

García, M.; Oliva, P.; Carbone, A.; Baissero, A.; Chuvieco, E. Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales

Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales

García, Mariano ¹ Oliva, Patricia ¹ Carbone, Andrea ² Baissero, Adrián ¹ Chuvieco, Emilio ¹

¹ Universidad de Alcalá, España

² Sapienza Università di Roma

ORCID: García 0000-0001-6260-5791 Oliva 0000-0001-5051-3662 Carbone 0000-0002-1119-060X
Baissero 0009-0004-9431-1869 Chuvieco 0000-0001-5618-4759

Correspondencia: mariano.garcia@uah.es patricia.oliva@uah.es and.carbone@uniroma1.it adrian.baissero@uah.es
emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

En este trabajo se evalúan las estimaciones de biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado mediante el uso de datos LiDAR aeroportados y datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares, aunque la estimación de biomasa consumida varió considerablemente debido a las distintas fracciones de biomasa consideradas. La estimación de biomasa aérea consumida con datos LiDAR aeroportados fue de 138 Gg y con un valor de eficiencia de quemado de 0.38. La estimación de biomasa consumida con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, considerando la biomasa foliar como combustible disponible fue de 14 Gg, y el valor de eficiencia de quemado obtenido fue de 0.32.





Palabras clave: LiDAR aeroportado; GEDI; Sentinel-1, Sentinel-2, eficiencia de quemado, biomasa consumida

Fecha de recepción: 6 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 6 febrero 2026


Estimación de la biomasa consumida y del factor de eficiencia de quemado utilizando datos LiDAR aéreos y de satélite multitemporales

García, Mariano ⁽¹⁾, Oliva, Patricia ⁽¹⁾, Carbone, Andrea ⁽²⁾, Baissero, Adrián ⁽¹⁾, Chuvieco, Emilio ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Alcalá, España.

 0000-0001-6260-5791, mariano.garcia@uah.es;  0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es.
 0009-0004-9431-1869, adrian.baissero@uah.es;  0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es.

⁽²⁾ Sapienza Università di Roma.

 0000-0002-1119-060X, and.carbone@uniroma1.it.

Resumen: En este trabajo se evalúan las estimaciones de biomasa consumida, aérea total y foliar, y del factor de eficiencia de quemado mediante el uso de datos LiDAR aeroportados y datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares, aunque la estimación de biomasa consumida varió considerablemente debido a las distintas fracciones de biomasa consideradas. La estimación de biomasa aérea consumida con datos LiDAR aeroportados fue de 138 Gg y con un valor de eficiencia de quemado de 0.38. La estimación de biomasa foliar consumida con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, considerando la biomasa foliar como combustible disponible, fue de 14 Gg, y el valor de eficiencia de quemado obtenido fue de 0.32.

Palabras clave: LiDAR aeroportado, GEDI, Sentinel-1, Sentinel-2, eficiencia de quemado, biomasa consumida

Estimation of consumed biomass and burning efficiency using multitemporal airborne and satellite LiDAR

Abstract: *This study evaluates the estimation of biomass consumed, both aboveground and foliage biomass, and the burning efficiency factor using airborne LiDAR data and GEDI data integrated with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Both approaches showed similar spatial patterns, although the biomass consumption estimates varied considerably due to the different biomass fractions considered. The estimate of above-ground biomass consumed derived from airborne LiDAR data was 138 Gg, associated with a burning efficiency value of 0.38. The estimate of foliage biomass consumed using GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data, considering foliar biomass as available fuel, was 14 Gg, and the burning efficiency obtained was 0.32.*

Keywords: *Airborne LiDAR, GEDI, Sentinel-1, Sentinel-2; burning efficiency, biomass consumed.*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen un proceso natural que desempeña un papel fundamental en el ciclo de carbono (C) mediante la emisión directa de C a la atmósfera durante la quema de biomasa, emitiendo anualmente 3,4 Pg C año⁻¹ (van der Werf et al. 2025), lo que equivale a aproximadamente un 34% de las emisiones por combustibles fósiles.

La cuantificación de las emisiones de C procedentes de la quema de biomasa mediante teledetección puede realizar mediante un enfoque top-down a través de mediciones directas de los gases traza liberados durante el incendio (Zheng et al. 2021), o mediante un enfoque indirecto de modelización bottom-up, en el que las observaciones de área quemada se combinan con

información sobre la biomasa del ecosistema y la eficiencia de quemado (Seiler and Crutzen 1980):

$$C_e = BA * AGB * f_c * \beta \quad (1)$$

donde C_e representa el carbono emitido (Mg), BA es el área quemada (ha), AGB es la biomasa aérea (Mg ha⁻¹), f_c es la fracción de biomasa aérea correspondiente a C y β es el factor de eficiencia de quemado (EQ), es decir, la fracción de biomasa consumida durante el incendio. Es común utilizar valores promediados por bioma para la EQ, lo que impide capturar la alta variabilidad espacial inherente a los combustibles forestales (van Leeuwen et al. 2014) y, por tanto, la biomasa consumida por los incendios.

Los datos multitemporales de teledetección, particularmente datos LiDAR, ofrecen una alternativa

para proporcionar información precisa, especialmente explícita de la EQ y mejorar las estimaciones de las emisiones de C producidas por los incendios forestales. Diversos estudios han mostrado el potencial de los datos LiDAR aeroportados para estimar la biomasa consumida por los incendios forestales, tanto área (AGB) como foliar (BF) (McCarley et al. 2024; Garcia et al. 2017), a partir de la cual es posible obtener la EQ (Garcia et al. 2017). Sin embargo, la cobertura espacio-temporal de los datos aeroportados es limitada, dificultando su uso para estimar el consumo de biomasa y la EQ. Los datos sensor GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) a bordo de la estación espacial internacional, pueden mitigar estas limitaciones para estimar la biomasa consumida por los incendios forestales (Cui et al. 2025).

El objetivo principal de este trabajo es estimar la biomasa consumida, aérea y foliar, en un incendio forestal y derivar valores de EQ a partir de datos LiDAR aeroportados y GEDI.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde al incendio forestal de Pinofranqueado, en Cáceres (Fig. 1), el cual se inició el 17 de mayo de 2023 y se extendió rápidamente a las comarcas de Las Hurdes y Sierra de Gata, afectando a un total de 10.863,79 hectáreas, de las cuales 8.265,75 ha eran bosques de pino marítimo (*Pinus pinaster*) (MITECO 2021). La zona afectada también se solapa con áreas de la red Natura 2000, incluida la Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) de Sierra de Gata y Valle de las Pilas (EEA, 2023).

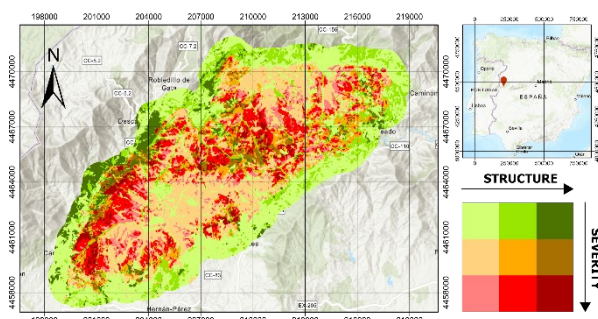


Figura 1. Mapa de la zona de estudio mostrando el área afectada y un buffer exterior de 1 km

2.1.1. Datos

La selección del área de estudio vino motivada por la disponibilidad de datos LiDAR-PNOA aeroportados pre-incendio, tomados entre 10/2018 y 03/2019 con una densidad media de puntos para la zona de estudio de 5,9 p/m²; y post-incendio, tomados entre 06/2023 y 09/2023 con una densidad media de puntos de 6,2 p/m².

En el caso de los datos GEDI, se seleccionaron las huellas utilizando una ventana temporal de ±3 meses desde la fecha del incendio para evitar ruido generado por cambios en la estructura producido por la gestión post-incendio y no por el propio incendio.

Adicionalmente, se realizó una campaña de campo entre el 9 y el 13 de septiembre de 2024 en la que se midieron 17 parcelas (r=17 m). Se tomaron medidas dasométricas (diámetro a la altura del pecho —DAP— de todos los árboles con DAP > 7,5 cm y altura de 20 individuos por parcela), y se identificaron las especies. Las parcelas se escanearon con LiDAR terrestre (TLS) desde cinco estaciones para reducir los efectos de oclusión. Además, se realizó una estimación visual de la biomasa consumida por el incendio para distintas fracciones de biomasa (Davies et al. 2016).

2.2. Estimación de biomasa a partir de datos LiDAR terrestre

Las medidas TLS fueron empleadas para obtener valores de biomasa de referencia para posteriormente calibrar los modelos basados en LiDAR aeroportado. Para ello, primero se segmentaron los árboles individuales, se obtuvo el DAP y se aplicaron las ecuaciones alométricas correspondientes para las especies presentes en las parcelas. En el caso de la situación post-incendio, los valores de AGB de cada parcela se obtuvieron restando a los valores de AGB pre-incendio el porcentaje de biomasa consumido correspondiente a cada fracción de biomasa, de acuerdo con las estimaciones visuales realizadas en campo.

2.3. Estimación de biomasa consumida y EQ con datos LiDAR aeroportado

La estimación de la biomasa aérea consumida y EQ con datos LiDAR aeroportados se basó en la diferencia entre la biomasa aérea estimada antes y después del evento. Para ello fue necesario calibrar un modelo empírico para cada una de las situaciones consideradas. Se utilizó un modelo semi-mecanicista (eq. 2) propuesto por Zhao et al. (2018):

$$AGB = \int k(h) \cdot p(h)dh = \Delta h \cdot \sum k_i p_i \quad (2)$$

Donde $k(h)$ es una función no decreciente de la altura, y $p(h)$ es el perfil de altura de la vegetación.

Para la calibración de los modelos se emplearon 14 parcelas de las 17 disponibles, debido a errores en los datos LiDAR en 3 de las parcelas. Debido al bajo número de parcelas disponibles, los modelos utilizados se validaron mediante una validación cruzada *leave-one-out* (LOOCV).

La AGB consumida se calculó mediante la diferencia entre ambas coberturas, mientras que el EQ se obtuvo como la diferencia relativa con respecto a los valores de biomasa pre-incendio. La estimación de AGB consumida se convirtió a valores de CO₂ equivalente convirtiendo los valores de AGB a carbono mediante un factor de conversión de 0,5, y multiplicando el resultado por 3,67 para obtener el CO₂ equivalente.

2.4. Estimación de biomasa consumida y EQ con datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2

En el caso de los datos GEDI, el error en la localización de las huellas superior a 10 m dificulta su relación con las parcelas medidas en campo, tanto para calibrar modelos específicos para el área de estudio como para validar el producto global L4A. Por tanto, se consideró el

combustible de copa disponible, el cual representa la fracción de biomasa que arde en un incendio activo, determinado por la BF (García et al. 2012). Esta fracción de biomasa puede obtenerse a partir de los datos GEDI como el cociente entre el índice de área foliar (LAI) y el área foliar específica (SLA) sin necesidad de calibrar modelos empíricos (ecuación 3). El producto GEDI-L2B ofrece una estimación de LAI, o más concretamente el índice de área de planta (PAI) al no discriminar hojas de ramas, basado en la ley de Beer-Lambert que relaciona la energía transmitida con el índice de área foliar y un coeficiente de extinción. La ventaja de este enfoque físico es que no requiere ajustar modelos empíricos, por lo que tiene mayor capacidad de generalización.

Debido a las características de muestreo del sensor GEDI, para obtener información espacialmente explícita de PAI, se entrenó una red neuronal convolucional (CNN), con una estructura U-Net, utilizando datos Sentinel-1 y Sentinel-2 como variables predictoras. En este caso se entrenó un único modelo incluyendo los datos pre- y post-incendio. La arquitectura de la red CNN empleada consistió en cinco bloques de kernels convolucionales 3x3, seguidos de una capa maxpooling de tamaño 2. Se utilizó una función de activación ReLU para las capas funcionales y una función de activación lineal en la capa de salida.

Una vez obtenido el PAI, se calculó la biomasa foliar como (Eq. 3):

$$BF = PAI/SLA \quad (3)$$

Los valores de SLA se obtuvieron a partir del Global Leaf Trait (Moreno-Martínez et al. 2018) disponible en Google Earth Engine.

Una vez obtenida la BF pre- y post-incendio, con una resolución espacial de 25 m, se calculó el consumo de biomasa y EQ de la misma manera que para los datos LiDAR aeroportados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estimación de AGB con TLS, a nivel de árbol individual, ofreció unos buenos resultados (tabla 1) con valores de R² superiores a 0,85 y rRMSE menores al 25%. En el caso de los resultados post-incendio, la severidad afectó a los resultados obtenidos, siendo ligeramente peores para niveles de severidad alto.

Tabla 1. Resultados obtenidos para los modelos de estimación de AGB a partir de los datos LiDAR terrestre.

Model	R ²	rRMSE (%)
Pre-fire	0,92	23
Post-fire	0,87-0,93	18-22

Los modelos obtenidos para estimar la AGB pre- y post-incendio ofrecieron unos resultados robustos (tabla 1), ligeramente superiores en el caso pre-incendio.

Tabla 2. Resultados obtenidos para los modelos de estimación de AGB a partir de los datos LiDAR aeroportados.

Model	R ²	RMSE (Mg ha ⁻¹)	rRMSE (%)
Pre-fire	0,80	7,86	12,89
Post-fire	0,71	9,72	16,47

La estimación de AGB consumida por el incendio fue de 138 Gg, lo que equivale a unas emisiones de CO₂ equivalente de 506 Gg, y unos valores de EQ de 0,38. La figura 2A muestra la distribución de los valores de EQ en la zona afectada por el incendio obtenidos a partir de LiDAR aeroportado.

En el caso de las estimaciones basadas en datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2, el modelo para estimar PAI ofreció un rendimiento moderado (R²=0.4 y MAE=14.3 m²/m²).

La estimación de biomasa consumida por el incendio fue de 14 Gg, lo que equivale a unas emisiones de CO₂ equivalente de 51,3 Gg, y unos valores de EQ de 0,32. La figura 2B muestra la distribución de los valores de EQ obtenidos a partir de GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2.

Los valores de emisiones obtenidos varían en un orden de magnitud en función de la fracción de biomasa considerada. Aplicando ecuaciones alométricas, se observó que la biomasa foliar representa aproximadamente el 10% de la biomasa total aérea. A pesar de la gran diferencia en las emisiones obtenidas en función de la fracción de biomasa considerada, los valores de EQ obtenidos con ambos enfoques, así como los patrones espaciales, fueron similares (figura 2).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la capacidad de los datos LiDAR aeroportados y de los datos GEDI integrados con datos Sentinel-1 y Sentinel-2 para estimar la biomasa consumida y los valores de EQ. Ambos enfoques mostraron patrones espaciales similares y valores de EQ parecidos. Sin embargo, los valores de emisiones de C obtenidos difirieron en un orden de magnitud como consecuencia de las distintas fracciones de biomasa consideradas. Por tanto, a la hora de cuantificar las emisiones producidas por los incendios es importante tener en cuenta la fracción de biomasa a considerar. La extensión de este trabajo a otras zonas de estudio permitiría establecer valores de EQ por tipo de vegetación y mejorar las estimaciones de las emisiones producidas por incendios a partir del área quemada y la fracción de biomasa pre-incendio.

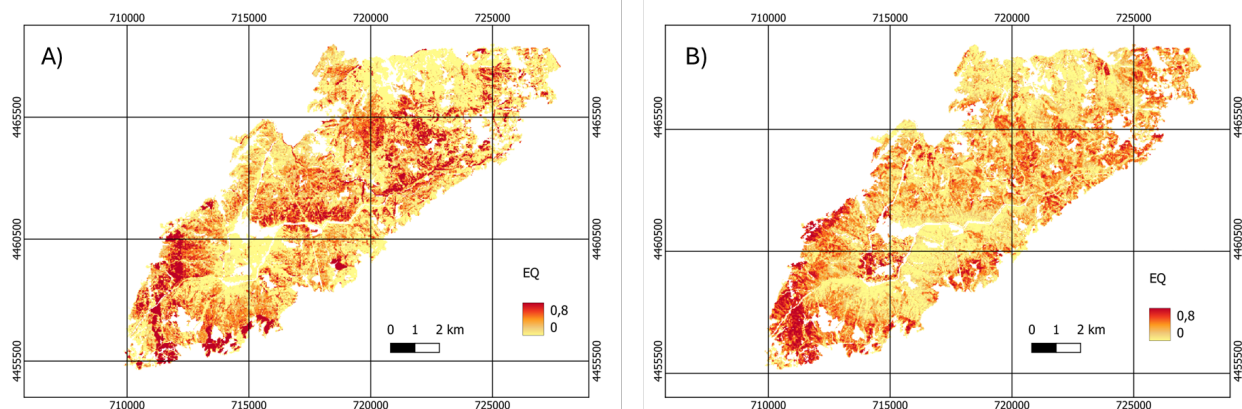


Figura 2: Distribución espacial de los valores de EQ obtenidos a partir de datos LiDAR aeroportado (A) y datos GEDI, Sentinel-1 y Sentinel-2 (B).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado como parte del proyecto FireCCI+ de la Agencia Espacial Europea (Nº 4000126706/19/I-NB).

6. REFERENCIAS

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (2023). Natura 2000 dataset: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Cui, L., Xu, X., & Chen, S. (2025). Estimating biomass consumption and carbon emissions by integrating GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 178, 113889

Davies, G.M., Domènech, R., Gray, A., & Johnson, P.C.D. (2016). Vegetation structure and fire weather influence variation in burn severity and fuel consumption during peatland wildfires. *Biogeosciences*, 13, 389-398

García, M., Popescu, S., Riaño, D., Zhao, K., Neuenschwander, A., Agca, M., & Chuvieco, E. (2012). Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 123, 81-89

García, M., Saatchi, S., Casas, A., Koltunov, A., Ustin, S., Ramirez, C., Garcia-Gutierrez, J., & Balzter, H. (2017). Quantifying biomass consumption and carbon release from the California Rim fire by integrating airborne LiDAR and Landsat OLI data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122, 340-353

McCarley, T.R., Hudak, A.T., Bright, B.C., Cronan, J., Eagle, P., Ottmar, R.D., & Watts, A.C. (2024). Generating fuel consumption maps on prescribed fire experiments from airborne laser scanning. *International Journal of Wildland Fire*, 33

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2024). Mapa Forestal de España 1:25.000 (MFE25). Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación.

Moreno-Martínez, Á., Camps-Valls, G., Kattge, J., Robinson, N., Reichstein, M., van Bodegom, P., Kramer, K., Cornelissen, J.H.C., Reich, P., Bahn, M., Niinemets, Ü., Peñuelas, J., Craine, J.M., Cerabolini, B.E.L., Minden, V., Laughlin, D.C., Sack, L., Allred, B., Baraloto, C., Byun, C., Soudzilovskaia, N.A., & Running, S.W. (2018). A methodology to derive global maps of leaf traits using remote sensing and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 218, 69-88

Seiler, W., & Crutzen, P.J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, 2, 207-247

van der Werf, G.R., Randerson, J.T., van Wees, D., Chen, Y., Giglio, L., Hall, J., Vernooij, R., Mu, M., Binte Shahid, S., Barsanti, K.C., Yokelson, R., & Morton, D.C. (2025). Landscape fire emissions from the 5th version of the Global Fire Emissions Database (GFED5). *Scientific Data*, 12, 1870

van Leeuwen, T.T., van der Werf, G.R., Hoffmann, A.A., Detmers, R.G., Rücker, G., French, N.H.F., Archibald, S., Carvalho Jr, J.A., Cook, G.D., de Groot, W.J., Hély, C., Kasischke, E.S., Kloster, S., McCarty, J.L., Pettinari, M.L., Savadogo, P., Alvarado, E.C., Boschetti, L., Manuri, S., Meyer, C.P., Siegert, F., Trollope, L.A., & Trollope, W.S.W. (2014). Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database. *Biogeosciences*, 11, 7305-7329

Zhao, K., Suarez, J.C., Garcia, M., Hu, T., Wang, C., & Londo, A. (2018). Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 204, 883-897

Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Chuvieco, E., Chen, Y., & Yang, H. (2021). Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Science Advances*, 7, eabh2646