

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SUMIDERO DE LAS FORMACIONES VEGETALES ARAGONESAS

ANTECEDENTES

El Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil de emergencias por incendios forestales, estableció la necesidad de revisar la normativa vigente aragonesa en materia de protección civil de emergencias por incendios forestales.

Dicha revisión debía incluir, entre otros aspectos, una zonificación del territorio en base al riesgo de incendios forestales, cuya delimitación, de acuerdo con la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, correspondía a las comunidades autónomas.

En este cometido, el Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón, a través del equipo de planificación y coordinación preventiva de incendios forestales, desarrolló una metodología para la delimitación de las Zonas de Alto y Medio Riesgo por incendios forestales (en adelante ZAR) en Aragón, fundamentada sobre dos pilares, la peligrosidad y la importancia de protección.

Entre los múltiples servicios proporcionados por los ecosistemas forestales, la fijación de carbono resulta, en el contexto actual de cambio climático, determinante para reducir las emisiones de carbono y contribuir a alcanzar los objetivos establecidos por el Acuerdo de París y la Agenda 2030.

Atendiendo a la trascendencia del papel de los bosques como sumidero de carbono y el riesgo que supone la pérdida del mismo, éste fue considerado entre los factores que integran la importancia de protección en la delimitación territorial del riesgo por incendio forestal.

En este contexto, se elaboró la cartografía de carbono acumulado en las formaciones vegetales, tanto arboladas como no arboladas en Aragón, la cual viene a cubrir la necesidad de disponer de esta información, con el fin de conocer en un futuro y a través del análisis multitemporal, la contribución del sector del cambio de uso de la tierra y la silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés) a la mitigación de las emisiones de CO₂.



OBJETIVO

Disponer de información sobre la cantidad de carbono acumulado en las formaciones vegetales aragonesas, a partir de la estimación de la cantidad de biomasa presente en las distintas fracciones de las formaciones vegetales de todo tipo, arboladas y no arboladas, como base para la evaluación periódica de su capacidad de sumidero.

METODOLOGÍA

La estimación de la cantidad de biomasa a partir de información ofrecida por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (en adelante PNOA), del Instituto Geográfico Nacional; se abordó mediante técnicas estadísticas y se estructuró en dos fases.

La primera fase consistió en la obtención de una serie de variables independientes para todo el territorio aragonés, a partir de la información ofrecida por el PNOA, más concretamente, información LiDAR (Light Detection and Ranging) y ortoimágenes. La segunda fase consistió en la obtención, sobre parcelas de campo, de un conjunto de variables objetivo (variables dependientes), correlacionándose, posteriormente, en modelos de regresión.

Estimación de variables dasométricas a partir de información PNOA

El PNOA proporciona periódicamente una cobertura completa, homogénea y continua del territorio español, basada en ortofotografías e información LiDAR de alta resolución; la información correspondiente al territorio aragonés, y empleada en este trabajo, corresponde al PNOA¹ del año 2010.

El LiDAR es un sistema activo de detección remota basado en un escáner láser. Los sensores activos, son aquellos que emiten energía sobre el objeto y reciben la señal reflejada por el mismo. La base teórica de la tecnología LiDAR se fundamenta en la medida del tiempo de retorno de los pulsos de luz emitidos por el sensor, a partir de la cual es posible determinar la distancia recorrida por cada pulso de luz. En base a esta información es posible determinar la elevación de los objetos sobre la superficie del terreno, derivándose el Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

¹ más información sobre el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) en <http://pnoa.ign.es/presentacion>



La razón por la que la tecnología LiDAR constituye una herramienta de gran utilidad en el ámbito forestal, es la capacidad multi-retorno de un mismo pulso de luz. La incidencia del pulso sobre una superficie sólida se refleja de forma unívoca, es decir, un pulso un retorno, mientras que la incidencia del pulso sobre una cubierta vegetal se refleja en múltiples retornos, correspondientes a la incidencia del pulso sobre los distintos estratos de la cubierta vegetal.

A partir de la información LiDAR se derivó el MDE de 10 metros de resolución, previa depuración de la nube de puntos LiDAR, constituida por los retornos de los pulsos de luz, con el fin de eliminar los considerados como ruido por su anormal comportamiento, y posterior clasificación de los retornos depurados en las categorías “suelo” y “no suelo”, en función del comportamiento multiretorno de los pulsos de luz.

La normalización de la nube de puntos LiDAR, consiste en la transformación de las alturas elipsoidales de cada punto, establecidas en el MDE, en altura respecto al suelo (*Figura 1*), obteniendo una capa de resolución espacial de 10 metros con la información sobre la altura y estructura de los elementos dispuestos sobre la superficie del terreno.

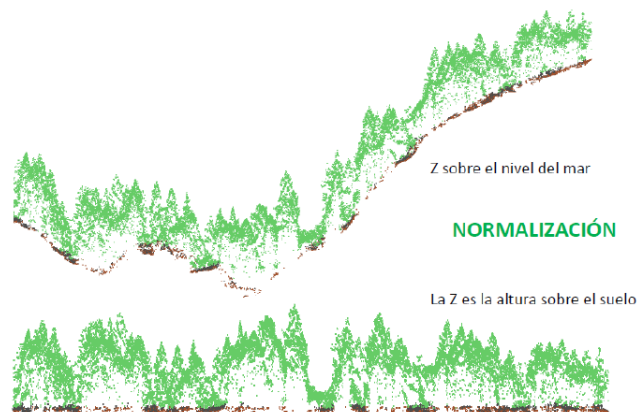


Figura 1. Normalización de la nube de puntos LiDAR

Una vez normalizada la nube de puntos LiDAR, se extrajeron un conjunto de estadísticos LiDAR (variables independientes) para todo el territorio, a 10 metros de resolución. Adicionalmente, con el fin de discriminar entre zonas vegetadas y no vegetadas, incluso entre formaciones de pasto-matorral y formaciones arboladas, se calculó el Normalized Difference Vegetation Index, también conocido como NDVI, a partir de las ortofotografías proporcionadas por el PNOA en el año 2012 a resolución 0,5 metros. El NDVI es un índice ampliamente extendido en el análisis de la vegetación, basado en la estrecha relación de este



índice con la actividad fotosintética. Con la información del NDVI contenida en cada píxel de 10 metros, se calcularon una serie de estadísticos NDVI (variables independientes).

Estimación de variables dasométricas a partir de datos obtenidos en campo

Los datos del tercer Inventario Forestal Nacional (en adelante, IFN3) ofrecían buena información del estrato arbolado, pero carecían de la información adecuada en relación al estrato arbustivo y herbáceo, al resultar dispersa y difícil de homogeneizar. Concretamente, las quercíneas eran consideradas en el estrato arbolado como pies menores o regenerado, careciendo de información sobre su altura. Por este motivo a las parcelas seleccionadas del IFN3 -mediante el filtrado basado en la homogeneidad de la parcela y su entorno, analizada sobre ortoimágenes-, se añadieron las realizadas a través de un inventario de campo específico, consistente en la toma de datos sobre parcelas en las que la vegetación diese lugar a estructuras de vegetación homogéneas.

El muestreo específico consistió en 146 parcelas en las que se recopiló información sobre fracción de cubierta cubierta (FCC) por estratos definidos según altura de la vegetación, diámetro normal de los pies presentes en la parcela, altura dominante del estrato arbóreo, altura de la primera rama viva y muerta, así como otra información relevante.

A partir de la información obtenida en campo, se calcularon una serie de variables (dependientes) (*Tabla 1*), para evaluar el posible ajuste de todas ellas con la información proporcionada por los estadísticos LiDAR y los estadísticos NDVI (variables independientes) en esas mismas parcelas.



Tabla 1. Variables calculadas a partir de la información de campo (v. dependientes) para el conjunto de parcelas

Variable	Significado
FCC _{matorral > 1,20 m} (%)	FCC en el estrato 120-400 cm. Calculada como la suma de la FCC para los estratos 4 y 5.
FCC _{tot}	FCC de la parcela. Calculada como la suma de la FCC de los estratos 0, 1, 2, 3, y 4.
Carga _{tot}	Carga de combustible presente en la parcela. Calculada como: $\sum_{i=\text{estrato}}^{0-5} \frac{FCC_i}{100} \cdot H_m$
H _{matorral y pastizal} (cm)	Altura media del pastizal y el matorral presente en la parcela. Calculada como: $\sum_{i=\text{estrato}}^{1-5} \frac{FCC_i}{\sum_i^{1-5} FCC_i} \cdot H_m$
H _{matorral >30 cm} (cm)	Altura media del matorral con altura mayor o igual a 30 cm presente en la parcela. Calculada como: $\sum_{i=\text{estrato}}^{2-5} \frac{FCC_i}{\sum_i^{2-5} FCC_i} \cdot H_m$
H _{máx matorral} (cm)	Altura máxima del matorral presente en la parcela. Calculada como altura media del estrato superior de matorral presente en la parcela.
Dg (cm)	Diámetro cuadrático medio de los pies arbóreos (altura ≥400cm) presentes en la parcela.
N (pies/ha)	Densidad pies arbóreos (altura ≥400cm) presentes en la parcela.
Discont _{mat-arb} (m)	Diferencia entre la altura media del matorral y la primera rama.
Discont _{mat-max-arb} (m)	Diferencia entre la altura máxima del matorral y la primera rama.

*Se definen 6 estratos de altura de la vegetación: E0: Suelo desnudo u hojarasca, E1: <30cm E2: 30-59 cm, E3: 60-119 cm, E4: 120-199 cm, E5: 200-399 cm, E6: ≥400 cm.



En todas las parcelas arboladas, tanto procedentes del IFN3 como del inventario específico, se extrajeron, como variables dependientes, el área basimétrica, la densidad, el volumen, la altura media y la altura dominante. Mediante la aplicación, a nivel de especie, de las ecuaciones de *Ruiz-Peinado*², que se sirven de información sobre diámetro normal y altura media, se calcularon datos relativos a biomasa. De la aplicación de estas ecuaciones se obtuvo, a nivel de parcela y de forma independiente, información sobre cantidad de biomasa contenida en el fuste, las ramas, las ramillas y hojas, y en la raíz.

En las parcelas de matorral, procedentes del inventario específico, se obtuvo la carga o cantidad de biomasa, en función de la FCC y la altura media de la vegetación en cada uno de los estratos de vegetación definidos.

Ajuste de los modelos predictivos

Una vez obtenidas tanto las variables independientes (estadísticos LiDAR y NDVI), como las variables dependientes (variables calculadas en base a los datos de campo), se relacionaron mediante modelos de regresión lineal.

Para la generación de los modelos de regresión, primero se preseleccionaron las variables independientes que mejor se correlacionaban con la variable a estimar, según el coeficiente de correlación de "Spearman" y la significación estadística. Posteriormente, estas variables se incluyeron en un proceso de selección, en el que se seleccionaban de forma progresiva aquellas que aportaban más información, empleando para ello el método de selección "paso a paso". Una vez seleccionadas las variables independientes, se ajustaron modelos de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. Los modelos resultantes debían ser significativos, al igual que las variables independientes seleccionadas (para un nivel de significación del 0,05). Si alguna variable no resultaba significativa al nivel establecido, o presentaba cierta correlación con otra de mayor significancia, se excluía del modelo en cuestión.

Tras establecer los modelos se comprobó el cumplimiento de las hipótesis básicas que debe cumplir todo modelo de regresión lineal³: ausencia de errores de especificación, normalidad, homocedasticidad, independencia, no colinealidad y ausencia de valores atípicos o heterogéneos; empleando para ello las gráficas básicas de diagnóstico (*Figura 2*). Cuando el diagnóstico gráfico resultó ambiguo, se realizaron pruebas analíticas adicionales.

² *Montero, G, Ruiz-Peinado, R y Muñoz, M, 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*



La gráfica “Residuals vs Fitted”, representa los residuos frente a los valores predichos; la gráfica “Normal Q-Q”, muestra los residuos tipificados frente a los cuantiles teóricos de una distribución gaussiana; gráfica “Scale-Location”, representa la raíz del valor absoluto del residuo frente al valor predicho y la gráfica “Residuals vs Leverage”, muestra los residuos tipificados frente a “leverage” (dando idea de la influencia del dato en el modelo) y la distancia de “cook” para cada dato (mostrada mediante líneas rojas discontinuas).

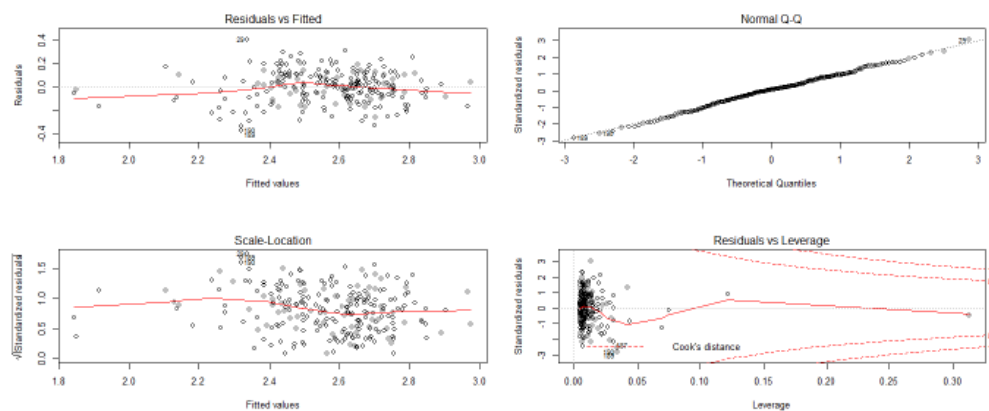


Figura 2. Gráficas básicas de diagnóstico

De entre los modelos establecidos que cumplían las citadas hipótesis, se seleccionaron los modelos óptimos; comparando para ello los estadísticos que indicaban la bondad del ajuste, es decir, el coeficiente de determinación ajustado (R^2 corregido), la media (sesgo) y la raíz de la media cuadrática de los errores (RMSE).

A continuación se recogen los modelos finalmente seleccionados para el conjunto de las variables estimadas:

- Altura dominante (m):

$$H_o = 2,343 + 0,833 \cdot P90 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,851)$$

- Altura media (m):

$$H_m = 2,578 + 0,594 \cdot P90 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,835)$$



- Área basimétrica (m²/ha):

$$AB = -1,343 + 1,338 \cdot P75 + 1,124 \cdot P30 + 0,043 \cdot FCC \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,770)$$

- Biomasa fuste (t/ha):

$$B_f = -14659,7 + 4330,9 \cdot P30 + 4733,1 \cdot P90 - 185,5 \cdot FCC \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,803)$$

- Biomasa de ramillas (<2cm) y hojas (t/ha):

$$B_{<2cm} = 135,3 + 102,4 \cdot FCC + 573,4 \cdot P90 + 705,5 \cdot P30 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,747)$$

- Biomasa aérea total (t/ha) como biomasa de los fustes, las ramas gruesas y las ramillas:

$$B_T = -14,944 + 5,296 \cdot P30 + 1,463 \cdot P90 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,802)$$

- Altura primera rama viva (m):

$$H_{rama \text{ viva}} = -62,737 - 15,653 \cdot P10 + 75,947 \cdot P50 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,770)$$

- Altura primera rama muerta (m):

$$H_{rama \text{ muerta}} = -103,2 + 31,6 \cdot P05 - 48,0 \cdot P10 + 66,4 \cdot P50 \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,703)$$

- Altura media del matorral de más de 30 cm (cm):

$$H_{mat >30 \text{ cm}} = 33,9 - 137,9 \cdot P01 + 172,5 \cdot P05 + 52,5 \cdot P90 + 145,3 \cdot NDVI_{min} \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,883)$$

- Altura media del matorral (cm):

$$H_{mat \text{ total}} = -19,3 - 155,9 \cdot P01 + 196,0 \cdot P05 + 39,2 \cdot P90 + 184,0 \cdot NDVI_{min} \quad (R^2 \text{ corregida: } 0,859)$$

Extrapolación de los modelos y generación de cartografía

Una vez obtenidos los diferentes modelos que relacionaban la información LiDAR y NDVI con los datos de campo, se procedió a la extrapolación de estos modelos a la continuidad del territorio, mediante la aplicación de las ecuaciones obtenidas con técnicas estadísticas de regresión lineal, generando así coberturas cartográficas de las variables estimadas a 10 metros de resolución.



RESULTADOS

La metodología empleada para discriminar las diferentes formaciones forestales fue diferente en función de si se trataba de formaciones arboladas o no arboladas. El umbral que marcaba la diferencia entre una formación arbolada y una no arbolada fue el 35% de FCC a 4 metros de altura. Este umbral se estableció por la influencia que ejercían los retornos LiDAR sobre arbolado en la estimación del matorral, ya que cuando la FCC era mayor al 35% los retornos LiDAR del dosel de copas, hacían aumentar notablemente la estimación de la altura del matorral generando una sobrestimación de este. Dentro de las formaciones no arboladas el umbral que marcaba la diferencia entre las formaciones de pastizal y las formaciones de matorral fue el 60% de FCC a 30 cm de altura.

Biomasa acumulada en formaciones no arboladas

Dentro de las formaciones forestales no arboladas, las formaciones de pastizal y de matorral se identificaron en función de la altura media del matorral de más de 30 centímetros (*Tabla 1, $H_{mat} >30\text{ cm}$*), empleando para su estimación la ecuación obtenida a tal efecto, mediante técnicas estadísticas de regresión.

Tras extrapolar la ecuación establecida para el cálculo de $H_{mat} >30\text{ cm}$ a la continuidad del territorio, las formaciones no arboladas se clasificaron en función de su altura en seis categorías: pasto de altura inferior a 30 centímetros, matorral de altura inferior a 30 centímetros, matorral de altura entre 30 y 60 centímetros, matorral de altura entre 60 centímetros y 1,20 metros, matorral de altura entre 1,20 y 2 metros y matorral de altura entre 2 y 4 metros.

Analizados los resultados y advertida la dificultad de discriminar entre formaciones de matorral de altura inferior a 30 centímetros y matorral de altura entre 30 y 60 centímetros a partir de la información LiDAR, se planteó el empleo del índice NDVI, para discriminar entre zonas desnudas, formaciones de pastizal y formaciones de matorral. Finalmente, a la luz de los resultados, se decidió agrupar las formaciones de matorral de altura inferior a 30 centímetros y de altura entre 30 y 60 centímetros como una sola, pastizal-matorral de menos de 60 centímetros.

Finalmente las formaciones vegetales no arboladas se clasificaron en cinco categorías, formaciones de pasto; formaciones de pastizal-matorral de altura inferior a 60 centímetros; formaciones de matorral de altura entre 60 centímetros y 1,20 metros; formaciones de matorral alto de altura entre 1,20 y 2 metros y formaciones arbustivas de altura entre 2 y 4 metros.



Figura 3. Clasificación de formaciones vegetales no arboladas

Una vez establecida la clave y la tipología de las formaciones vegetales no arboladas, se procedió a la caracterización de las mismas, en términos de carga de biomasa acumulada.

En tanto las distintas tipologías de formaciones vegetales no arboladas podían albergar una cantidad de biomasa variable, en función de su altura y su FCC, se calculó la cantidad de biomasa en cada una de las parcelas de campo, empleando para ello la ecuación de *Montero, G. et al.*³ para la estimación de biomasa en matorrales y arbustados mediterráneos. Posteriormente se calculó la carga media para cada tipo de formación vegetal establecida.

Además, pensando en la diversidad de pisos bioclimáticos presente en Aragón, se disgregaron los pastos y las formaciones de matorral de menos de 1,2 metros. Parece lógico pensar que la carga de una formación de matorral en una zona xérica (valle del Ebro) será significativamente inferior a la presente en una zona mélica, puesto que los matorrales sobre climas más húmedos presentan una mayor proporción de combustible vivo y también una mayor FCC, lo que se traduce en una carga mayor de biomasa.

Así las formaciones de pasto, se disgregaron en pastos xéricos, pastos mélicos y prados pastados en el piso alpino, mientras que las formaciones de pastizal-matorral y las formaciones de matorral bajo se disgregaron en pastizal-matorral xérico, pastizal-matorral mélico, matorral medio xérico y matorral medio mélico. Adicionalmente, a partir de la cartografía del SIGPAC, se tuvieron en consideración los cultivos agrícolas, diferenciando entre cultivos herbáceos de secano y cultivos herbáceos de regadío (*Tabla 2*).

³ *Montero, G, Pasalodos-Tato, M.ª, Montoto, R, López-Senespleda, E, Onrubia, R, Bravo-Oviedo A, Ruíz-Peinado R, 2013. Contenido de Carbono en la biomasa de las principales especies de matorral y arbustados de España*



Tabla 2. Carga de biomasa para cada tipo de formación vegetal no arbolada

Tipo de formación vegetal no arbolada	Carga seca de biomasa (t/ha)	Carga viva de biomasa (t/ha)	Carga total de biomasa (t/ha)
Pastizal xérico	1,16	0,62	1,78
Pastizal méxico	1,35	2,51	3,86
Prados pastados en el piso alpino	0,09	0,91	1,00
Pastizal-matorral xérico	3,12	3,31	6,43
Pastizal-matorral méxico	2,16	5,87	8,03
Matorral medio xérico	6,36	5,44	11,80
Matorral medio méxico	4,81	6,99	11,80
Matorral alto	10,67	13,43	24,10
Arbustedo	20,52	27,88	48,40
Cultivo herbáceo de secano	0,23	0,91	0,68
Cultivo herbáceo de regadío	0,75	5,00	4,25

Biomasa acumulada en formaciones arboladas

Dentro de las formaciones forestales arboladas (FCC a 4 m mayor o igual a 35%), se intentaron identificar distintas tipologías en función de su continuidad vertical, intentando para ello estimar la altura de la primera rama ($H_{rama\ viva}/H_{rama\ muerta}$) y la altura del sotobosque; si bien sólo se logró estimar con buenos resultados la altura de la primera rama, pero no así la altura del matorral bajo arbolado.

Tras extrapolar las ecuaciones establecidas para el cálculo de la biomasa fuste (B_f), de las ramillas y las hojas ($B_{<2cm}$) y la biomasa aérea total (B_T) a la continuidad del territorio, las formaciones arboladas se clasificaron en función de su continuidad vertical en tres categorías, distinguiendo entre masas sin sotobosque, masas con sotobosque pero sin continuidad vertical y masas con sotobosque y continuidad vertical. Adicionalmente, a partir de la cartografía del SIGPAC, se tuvieron en consideración los cultivos agrícolas, diferenciando entre cultivos leñosos de secano y cultivos leñosos de regadío.

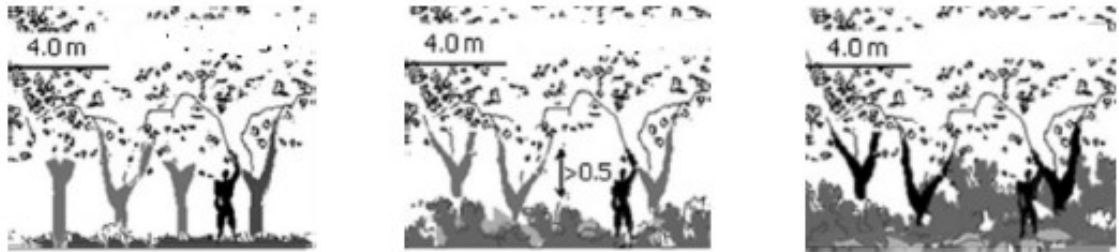


Figura 4. Clasificación de formaciones vegetales no arboladas

Una vez establecida la clave y la tipología de las formaciones vegetales arboladas, se procedió a la caracterización de las mismas, en términos de carga de biomasa acumulada en la parte aérea (Tabla 3).

Tabla 3. Carga de biomasa para cada tipo de formación vegetal no arbolada

Tipo de formación vegetal arbolada	Carga seca de biomasa (t/ha)	Carga viva de biomasa (t/ha)	Carga total de biomasa (t/ha)
Arbolada sin sotobosque	7,91	2,49	10,40
Arbolada con sotobosque sin continuidad vertical	6,02	10,78	16,8
Arbolada con sotobosque y continuidad vertical	8,89	10,05	19,39
Cultivo leñoso de secano	0,23	0,68	0,91
Cultivo leñoso de regadío	0,17	0,82	0,99

En las formaciones arboladas, la biomasa aérea representa la biomasa acumulada en los fustes, las ramas y ramillas, mientras que la de la biomasa subterránea representa la biomasa acumulada por el sistema radicular. Por este motivo, a la biomasa almacenada en la parte aérea se le añadió la almacenada en el sistema radicular, calculándose esta última mediante la aplicación directa de factores de expansión (BEF).



Cálculo de carbono equivalente

La biomasa almacenada en forma de materia seca se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de carbono, que por unidad de biomasa se considera un valor promedio, asumiendo que existen ligeras diferencias de este valor según especies, de aproximadamente el 50%.

Tal y como se explica anteriormente, la metodología seguida para la cuantificación del CO₂ fijado en las distintas formaciones vegetales parte de la estimación del contenido de biomasa en las distintas formaciones vegetales, al que resulta de aplicación la relación entre los pesos atómicos del carbono (12) y de la molécula de dióxido de carbono (44), es decir, CO₂/C, 44/12=3,67.

Transformación de biomasa a carbono (t/ha):

$$\text{Carbono} = \text{Biomasa} \cdot 0,4735$$

Transformación de carbono a CO₂ equivalente (t/ha):

$$\text{CO}_2 = \text{C} \cdot 3,67$$

Mediante la asignación a cada tipo de formación vegetal de la carga de biomasa seca estimada, se obtuvo un cobertura cartográfica continua de 10 metros de resolución, donde se expresa la cantidad de biomasa seca en toneladas por hectárea. Esta cobertura de información se transformó en cantidad de CO₂ equivalente, expresada en toneladas por hectárea, con arreglo a los factores de equivalencia expresados anteriormente.

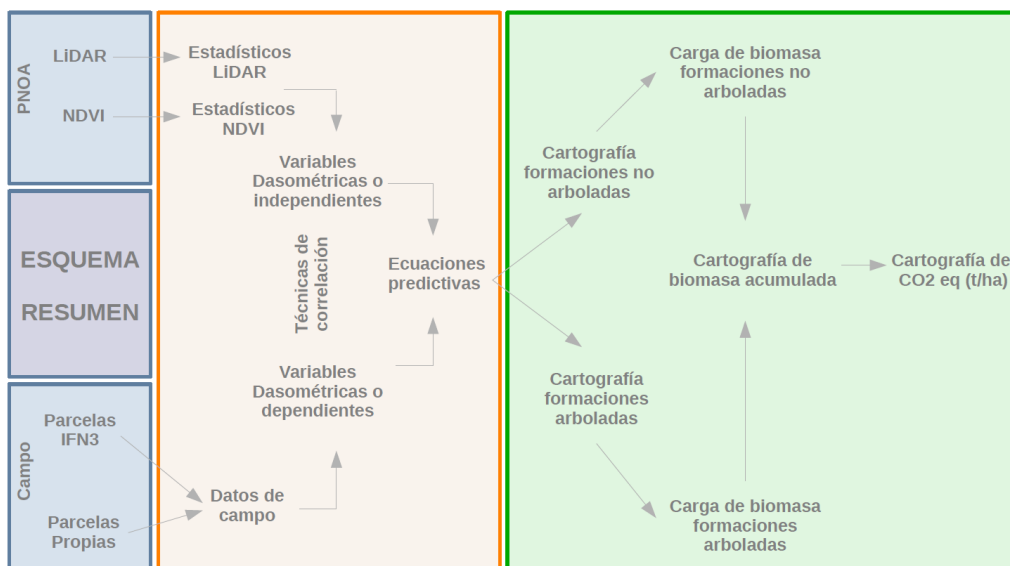


Figura 5. Esquema-resumen del flujo de trabajo