_i es la altura del punto medio de la longitud obstruida de dicha banda. Por ejemplo, si el matorral llega hasta 67 cm de altura, la última banda con matorral obstruyendo su visión va de 60 a 70 cm y el valor de h_i para esta banda sería de 63.5 cm.

Una vez estimados los parámetros del modelo logístico de perfil de combustible de cada parcela se obtuvieron los valores de una serie de métricas (Davies et al., 2008) para cada una de ellas: 1) Canopy Density Index (CDI), que se corresponde con el valor del parámetro b que define la pendiente de la recta de la linealización de la ecuación [1] $\log(p_i/(1 - p_i)) = a + b \cdot h_i$; 2) Biomass Measure (BM), que se corresponde con el área bajo la curva del perfil obtenido por integración del modelo logístico entre 0 y la altura máxima del matorral; 3) la suma de los tantos por uno de obstrucción de matorral en cada banda para el total de la barra (obs_{acum}) y 4) el ratio entre la altura del mantillo y la altura total (r_{mant}).

3.4. Sistema de ecuaciones ajustado

Una vez estimadas para cada parcela tanto las cargas de las 7 fracciones de combustible como las métricas derivadas de las mediciones con la barra se procedió a ajustar un sistema de ecuaciones que permitan estimar dichas cargas de cada fracción usando como variables independientes las métricas derivadas de las mediciones con la barra.

Se decidió utilizar modelos alométricos ($Y = \beta_0 \cdot X_i^{\beta_i}$) y, en un primer paso, se procedió a ajustar la ecuación de cada fracción por separado. Para ello el modelo alométrico se linealizó empleando logaritmos y se seleccionó en cada caso el mejor conjunto de variables independientes (X_i) empleando el método stepwise. Una vez realizado ese paso se procedió a ajustar el sistema completo de siete ecuaciones no lineales simultáneamente para garantizar el principio de aditividad, es decir, que las estimaciones de una ecuación de carga que englobe varias fracciones coincida con la suma de las estimaciones de carga de cada una de las fracciones que la constituyen. El procedimiento empleado para garantizar la aditividad fue partir de la ecuación de carga total e ir desagregándola en cada uno de las fracciones que la constituyen siguiendo la metodología propuesta por Tang et al. (2001). De este modo, la expresión general de cada una de las siete ecuaciones se derivó de la siguiente manera:

- 1) En primer lugar se emplea una ecuación alométrica para estimar la carga total de combustible (matorral y mantillo) \widehat{W}_{m+mant} conjuntamente.

$$\widehat{W}_{m+mant} = a_0 \cdot X_i^{a_i} \quad [2]$$

- 2) Se definen otras dos ecuaciones alométricas para discriminar entre la carga del combustible de matorral (W_m) y la del mantillo (W_{mant}) por desagregación de la ecuación [2]:

$\widehat{W}_m = \exp[b_{0m} + b_{im} \log(X_i)]$ y $\widehat{W}_{mant} = \exp[b_{0mant} + b_{imant} \log(X_i)]$; por lo tanto:

$$\frac{\widehat{W}_m}{\widehat{W}_{m+mant}} = \frac{\widehat{W}_m}{(\widehat{W}_m + \widehat{W}_{mant})} = \frac{1}{1 + (\widehat{W}_{mant}/\widehat{W}_m)}$$

De este modo, la ecuación para estimar la carga de combustible de matorral fue:

$$\widehat{W}_m = \widehat{W}_{m+mant} \cdot \frac{1}{1 + \exp[b_0 + b_i \cdot \log(X_i)]} \quad [3]$$

siendo $b_0 = b_{0mant} - b_{0m}$ y $b_i = b_{imant} - b_{im}$; y la ecuación para la carga del mantillo fue:

$$\widehat{W}_{mant} = \widehat{W}_{m+mant} - \widehat{W}_m = \widehat{W}_{m+mant} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[b_0 + b_i \cdot \log(X_i)]} \right] \quad [4]$$

- 3) A continuación se desagrega la ecuación [3] para obtener dos ecuaciones que discriminen entre la carga de combustible de matorral grueso ($W_{m_{G23}}$) y fino ($W_{m_{G1}}$):

$\widehat{W}_{m_{G23}} = \exp[c_{0g23} + c_{ig23} \log(X_i)]$, y $\widehat{W}_{m_{G1}} = \exp[c_{0g1} + c_{ig1} \log(X_i)]$

$$\frac{\widehat{W}_{m_{G23}}}{\widehat{W}_m} = \frac{\widehat{W}_{m_{G23}}}{(\widehat{W}_{m_{G23}} + \widehat{W}_{m_{G1}})} = \frac{1}{1 + (\widehat{W}_{m_{G1}}/\widehat{W}_{m_{G23}})}$$

De este modo la ecuación de estimación de la carga de combustible grueso fue:

$$\widehat{W}_{m_{G23}} = \widehat{W}_m \cdot \frac{1}{1 + \exp[c_0 + c_i \cdot \log(X_i)]} \quad [5]$$

siendo $c_0 = c_{0g1} - c_{0g23}$ y $c_i = c_{ig1} - c_{ig23}$ y la de la carga de combustible fino fue:

$$\widehat{W}_{m_{G1}} = \widehat{W}_m - \widehat{W}_{m_{G23}} = \widehat{W}_m \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[c_0 + c_i \cdot \log(X_i)]} \right] \quad [6]$$

- 4) Finalmente, la desagregación de la ecuación [6] da lugar a dos ecuaciones que permiten discriminar entre la carga de combustible de matorral fino muerto ($W_{m_{G1_m}}$) y vivo ($W_{m_{G1_v}}$):

$\widehat{W}_{m_{G1_m}} = \exp[d_{0g1_m} + d_{ig1_m} \log(X_i)]$ y $\widehat{W}_{m_{G1_v}} = \exp[d_{0g1_v} + d_{ig1_v} \log(X_i)]$

$$\frac{\widehat{W}_{m_{G1_m}}}{\widehat{W}_{m_{G1}}} = \frac{\widehat{W}_{m_{G1_m}}}{(\widehat{W}_{m_{G1_m}} + \widehat{W}_{m_{G1_v}})} = \frac{1}{1 + (\widehat{W}_{m_{G1_v}}/\widehat{W}_{m_{G1_m}})}$$

Por tanto, la ecuación de estimación de la carga de combustible fino muerto fue:

$$\widehat{W}_{m_{G1_m}} = \widehat{W}_{m_{G1}} \cdot \frac{1}{1 + \exp[d_0 + d_i \cdot \log(X_i)]} \quad [7]$$

siendo $d_0 = d_{0g1_v} - d_{0g1_m}$ y $d_i = d_{ig1_v} - d_{ig1_m}$; y la ecuación de la carga de combustible fino vivo fue:

$$\widehat{W}_{m_{G1_v}} = \widehat{W}_{m_{G1}} - \widehat{W}_{m_{G1_m}} = \widehat{W}_{m_{G1}} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[d_0 + d_i \cdot \log(X_i)]} \right] \quad [8]$$

Como el número de parcelas de cada comunidad es limitado para poder ajustar el sistema a cada una de dichas comunidades por separado, se empleó la base de datos completa para ajustar el sistema. Sin embargo, para evaluar las diferencias entre comunidades, los parámetros del modelo se expandieron usando una relación lineal que incluye parámetros asociados con variables dummy para diferenciar entre comunidades:

$$\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{01}I_{Ea} + \alpha_{02}I_{Ug} + \alpha_{03}I_{Pt} \quad [9]$$

donde α_0 es el parámetro que se expande; α_{00} es un parámetro común para las cuatro comunidades; α_{0i} ($i = 1, \dots, 3$) es un parámetro asociado, e I_j ($j = Ea, Ug, Pt$) es una variable dummy cuyo valor es igual a 1 para la comunidad específica y 0 para el resto. Si el parámetro asociado resulta significativo en el ajuste ($\alpha=0.05$), entonces existen diferencias entre las comunidades asociadas a dicho parámetro.

Para evaluar problemas de multicolinealidad en los modelos se calculó el valor del número de condición y, de acuerdo con Myers (1990), valores mayores de $\sqrt{1000}$ indican problemas asociados con la multicolinealidad que requieren prescindir de variables independientes fuertemente correlacionadas. Por otro lado, para evitar problemas de heteroscedasticidad se determinó el valor del test de White (1980) y se realizó una inspección visual de los gráficos de residuos studentizados frente a valores predichos de las cargas. En el caso de detectar problemas de heteroscedasticidad se procederá a ponderar el ajuste empleando como pesos de cada observación la inversa de su varianza estimada, siguiendo la metodología propuesta por Harvey (1976).

El Sistema de siete ecuaciones (ecuaciones [2] a [8]) fue ajustado simultáneamente empleando la metodología NLSUR (Nonlinear Seemingly Unrelated Regression) para tener en cuenta las posibles correlaciones cruzadas entre los residuos de las diferentes fracciones de carga. El ajuste se realizó con el programa SAS/ETS® (2004). Para analizar la bondad del ajuste se estimaron dos estadísticos: el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [10]$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}} \quad [11]$$

donde y_i , \hat{y}_i e \bar{y} son los valores observado, predicho y medio de la variable dependiente y n es el número de datos empleados en el ajuste.

4. Resultados y discusión

La Tabla 3 muestra las ecuaciones obtenidas una vez realizado el ajuste simultáneo del sistema para la base de datos completa. En ningún caso se observaron problemas de multicolinealidad ni de heteroscedasticidad y todos los parámetros fueron significativos ($\alpha=0.05$).

Las variables independientes que forma parte del sistema de ecuaciones son las alturas estimadas sobre la barra del matorral (h_{bm}) y de la capa de hojarasca y mantillo (h_{bmant}) y el valor de *Biomass Measure* (BM), una métrica derivada del modelo logístico ajustado a las observaciones de obturación y que se corresponde con el área bajo la curva de dicho modelo. Aunque debido al tamaño de la muestra no fue posible ajustar el sistema de ecuaciones a cada una de las cuatro formaciones de matorral estudiadas, la inclusión de variables dummy para analizar diferencias entre ellas mostró diferencias significativas en los valores de dos o más parámetros en todas las ecuaciones ajustadas, lo que indica que sería necesario contar con una muestra de parcelas mayor para cada comunidad que permita ajustar el sistema de ecuaciones para cada una de ellas, lo que permitiría mejorar la exactitud de las estimaciones.

En la Figura 2 se muestran las gráficas de valores observados frente a valores predichos para cada una de las 7 fracciones a las que se ha ajustado una ecuación. Sobre dichas gráficas se han representado la diagonal (línea que correspondería con un ajuste perfecto) y la recta ajustada relacionando los valores observados con los predichos, mostrando también la expresión de dicha relación así como el valor del coeficiente de determinación (R^2) y de la raíz del error medio cuadrático del ajuste (REMC).

Tabla 3. Expresión final del sistema de ecuaciones ajustado simultáneamente para estimar la carga de cada fracción de combustible. $W_{m+mant.}$ = carga total de combustible (maorral + mantillo), W_m = carga total de combustible de matorral, $W_{mant.}$ = carga de mantillo, W_{m_G23} = carga de combustible grueso de matorral, W_{m_G1} = carga total de combustible fino de matorral total, $W_{m_G1_m}$ = carga de combustible fino muerto de matorral y $W_{m_G1_v}$ = carga de combustible fino vivo de matorral. I_j ($j = Ea, Pt, Ue, Ug$) = variable dummy cuyo valor es 1 para la comunidad específica a la que se refiere y 0 para el resto. Ea = *Erica australis*, Pt = *Pterospartum tridentatum*, Ue = *Ulex europaeus* y Ug = *Ulex gallii*/*Ulex minor*. BM = Biomass Measure o área bajo la curva del modelo logístico ajustado y h_{bmant} y h_{bm} son las alturas estimadas con la barra para la capa de mantillo y para el matorral, respectivamente.

Expresión	Par.	Estimador
$\widehat{W}_{m+mant} = a_0 \cdot BM^{a_1 I_{Ea+Pt}} \cdot h_{bmant}^{a_2} \cdot h_{bm}^{a_3 I_{Ug+Ue}}$	a_0	0.2251
	a_1	0.2748
	a_2	0.2468
	a_3	0.5855
$\widehat{W}_m = \widehat{W}_{m+mant} \frac{1}{1 + \exp[b_{00} + b_{01} I_{Ea+Pt+Ug} + b_1 \log(h_{bm}) I_{Ea+Pt+Ug} + b_2 \cdot \log(h_{bmant})]}$	b_{00}	-1.4335
	b_{01}	2.9891
$\widehat{W}_{mant} = \widehat{W}_{m+mant} \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[b_{00} + b_{01} I_{Ea+Pt+Ug} + b_1 \log(h_{bm}) I_{Ea+Pt+Ug} + b_2 \cdot \log(h_{bmant})]} \right]$	b_1	-0.6361
	b_2	0.4501
$\widehat{W}_{m_G23} = \widehat{W}_m \frac{1}{1 + \exp[c_{00} + c_{01} I_{Ea+Pt} + c_{02} I_{Ug} + c_{10} \log(h_{bm}) I_{Ea+Pt+Ue} + c_{11} \log(h_{bm}) I_{Ug}]}$	c_{00}	5.5094
	c_{01}	0.4673
	c_{02}	6.9077
$\widehat{W}_{m_G1} = \widehat{W}_m \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[c_{00} + c_{01} I_{Ea+Pt} + c_{02} I_{Ug} + c_{10} \log(h_{bm}) I_{Ea+Pt+Ue} + c_{11} \log(h_{bm}) I_{Ug}]} \right]$	c_{10}	-1.0216
	c_{11}	-2.4011
$\widehat{W}_{m_G1_m} = \widehat{W}_{m_G1} \frac{1}{1 + \exp[d_{00} + d_{01} I_{Pt} + d_{02} I_{Ue} + d_{10} \log(h_{bm}) + d_{11} \log(h_{bm}) I_{Pt} + d_{12} \log(h_{bm}) I_{Ug}]}$	d_{00}	2.0462
	d_{01}	-1.2293
	d_{02}	-0.5330
$\widehat{W}_{m_G1_v} = \widehat{W}_{m_G1} \left[1 - \frac{1}{1 + \exp[d_{00} + d_{01} I_{Pt} + d_{02} I_{Ue} + d_{10} \log(h_{bm}) + d_{11} \log(h_{bm}) I_{Pt} + d_{12} \log(h_{bm}) I_{Ug}]} \right]$	d_{10}	-0.2233
	d_{11}	0.1568
	d_{12}	-0.0905

Como se aprecia en las gráficas, las ecuaciones ajustadas explican una parte importante de la variabilidad observada, en la mayoría de los casos por encima del 70%, con valores que van desde el 46%, en el caso de la ecuación de estimación de la carga de combustible fino vivo de matorral, hasta casi el 88% de la ecuación de estimación de la carga de combustible grueso de matorral. En general, los modelos no presentan sesgo en sus estimaciones, salvo una ligera tendencia a subestimar para cargas bajas y sobreestimar para cargas altas en la ecuación de estimación de la carga de combustible fino vivo de matorral y a la inversa en la ecuación de estimación de la carga de combustible fino muerto de matorral.

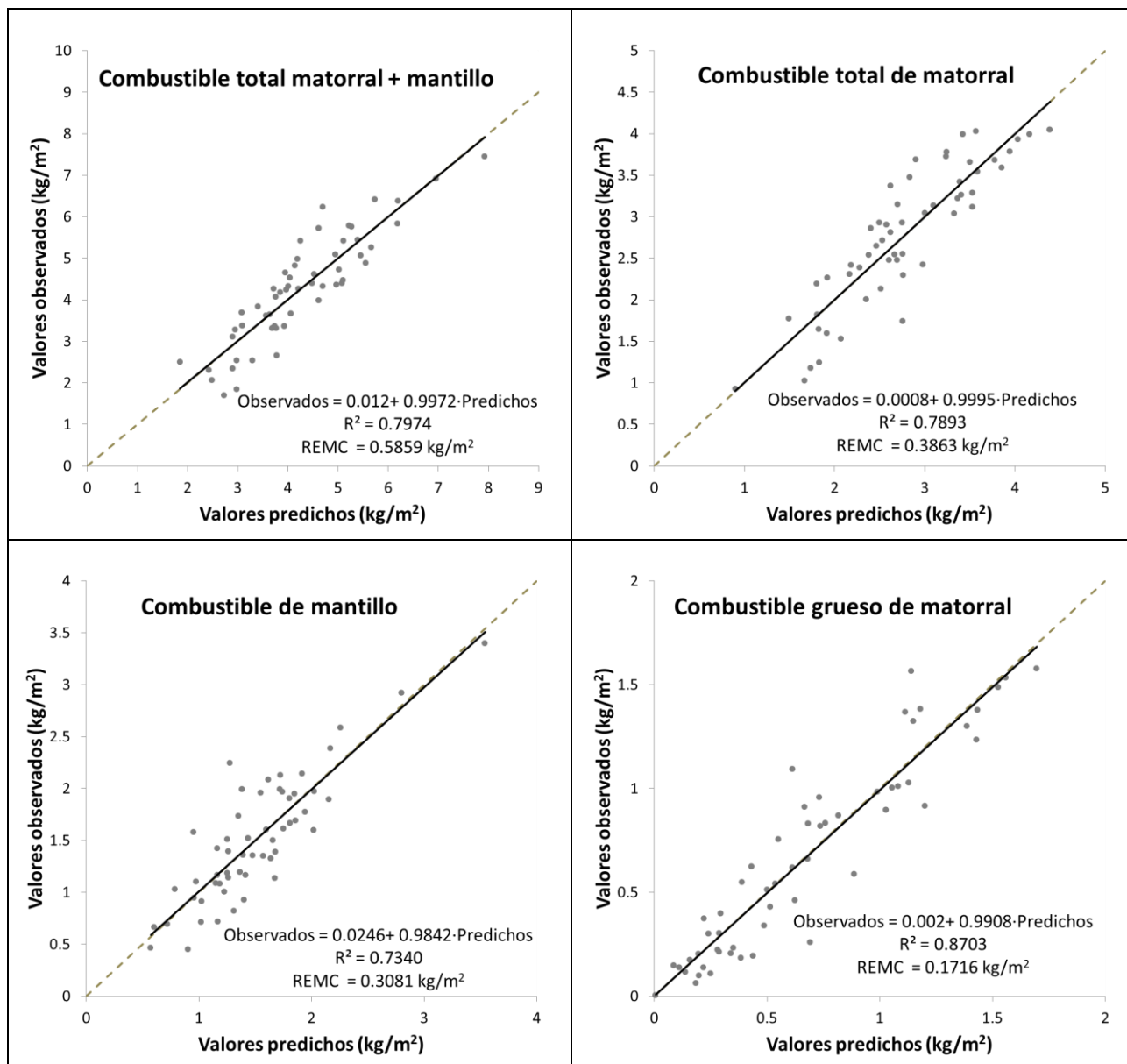


Figura 2. Valores observados frente a valores predichos de las cargas de las fracciones de combustibles ajustadas para el total de las parcelas analizadas. La línea punteada es la diagonal y la línea continua es la recta ajustada a los datos. R^2 es el coeficiente de determinación del ajuste de la recta de la figura y REMC es la raíz del error medio cuadrático.

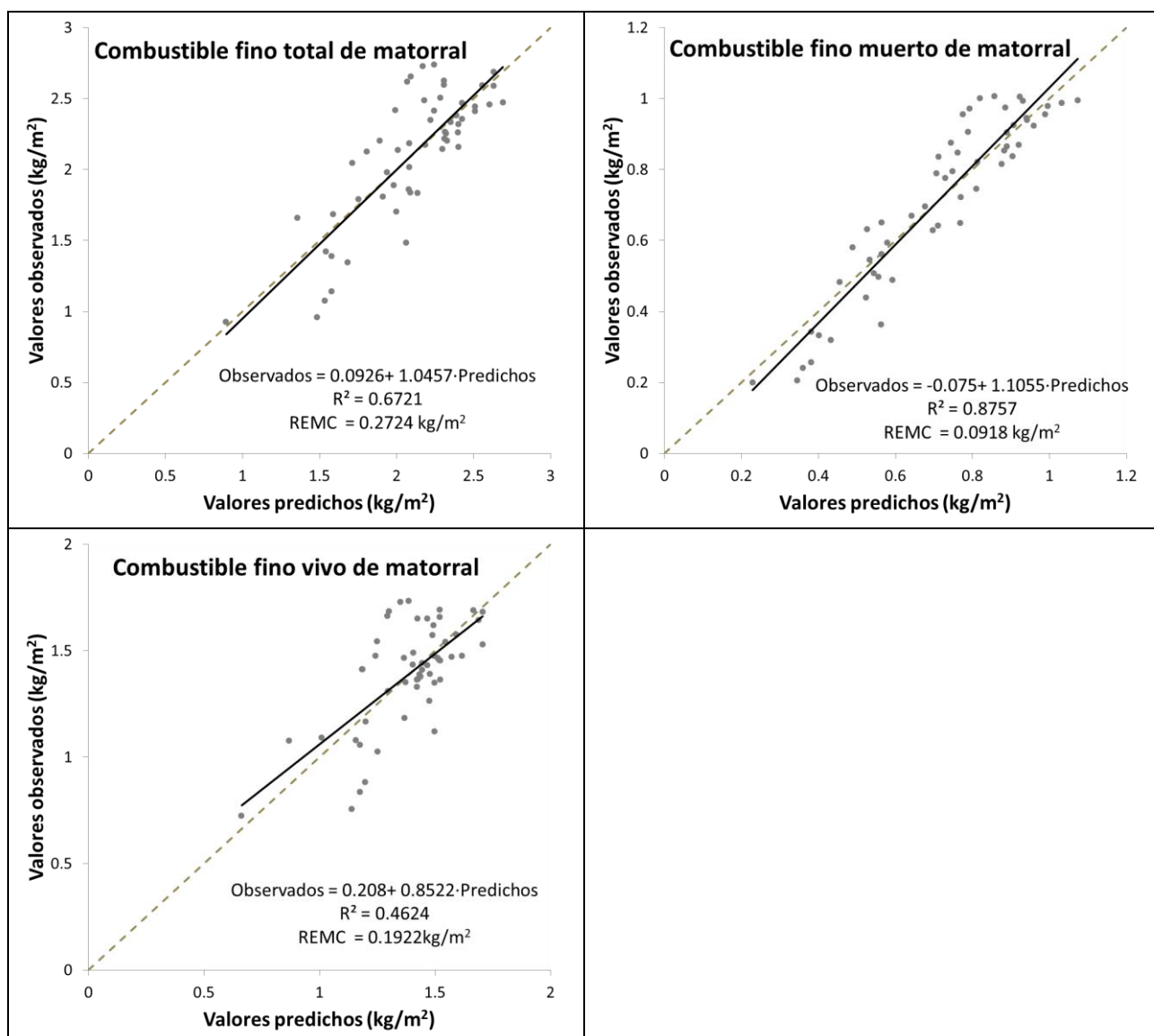


Figura 3. (continuación). Valores observados frente a valores predichos de las cargas de las fracciones de combustibles ajustadas para el total de las parcelas analizadas. La línea punteada es la diagonal y la línea continua es la recta ajustada a los datos. R^2 es el coeficiente de determinación del ajuste de la recta de la figura y REMC es la raíz del error medio cuadrático.

En general, los estadísticos de bondad del ajuste obtenidos son ligeramente inferiores a los obtenidos por Alonso-Rego et al. (2020), empleando la misma base de datos, al ajustar ecuaciones de estimación de estas mismas fracciones utilizando como variables independientes métricas derivadas de un único escaneo con láser terrestre (TLS). La única excepción es la ecuación de estimación de la carga de combustible de hojarasca y mantillo, que en este caso explica algo más del 73% de la variabilidad observada mientras que en el caso del modelo derivado de métricas del TLS únicamente explicó un 44% de la variabilidad observada. Una posible explicación de esta notable diferencia en la bondad de los ajustes para esta fracción es la fuerte correlación que existe entre la carga de mantillo y la profundidad de la capa de este combustible (Vega et al., 2022) y, mientras que la medición de dicha profundidad con la barra es sencilla y precisa, las nubes de puntos obtenidas del TLS no son de utilidad para caracterizar esta variable con exactitud (Alonso-Rego et al., 2020; Hudak et al., 2020).

5. Conclusiones

En Galicia, el abandono del terreno agrícola y la despoblación rural, entre otros factores, está provocando un fuerte incremento de la interfaz urbano-forestal, creando complejos mosaicos en los que predominan las formaciones de matorral propensas al fuego como las analizadas en este trabajo. La gestión eficaz de estos ecosistemas requiere cada vez más de cartografía detallada y precisa de combustibles que permitan comparar y priorizar diferentes estrategias de actuación preventiva y de restauración posterior. Para poder cumplir con estos requerimientos es necesario combinar información procedente tanto de inventarios de campo como de sensores remotos y los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que el uso de la metodología basada en la oclusión visual puede ser de gran utilidad como alternativa al inventario tradicional para inventariar estas comunidades con fiabilidad.

En todo caso hay que tener en cuenta que este es un estudio preliminar y que las cargas de combustibles han sido estimadas y no cuantificadas, por lo que es necesario obtener una muestra más completa que cubra todas las combinaciones de desarrollo vegetativo y calidad de estación de las comunidades analizadas y que incorpore también muestreo destructivo para, de este modo, poder obtener ecuaciones fiables para cada fracción de combustible por comunidad.

6. Bibliografía

AGER, A.A.; VAILLANT, N.M.; FINNEY, M.A. 2011. Integrating Fire Behavior Models and Geospatial Analysis for Wildland Fire Risk Assessment and Fuel Management Planning. *J. Combustion* art. 572452.

ALONSO-REGO, C.; ARELLANO-PÉREZ, S.; CABO, C.; ORDOÑEZ, C.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; DÍAZ-VARELA, R.A.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. 2020. Estimating Fuel Loads and Structural Characteristics of Shrub Communities by Using Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sens.* 12, 3704.

ARELLANO-PÉREZ, S. 2011. Modelos de combustibles forestales de Galicia. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España.

ARELLANO, S., VEGA, J.A., RUIZ-GONZÁLEZ, A.D., ARELLANO, A., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., VEGA-NIEVA, D., PÉREZ, E. 2017. Foto-guía de combustibles forestales de Galicia y comportamiento del fuego asociado; Andavira. Santiago de Compostela. España.

BONHAM, C.D. 2013. Measurements for terrestrial vegetation, 2ª Edición. Wiley-Blackwell. Oxford, United Kingdom.

CANFIELD, R.H. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *J. For.* 39, 388–394.

CATCHPOLE, W.R.; WHEELER, C.J. 1992. Estimating plant biomass: A review of techniques. *Aust. J. Ecol.* 17(2), 121–131.

CHANDLER, C.; CHENEY, P.; THOMAS, P.; TRABAUD, L.; WILLIAMS, D. 1983. Fire in Forestry. Volume 1. Forest Fire Behavior and Effects. John Wiley and Sons Inc. USA.

DAVIES, G.M.; HAMILTON, A.; SMITH, A.; LEGG, C.J. 2008. Using visual obstruction to estimate heathland fuel load and structure. *Int. J. Wildland Fire* 17(3), 380-389.

DE CÁCERES, M.; CASALS, P.; GABRIEL, E.; CASTRO, X. 2019. Scaling-up individual-level allometric equations to predict stand-level fuel loading in Mediterranean shrublands. *Ann. For. Sci.* 76, 87.

ESTORNELL, J.; RUIZ, L.A.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; FERNÁNDEZ-SARRÍA, A. 2011a. Estimation of shrub biomass by airborne LiDAR data in small forest stands. *For. Ecol. Manage.* 262, 1697-1703.

ESTORNELL, J.; RUIZ, L.A.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; HERMOSILLA, T. 2011b. Analysis of the factors affecting LiDAR DTM accuracy. *Int. J. Digit. Earth* 4(6), 521-538.

FINNEY, M.A.; SELI, R.C.; MCHUGH, CH.W.; AGER, A.A.; BAHRO, B.; AGEE, J. 2007. Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *Int. J. Wildland Fire* 16, 712-727.

GLENN, N.F.; SPAETE, L.P.; SANKEY, T.T.; DERRYBERRY, D.R.; HARDEGREE, S.P.; MITCHELL, J.J. 2011. Errors in LiDAR-derived shrub height and crown area on sloped terrain. *J. Arid Environ.* 75(4), 377-382.

HARVEY, A.C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44, 461-465.

HUDAK, A.T.; KATO, A.; BRIGHT, B.C.; LOUDERMILK, E.L.; HAWLEY, C.; RESTAINO, J.C.; OTTMAR, R.D.; PRATA, G.A.; CABO, C.; PRICHARD, S.J.; ROWELL, E.M.; WEISE, D.R. 2020. Towards spatially explicit quantification of pre- and post-fire fuels and fuel consumption from traditional and point cloud measurements. *For. Sci.* 66, 428-442.

JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; RUIZ-GONZÁLEZ, A.D.; GUIJARRO, M.; ALVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; MADRIGAL, J.; CUIÑAS, P.; HERNANDO, C.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M. 2013. Carbon emissions and vertical pattern of canopy fuel consumption in three *Pinus pinaster* Ait. active crown fires in Galicia (NW Spain). *Ecol. Eng.* 54, 202-209.

KOUTSIAS, N.; ALLGÖWER, B.; KALABOKIDIS, K.; MALLINIS, G.; BALATSOS, P.; GOLDAMMER, J.G. 2015. Fire occurrence zoning from local to global scale in the European Mediterranean basin: implications for multi-scale fire management and policy. *iForest* 9, 195-204.

LASSLOP, G.; KLOSTER, S. 2015. Impact of fuel variability on wildfire emission estimates. *Atmos. Environ.* 121, 93-102.

LI, A.; DHAKAL, S.; GLENN, N.F.; SPAETE, L.P.; SHINNEMAN, D.J.; PILLIOD, D.S.; ARKLE, R.S.; MCILROY, S.K. 2017. Lidar aboveground vegetation biomass estimates in shrublands: Prediction, uncertainties and application to coarser scales. *Remote Sens.* 9(9), 903.

MARM. 2011a. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. España.

MARM. 2011b. Mapa Forestal de España. Escala 1:25.000. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Madrid, España.

MONTERO, G.; LÓPEZ-LEIVA, C.; RUIZ-PEINADO, R.; LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; ONRUBIA, R.; PASALODOS, M. 2020. Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. España.

MYERS, R.H. 1990. Classical and modern regression with applications, 2nd edition; Duxbury Press: California, USA.

PYNE, S.J.; ANDREWS, P.L.; LAVEN, R.D. 1996. Introduction to wildland fire, 2nd Edition. John Wiley and Sons Inc. USA.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; PALACIOS-ORUETA, A.; BASTARRIKA, A. 2002. Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Can. J. For. Res.* 32, 1301–1315.

SAN MIGUEL-AYANZ, J.; DURRANT, T.; BOCA, R.; LIBERTÀ, G.; BRANCO, A.; DE RIGO, D.; FERRARI, D.; MAIANTI, P.; ARTÉS VIVANCOS, T.; OOM, D.; PFEIFFER, H.; NUIJTEN, D.; LERAY, T. 2019. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018. JRC Technical Report EUR 29856 EN.

SAS INSTITUTE INC. 2004. SAS/ETS® 9.1 User's Guide; SAS Institute Inc: Cary, NC, USA.

TANG, S.; LI, Y.; WANG, Y. 2001. Simultaneous equations, error-invariable models, and model integration in systems ecology. *Ecol. Model.* 142, 285–294.

VEGA, A.; ARELLANO-PÉREZ, s.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; FERNÁNDEZ, C.; JIMÉNEZ, E.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA-NIEVA, D.J.; BRIONES-HERRERA, C.; ALONSO-REGO, C., FONTÚRBEL, T., RUIZ-GONZÁLEZ, A.D. 2022. Modelling aboveground biomass and fuel load components at stand level in shrub communities in NW Spain. *For. Ecol. Manage.* 505, 119926.

VIANA, H.; ARANHA, J.; LOPES, D.; COHEN, W.B. 2012. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. *Ecol. Model.* 226, 22-35.

WHITE, H. 1980. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica* 48(4), 817-838.

XUNTA DE GALICIA. 2019. Plan de prevención y defensa contra los incendios forestales de Galicia –PLADIGA-. Consellería do Medio Rural. Santiago de Compostela. España.