



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1797**

Actas del Noveno Congreso Forestal Español  
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**  
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





## Estudio de la compensación de la huella de carbono de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural por parte del Arboreto de Montes, empleando tecnología HLS (LiDAR)

LÓPEZ TRAPERO, R. (1), CRUZ JOSA, D. (2), AGUIRRE ARNAIZ, A. (1,3)

(1) Departamento de Sistemas y Recursos Naturales. E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

(2) Departamento de datos 3D, GRAFINTA SA.

(3) Centro para la Conservación de la Biodiversidad y el Desarrollo Sostenible (CBDS), E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

### Resumen

Bajo la premisa actual del cambio climático, las evaluaciones de los procesos de mitigación y compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero son cada vez más numerosas e importantes.

Así, el principal objetivo de este estudio es ofrecer una metodología para la determinación de la biomasa y, por extensión, del carbono fijado por el arbolado urbano en las ciudades. Para ello, se ha analizado el arboreto de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural. Con este fin, se ha empleado tecnología LiDAR, en concreto, un escáner 3D de mano, que emplea un algoritmo de localización y mapeo simultáneo.

Mediante el escaneado del Arboreto de la ETSI de Montes, se han obtenido los parámetros forestales de los pies necesarios para la estimación de su biomasa. Como resultado, se han obtenido 15,36 t de CO<sub>2</sub> equivalente anuales, lo cual suponen unas fijaciones medias anuales de aproximadamente 15,36 t de CO<sub>2</sub> eq el 10% de la huella de carbono de la ETSI de Montes en 2023 y el 0,5 % de las emisiones de toda la UPM para ese mismo año.

Los resultados obtenidos revelan que la metodología desarrollada cumple los objetivos planteados y demuestra su viabilidad para la implementación de procesos estandarizados de evaluación de compensación de emisiones mediante teledetección.

### Palabras clave

Lidar, SLAM, carbono, biomasa.

### 1. Introducción

Para cumplir con el Pacto Verde Europeo y los ODS de la Agenda 2030, España ha traspuesto a su ordenamiento jurídico la Ley 7/2021, de cambio climático y transición energética (Jefatura del Estado, 2021). Así, se ha constituido el Marco

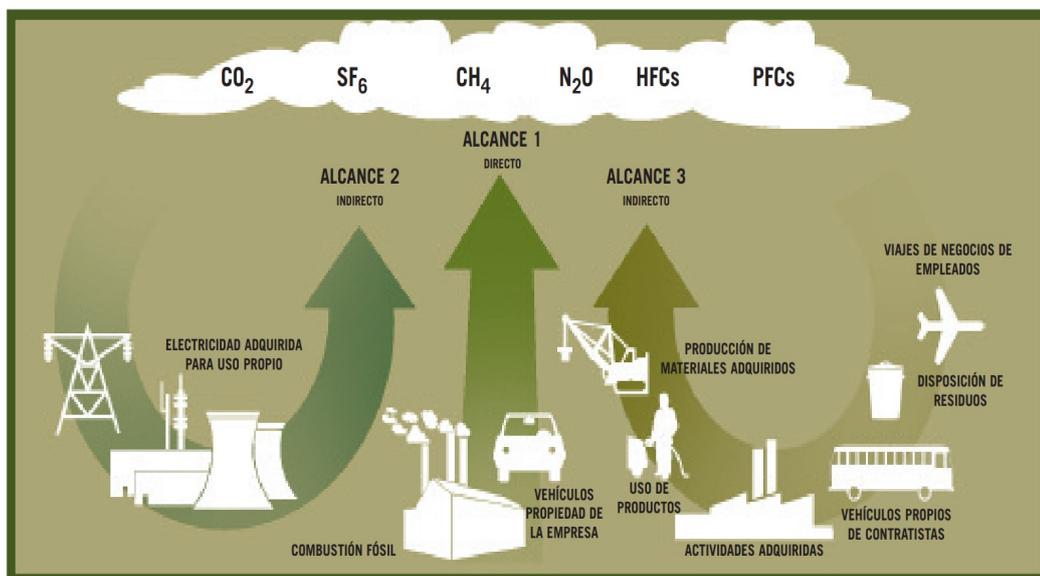
estratégico de Energía y Clima creado desde 2019, estructurado en torno a tres ejes principales: mitigación, adaptación y transición, todo ello orientado a la descarbonización de la economía española.

Una de las consecuencias más importantes de este cambio climático es el detrimento de la salud humana derivado del estrés térmico, la contaminación aérea, la proliferación de alérgenos y enfermedades infecciosas, entre otras repercusiones, además de factores psicológicos perniciosos (Haines y Patz, 2004). Las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su consecuente acumulación en áreas metropolitanas, generan una disminución de la calidad del aire, particularmente por la liberación de óxidos de nitrógeno, que son los precursores del ozono troposférico, el contaminante atmosférico más relevante para los bosques en Europa.

También habría que tener en cuenta un aumento significativo de las temperaturas en las conocidas islas de calor, que incluso contribuyen a rápidas modificaciones climáticas a nivel local (McCarthy et al., 2010).

Por tanto, una de las principales medidas en materia de sostenibilidad es el seguimiento y control de emisiones mediante la estimación de la huella de carbono (Álvarez et al., 2021), que son el conjunto de emisiones y absorciones de GEI que son producidas como consecuencia de una actividad asociada a un individuo, organización, evento o producto. Su cálculo se ha impulsado en todo tipo de organizaciones bajo el GHG Protocol, (Daviet et al., 2005).

Actualmente es el procedimiento seguido por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD) para el cálculo de emisiones. De acuerdo con esto, los cálculos estiman los alcances, que son grupos que incluyen las fuentes emisoras de GEI que puede tener una organización. Según el GHG Protocol existen tres alcances, cuyas categorías se pueden observar en la Figura 1.





*Figura 1. Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena de valor. (Smith et al., 2019)*

La unidad estándar de medida de la huella de carbono es la tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub> eq), usada para comparar las emisiones de varios GEI, convirtiendo cantidades de otros GEI con el mismo potencial de calentamiento global, en su equivalente en dióxido de carbono (Comisión Europea, 2024).

Dentro de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural (ETSI Montes) ha sido pionera a la hora de desarrollar un cálculo de su huella de carbono, empezando en el año 2011 incluyendo los tres alcances dentro de sus estimaciones (Alvarez et al., 2013). Ya en el 2016, la UPM expande las estimaciones a todas las escuelas y centros de la UPM. La última estimación, de septiembre de 2023, incluye los tres alcances para la secuencia 2013-2021 (UPM, 2023).

Dentro de la UPM, es la ETSI Montes el primer centro educativo que registró su huella de carbono en la OECC en el año 2011, para los alcances 1 y 2, repitiéndolo en 2012 y 2013 incluyendo el alcance 3. Estos análisis revelan que son las emisiones correspondientes al alcance 3 las principales contribuidoras al cómputo total.

A partir de 2015 el Equipo Huella de Carbono UPM se consolida y es en 2016 cuando se presenta el cálculo histórico de emisiones para la secuencia 2013-2016 en los alcances 1 y 2 de toda la UPM, incluyendo un desglose por campus y escuelas (UPM, 2016).

Los resultados del Equipo Huella de Carbono UPM permiten observar una reducción progresiva de las emisiones. Destaca el caso de los años 2020 y 2021, los cuales cuentan con un cómputo nulo de emisiones asociados al alcance 2, correspondiente a las emisiones indirectas derivadas de la adquisición de energía eléctrica, algo que supone un gran paso en el proceso de descarbonización de la UPM.

Para 2023 se sabe que las emisiones globales de la UPM han sido de 2.947,14 t CO<sub>2</sub> eq, de las cuales la ETSI Montes ha contribuido un 5,02 %, con 147,82 t CO<sub>2</sub> eq (UPM, 2024). Esto la sitúa como la 7ª facultad con más emisiones de GEI dentro de la UPM a día de hoy.

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es establecer una metodología para el cálculo de la biomasa del arbolado urbano, de manera que se pueda estimar el carbono fijado. Con este fin, este estudio se ha centrado en la compensación de la huella de carbono de la ETSI Montes por parte de su arboreto. Para alcanzar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos secundarios:



- Obtención de los principales parámetros del arbolado del Arboreto de Montes a partir de nubes de puntos terrestres.
- Estimación de la biomasa a partir de los parámetros anteriores, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, así como el contenido de carbono y peso en t CO<sub>2</sub> eq.
- Cálculo de la proporción de la huella de carbono de la ETSI de Montes establecida para 2023, compensada por la fijación realizada por el Arboreto de Montes a partir de los cálculos de biomasa previos.
- Evaluación del impacto y alcance del estudio en materia de mitigación del cambio climático y, en particular, sobre compensación de emisiones dentro de la UPM.

### 3. Metodología

El inventario de la vegetación presente en el Arboreto de la ETSI Montes se ha realizado mediante un escaneo en 3D con un escáner láser de mano, en particular el LiGrip H300 de Green Valley International, que utiliza un algoritmo de localización y mapeo simultáneo, lo que se conoce como tecnología SLAM, y que permite capturar nubes de puntos en movimiento (Esparza et al., 2016; Agarwal et al., 2019).

El cabezal tiene incorporada una cámara panorámica, capaz de capturar vídeo en 360° a calidad 4K, empleada para colorear la nube puntos. El LiGrip H300 emplea un sensor LiDAR electromecánico HESAI XT32, con una distancia máxima de funcionamiento de 300 metros. Presenta 32 canales, que constituyen el número de haces láser emitidos por el equipo, lo que permite obtener nubes densas y capturar elementos a menos de 0,5 m del escáner, generando 640.000 puntos por segundo, cada uno con un único retorno (o reflejo), dando lugar a una precisión relativa de  $\pm 1$  cm.

La captura de los datos se ha llevado a cabo a través de la aplicación móvil de Green Valley International (GreenValley International 2024), que va instalada en un smartphone. Esta permite realizar una gestión de proyectos completa, controlando sus funciones y procesos de captura de datos.

Los escaneados se han compaginado con la toma de videos para colorear las nubes de puntos resultantes. Los archivos generados de los escaneos se han procesado mediante el software LiFuser, de Green Valley International.

Adicionalmente, todo el trabajo de postprocesado se ha desarrollado en el paquete de software suite de Green Valley International, que incluye LiDAR360 y LiDAR360MLS, ambos con todos sus módulos incluidos.

Como se ha comentado, la zona de estudio constituye el Arboreto de Montes

(Figura 2). Los escaneados se llevaron a cabo describiendo trayectorias cerradas y, siguiendo las recomendaciones del proveedor Green Valley International, con la cámara encendida y en configuración de video sin exceder los 15 minutos, con una velocidad de escaneado no superior a 1 m/s en la configuración de mano, evitando aceleraciones súbitas y giros bruscos del cabezal.



*Figura 2. Parcela de la ETSI Montes. (Catastro, 2024)*

Teniendo esto en cuenta, se estimó un rendimiento medio en entornos forestales de 1,5 ha cada 20 minutos. Considerando los tiempos de desplazamiento entre los puntos de inicio de los diferentes escaneados, así como el asociado a la puesta a punto del equipo, se consideró aumentar esta estimación a 35 minutos.

Para poder establecer un plan de trabajo en base a la valoración del rendimiento, se obtuvo de la Sede Electrónica del Catastro (Catastro, 2024) la superficie de la parcela a escanear (Tabla 1).

*Tabla 1. Información de la parcela catastral de la ETSI Montes. Fuente: (Catastro, 2024)*

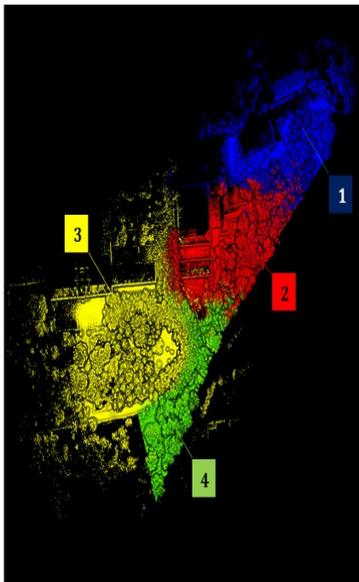
Información de la parcela catastral 8781501VK3788B	
Dirección	Calle Leonardo Prieto Castro, 001. Madrid [Madrid]
Descripción de la parcela	Múltiples inmuebles, división horizontal. E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural
Superficie de la parcela (m <sup>2</sup> )	98.582
Superficie construida proyectada (m <sup>2</sup> )	15.709
Superficie no construida proyectada (m <sup>2</sup> )	82.873



Para facilitar el registro y alineado, es esencial la inclusión de superficies comunes solapadas entre escaneados, que deben suponer entre el 20 y el 40 % de superficie común entre escaneados (Chen et al., 2020) para facilitar el funcionamiento del algoritmo de alineación y reducir los posibles errores de registro. Si se aumenta la superficie de escaneado para cumplir con este requerimiento de postprocesado, esta puede sumar 11,6 ha en total, que es incluso superior a la total disponible en la parcela.

De esta manera, se estimó que el escaneado de esta superficie, en base al rendimiento antes mencionado de 1,5 ha cada 35 min, llevaría cerca de 4,5 h de trabajo.

Finalmente, el trabajo de campo se consolidó en un total de 18 escaneados capturados en este periodo de tiempo, tal y como se estimó inicialmente. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de estos trabajos, así como el orden de los escaneados.



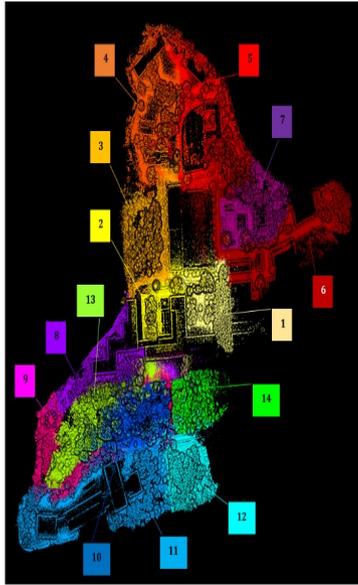


Figura 3. Planos con la distribución espacial de escaneados, numerados por orden de realización. Izquierda: escaneados 24-08-2024. Derecha: escaneados 25-08-2024.

Debido a que el sistema de navegación escogido en el trabajo de campo emplea únicamente los datos del sistema inercial, todos los archivos se encuentran en un sistema de coordenadas locales, propio de cada uno de ellos. Para poder alinearlos sin emplear un sistema de referencia de coordenadas, se enlazaron escaneados a partir de rasgos identificativos que eran comunes entre ellos, de ahí que se empleó un registro por superficies comunes mediante algoritmos de alineación.

Una vez aplicada la alineación burda y con las zonas comunes de ambos escaneados aproximadamente en el mismo sitio, se seleccionaron sobre la nube de puntos las zonas empleadas para aplicar el algoritmo.

El fichero unificado resultante fue registrado una vez más empleando herramientas manuales para alinearse con un escaneado georreferenciado de la ESTSI Montes, en este caso un vuelo LiDAR del PNOA del año 2016 (CNIG, 2016), que se empleó de como referencia. Esto permitió la transformación de las coordenadas del escaneado, desde un sistema local a uno de coordenadas geográficas, particularmente el que emplea la nube de puntos utilizada en esta alineación: el ETRS 89/ UTM zona 30N.

Para llevar a cabo una clasificación de la nube unificada, se empleó un procedimiento que consiste en asignar un valor numérico a cada punto dentro de la nube, el cual tiene una traducción directa dentro de una tabla con descripciones cualitativas. Esto permite al programa identificarlos como tal, pudiendo agruparlos y diferenciarlos según su valor, así como poder realizar interpretaciones sobre los mismos según esta clasificación. Estas categorías no están estandarizadas, dependen del operario y pueden incluir descripciones como edificaciones, farolas, bordillos, tendidos eléctricos, fustes, copas de árboles, etc.

Con la clasificación terminada, se procedió a segmentar la nube de puntos, que



se trata de un procedimiento que clasifica las nubes de puntos en múltiples regiones homogéneas, teniendo los puntos contenidos dentro de estas las mismas propiedades (Nguyen y Le, 2013). Gracias al proceso previo de clasificación, el software realizó la segmentación sobre los puntos asignados a las categorías de vegetación, al mismo tiempo que excluyeron las demás. Las regiones resultantes de este proceso fueron los árboles a identificar.

El algoritmo de segmentación forestal por semillas de Green Valley International (Li et al. 2012) emplea como criterio de agregación el espacio relativo entre árboles, creando una región a partir de la semilla (puntos sobre los que se inicia la segmentación) y haciéndole crecer añadiéndola puntos que cumplen los criterios, construyendo poco a poco el árbol desde el tronco (Liu et al., 2021).

Para facilitar el funcionamiento del algoritmo, se llevó a cabo la normalización de la nube de puntos, que consiste en eliminar la influencia del terreno en las mediciones sobre el suelo, dejándolo totalmente plano. En este caso se llevó a cabo empleando los puntos de suelo, es decir, utilizando los puntos más bajos como referencia, asignándoles a todos un valor de cota igual a cero y reduciendo proporcionalmente la altura del resto de puntos. Adicionalmente, se mantuvieron los valores originales de Z (altitud), para poder desnormalizar la nube de puntos tras el proceso de segmentación.

A continuación, se determinó la clase a la que pertenece cada árbol (conífera o frondosa) con el apoyo del contenido multimedia proporcionado por los videos grabados durante los escaneados, para facilitar la identificación. Las categorías asociadas se introdujeron en una columna adicional de la tabla de atributos del archivo de semillas, determinando para cada caso si se trataba de una conífera (c) o una frondosa (f). Posteriormente, el programa llevó a cabo el cálculo de los siguientes parámetros para los árboles segmentados:

- d, diámetro normal, medido en cm
- h, altura total del árbol, medida en m
- $d_{\text{copa}}$ , diámetro de copa, medido en m
- $S_{\text{copa}}$ , superficie de copa, medida en  $m^2$

Finalmente, estos datos se extrajeron del software en un documento de texto (.csv), que posteriormente se exportó a Excel y finalmente se revertió el proceso de normalización.

A partir de este momento el tratamiento de los datos se realizó en Excel los cuales se emplearon para llevar a cabo una serie de cálculos para obtener diferentes índices de espesura y parámetros medios de masa, de acuerdo con la metodología del Inventario Forestal Nacional (Pescador et al. ,2019) y un Trabajo de Fin de Titulación con características similares a este estudio, donde se estiman



las variables de interés basadas en datos LiDAR (García García, 2010).

Inicialmente se determinó la distribución de la población en clases diamétricas (CD), que se establecieron con 5 cm de amplitud, partiendo de un  $d$  mínimo de 2,5 cm para incluir en las estimaciones a todos los pies inventariados.

Entre el resto de las variables evaluadas se encuentra:

- Índices de espesura:
  - Densidad de pies (N), en pies/ha
  - Área basimétrica total (G), en  $m^2/ha$
  - Fracción de cabida cubierta (FCC), en porcentaje
- Parámetros medios de masa, donde se calculan los valores aritméticos medios de  $d$ ,  $h$ ,  $d_{copa}$  y  $S_{copa}$ , además de:
- Biomasa aérea, radical y total. Su cálculo se explica a continuación.

La biomasa se obtuvo para cada uno de pies de la muestra. Para ello, se han empleado las ecuaciones alométricas de Montero et al. (2005), utilizando los grupos de especies “Otras coníferas” y “Otras frondosas”. Esta ecuación sigue la estructura de una ecuación alométrica (potencial) y permite obtener los valores modulares de biomasa empleando los parámetros recogidos en la Tabla 2. Al linealizarse resulta en:

$$\ln(B_x) = a + b \cdot \ln(d) \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$B_x$  = biomasa en kg para las distintas “x” fracciones del árbol. De esta forma  $B_T$  constituye la biomasa total,  $B_r$  la radical y  $B_A$  la aérea (kg)

$d$  = diámetro normal (cm)

$a, b$  = parámetros adimensionales estimados para el modelo

Aunque la parametrización en este caso está planteada para calcular directamente  $B_A$  y  $B_r$ , se puede determinar el cálculo de  $B_T$  como el sumatorio de ambos resultados.

*Tabla 2. Valor de los parámetros de la función (a y b, Ec.1)).  $B_T$  constituye la biomasa aérea total en kg y  $B_r$  la biomasa radical en kg. Fuente: (Montero et al., 2005)*

Y	Parámetros
---	------------



	a	b
	Otras coníferas	
B <sub>T</sub>	-2,21637	2,35162
B <sub>r</sub>	-2,46359	2,13727
	Otras frondosas	
B <sub>T</sub>	-1,87511	2,29843
B <sub>r</sub>	-1,38199	1,96764

Por tanto, para poder comparar los resultados dados por esta ecuación alométrica con las estimaciones de emisiones, es necesario determinar el contenido de carbono de la biomasa seca calculada.

La composición de la madera, aunque no idéntica, es similar en las distintas especies leñosas, así como también dentro de un mismo árbol en sus diversas partes (tronco y raíces), de manera que contienen aproximadamente, un 50% de carbono (Kollmann, 1959). En este caso es el porcentaje que se ha aplicado.

Con esta conversión, se obtiene el contenido en peso atómico de carbono en la biomasa seca para la clasificación estimada c y f. Para poder pasarlas a las mismas unidades empleadas para estimar la huella de carbono (t de CO<sub>2</sub> eq), es necesario multiplicarlas por la relación entre el peso atómico de C y el peso de una molécula de CO<sub>2</sub> (44/12=3,67).

Hay que tener en cuenta que los datos de huella de carbono UPM y la ETSI de Montes se obtienen a partir de los valores de emisión del año 2023, es decir que sus unidades son t de CO<sub>2</sub> eq/año. Para poder compararlos con los resultados obtenidos es necesario dar un valor de crecimiento medio anual de las fijaciones.

Normalmente se aplica al volumen, pero debido a la correspondencia directa que tiene con la biomasa, según la densidad de las especies, y de la biomasa con las fijaciones de carbono, se puede decir que este valor de crecimiento medio anual de las fijaciones del Arbolito es el valor acumulado (el obtenido), entre el número de años que ha tardado en alcanzar ese valor. Teniendo en cuenta que las obras del recinto de la ETSI de Montes finalizaron en 1945 (Chias Navarro, 1983), se puede determinar que el Arbolito de Montes ha estado fijando carbono durante 79 años hasta 2024.

Finalmente, para poner en perspectiva las ganancias de estos mecanismos de compensación, se ha realizado una estimación monetaria, traduciendo las fijaciones en créditos de carbono y aplicando su precio por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente en el mercado voluntario. Se han empleado para ello las últimas valoraciones del año 2023, donde el precio del derecho de emisión es de 8,86 € t/CO<sub>2</sub> eq (Avery, 2024).

**4. Resultados**

La totalidad de los archivos 3D del estudio han ocupado 1.049 GB de almacenamiento, de los cuales un 61,10 % está vinculado exclusivamente a datos LiDAR, indicando la magnitud del proyecto. La Tabla 4 muestra los resultados derivados del procesado de las nubes de puntos, resumidos en función de los valores medios de la masa.

*Tabla 4. Resumen de los resultados del inventario del Arboreto de Montes.  $d_m$ : diámetro normal medio,  $h$ : altura total media,  $d_{copa}$ : diámetro de copa medio,  $S_{copa}$ : superficie de copa media,  $A$ : biomasa aérea media,  $r$ : biomasa radical media,  $T$ : biomasa total media*

Categoría	Parámetros dasométricos medios de la masa						
	$d_m$ (cm)	$h$ (m)	$d_{copa}$ (m)	$S_{copa}$ (m <sup>2</sup> )	$A$ (kg)	$r$ (kg)	$T$ (kg)
Coníferas	31,5	16,2	5,8	32,4	485,35	169,67	655,02
Fronosas	21,5	10,3	5,4	29,4	284,39	51,99	336,37
Total	26,5	13,2	5,6	30,9	315,68	169,67	485,35

A partir de los índices de espesura calculados para la masa (Tabla 5), se observa que se han podido recopilar y evaluar 1.403 pies. Teniendo en cuenta que la superficie aproximada del arboreto es de 8,27 ha y que se ha escaneado en su totalidad, la densidad de árboles con un valor de  $d$  superior a 2,5 cm es de 170 pies/ha de media, aunque obviamente el espaciado no es consistente en toda el área de estudio, ya que dentro de esta se incluyen zonas desarboladas debido a la presencia de las instalaciones del centro y otras dotaciones e infraestructuras.

*Tabla 5. Índices de espesura calculados para el Arboreto de Montes.  $n$ : número de pies,  $N$ : densidad,  $G$ : área basimétrica total,  $S_{copa}$ : sumatorio de superficie de copa total,  $S_T$ : superficie total de la parcela, FCC: fracción de cabida cubierta*

Categoría	Índices de espesura						
	$n$	Relación de especies	$N$ (pies/ha)	$G$ (m <sup>2</sup> )	$S_{copa}$ (m <sup>2</sup> )	$S_T$ (m <sup>2</sup> )	FCC (%)
Coníferas	597	43%	73	56,0	19,3	82.873	23%
Fronosas	806	57%	98	40,5	23,7		29%
Total	1.403	100%	170	96,6	42,9		52%

Algo similar ocurre a la hora de estimar la espesura a partir de la fracción de cabida cubierta (FCC), donde el valor medio para el arboreto es del 52%, lo cual indica que presenta una espesura abierta (Pita Carpenter, 1973), siendo incluso inferior (espesura clara), para cada orden por separado.

Se puede observar que la distribución de especies en el arbolado es de aproximadamente la mitad para cada orden, aunque existe una mayor presencia de frondosas que de coníferas (un 14% más), presentando estas últimas como contraste, mayores dimensiones para todos los parámetros evaluados. También se aprecia que el principal aporte de biomasa lo realiza la parte aérea del arbolado en ambos casos, aunque el sistema radical supone un mayor aporte en el caso de las coníferas.

Para interpretar más claramente los resultados, se han representado gráficamente las distribuciones diamétricas en función de la densidad. En la Figura 5, se puede observar cómo la forma fundamental de masa para las frondosas se corresponde con una masa irregular, ya que su distribución se acerca a la de una exponencial negativa (Serrada Hierro, 2011), con prevalencia de CD pequeñas, mientras que las coníferas se asemejan a una distribución normal, lo cual indica que se trata de una masa regular.

Por otro lado, ambos órdenes de especies se encuentran entremezclados a largo de la superficie del arbolado, de manera que su distribución conjunta también se puede interpretar como una normal, indicando que se trata de una masa regular.

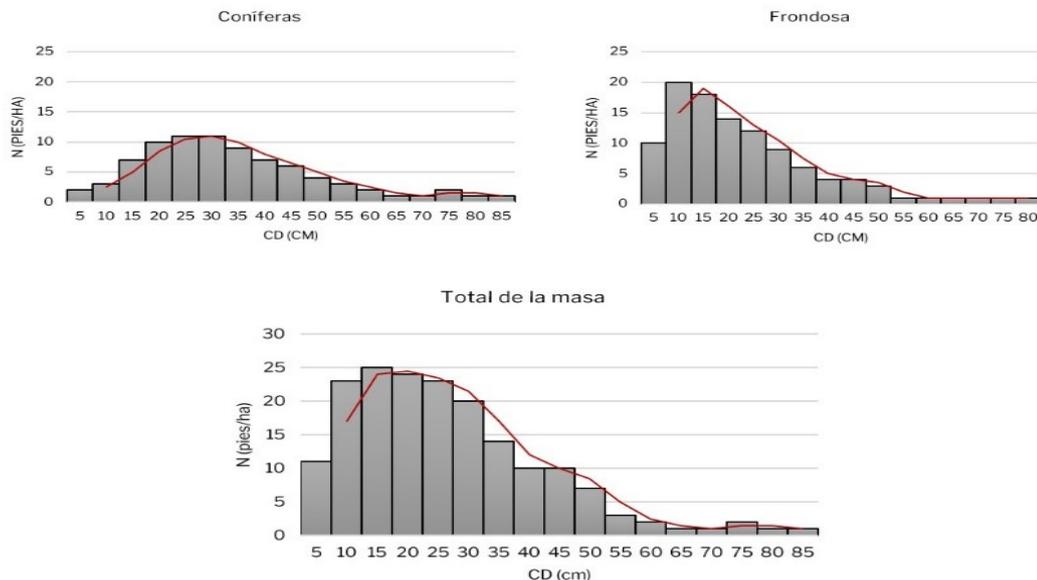


Figura 5. Distribución diamétrica en función de la densidad de la población de estudio, diferenciando la total (abajo) de los cálculos según orden de especies (arriba). En rojo se indica la línea de tendencia. CD: clase diamétrica, N: densidad.

Adicionalmente, la Figura 6 permite observar cómo se ha producido el aporte y distribución de biomasa por CD y por orden. En este caso, los árboles con un valor de d comprendido entre 27,5 cm y 52,5 cm suponen la principal contribución. Esto guarda relación con la densidad de las CD correspondientes (30 a 50) para ambos



órdenes, independientemente de que presentes una forma fundamental diferente. Esto se debe a que la distribución diamétrica a partir de la CD 30 es bastante similar en ambos casos.

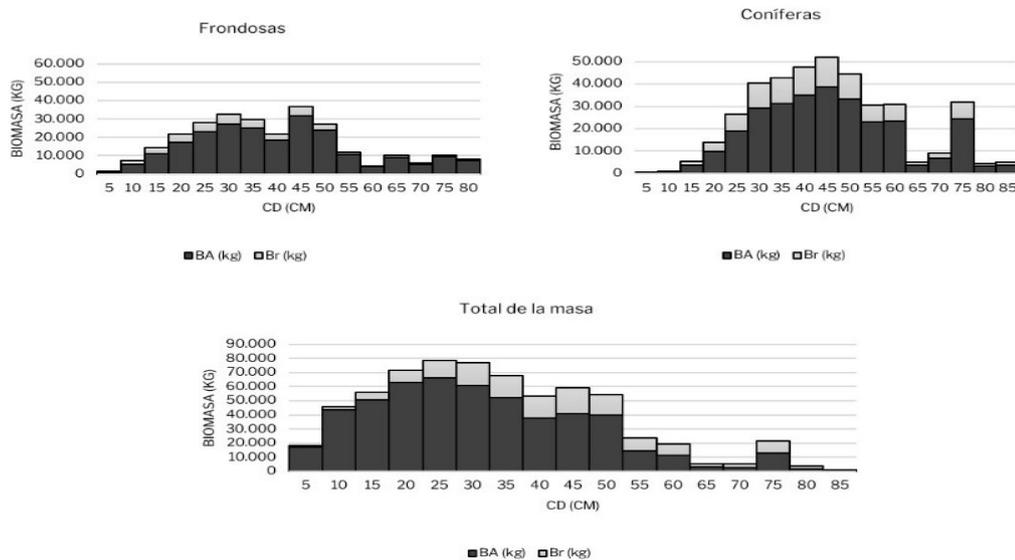


Figura 6. Distribución diamétrica en función de la biomasa de la población de estudio, diferenciando la total (abajo) de los cálculos según orden de especies (arriba). CD: clase diamétrica

Destaca el aporte realizado por pies de conífera de grandes diámetros, particularmente los pertenecientes a la CD 75, especialmente teniendo en cuenta que presentan una densidad inferior a las de las CD más prevalentes.

Finalmente, los cálculos de biomasa para toda la masa determinan que la producción total de 662,06 t de materia vegetal, que se traducen en la fijación 1.213,97 t de CO<sub>2</sub> eq. Además, se confirma que el principal aporte a la captura de carbono es realizado por la biomasa aérea, computando más del 75% (Tabla 6). Se corrobora que el aporte medio por cada pie de frondosa es menor que para las coníferas, ya que el sumatorio total indica un 9% más de fijación, tanto en la biomasa radical como en la aérea, con una diferencia unas 200 t de CO<sub>2</sub> eq entre ambos órdenes. De esta manera, a pesar de que hay un menor número de pies en la categoría de coníferas en la masa, estas suponen casi el 60% de la aportación.

Tabla 6. Estimaciones de biomasa y carbono fijado por el Arboreto de Montes en base a los resultados del inventario

Cálculos de biomasa
Coníferas

	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa
Aérea	289.755,34	50%	144.877,67	531,22	44%
Radical	101.294,12		50.647,06	185,71	15%
Total	391.049,46		195.524,73	716,92	59%
Frondosas					
	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa
Aérea	229.214,77	50%	114.607,39	420,23	35%
Radical	41.901,49		20.950,75	76,82	6%
Total	271.116,27		135.558,13	497,05	41%
Total de la masa					
	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa (%)
Aérea	518.970,11	50%	951,45	951,45	78%
Radical	143.195,61		71.597,81	262,53	22%
Total	662.165,73		331.082,86	1.213,97	100%

En los 79 años que se han sucedido desde su creación hasta 2024, se han fijado 1.213,97 t de CO<sub>2</sub> eq, lo cual suponen unas fijaciones medias anuales de aproximadamente 15,36 t de CO<sub>2</sub> eq.

Este valor supone el 10% de las 147,82 t CO<sub>2</sub> eq, que la ETSI Montes tuvo como huella de carbono en 2023. Adicionalmente, esta captura compensaría el 0,5 % de las 2.947,14 t CO<sub>2</sub> eq emitidas por toda la UPM para ese mismo año.

Finalmente, si tenemos en cuenta el precio del derecho de emisión en el mercado voluntario de carbono, la fijación realizada por el Arboreto de Montes supone un total de 10.754,09 €, en 2024, tras capturar carbono desde 1945.

## 5. Discusión

Los resultados de la inventariación a través del software de Green Valley son sólidos y permiten fundamentar otros cálculos de existencias. Sin embargo, el empleo de ecuaciones alométricas requiere una determinación más exacta de las especies, ya que la parametrización que emplean y los modelos en los que se basan funcionan a nivel local y se basan en soluciones particulares para cada una de ellas. Esto difiere con el planteamiento empleado en este estudio, con fórmulas genéricas que incluyen múltiples especies. Una posible alternativa, habría sido el empleo de ecuaciones aplicadas en función de las especies más representativas.

Otro aspecto limitante relacionado con la parametrización es la dependencia del valor del diámetro normal para obtener los cálculos de biomasa, que se hace aparente al observar que un aumento de 10 cm sobre el diámetro normal medio de



cada árbol supone que este produce de promedio, aproximadamente 1,7 veces más biomasa que una frondosa, una relación directa tal y cómo están parametrizadas las ecuaciones.

En el caso de las frondosas, se podría llegar a pensar que tiene una distribución normal con una curva perteneciente a una masa muy joven, ya que hay menos pies en la CD 5 que en las siguientes 3 clases, sin embargo, esto se puede deber a un sesgo derivado de las limitaciones del programa de procesado a la hora de identificar  $d$  inferiores a 10 cm (Proudman et al., 2022).

Esto también viene derivado de las limitaciones que tiene actualmente la tecnología de postprocesado en materia de identificación de especies, de forma que es muy posible que en el futuro estos inconvenientes se vayan resolviendo con los avances que se llevan a cabo en este campo.

Adicionalmente, existe una limitación intrínseca a la tecnología LiDAR, derivada de la forma en la que captura los datos. Debido a la fecha en la que se realizó el trabajo, el sotobosque había crecido a alturas superiores a 1 m en algunos casos, compuesto por un denso pasto de herbáceas anuales. Esta situación contribuía no sólo a una reducción del rendimiento de trabajo por la dificultad para atravesar ciertas zonas, sino también al fenómeno de oclusión del escenario, algo especialmente relevante a la hora de estimar parámetros como  $d$ , medido a 1,3 m sobre el fuste.

También es cierto que uno de sus principales inconvenientes es que la capacidad de replicar el procedimiento planteado está supeditada a la posibilidad de realizar una mayor inversión inicial en materiales, tanto hardware como software, que son más costosas que las herramientas usadas con técnicas convencionales. Además, el procedimiento de tratamiento de datos en gabinete requiere una inversión importante de tiempo y personal especializado familiarizado con el software.

Hay que resaltar que, aunque los resultados obtenidos se proporcionan en valor absoluto ( $t\ CO_2_{eq}$ ), deben compararse con los datos de emisiones anuales de 2023 ( $t\ CO_2_{eq}/año$ ). Esto se debe a que, en el momento de realización de este estudio, no se conoce ninguna estimación realizada previamente del carbono fijado por el Arboreto de Montes. El procedimiento seguido ha determinado los valores medios de fijación anuales desde una fecha aproximada de creación del Arboreto, como el carbono contenido en la biomasa entre el número de años que han pasado desde entonces hasta 2024, cuando en realidad los valores de captura varían cada año y dependen de múltiples factores externos que influyen en el crecimiento.

Finalmente, en el futuro se considera realizar un inventario mediante métodos tradicionales para contrastar la precisión de las mediciones obtenidas, particularmente para afianzar la metodología en un entorno como en el que se ha aplicado. Existen en la literatura múltiples estudios que aplican la tecnología



LiDAR en monte, contrastados satisfactoriamente con inventarios realizados mediante métodos tradicionales, de forma que su efectividad se ha probado con anterioridad. Dentro del ámbito urbano, existen menos ejemplos, además de que están focalizados únicamente en la inventariación urbana sin fines de estimación de compensaciones y emplean tecnologías SLAM sobre soportes diferentes (drones o vehículos).

## 6. Conclusiones

A la vista de los resultados de este estudio, se confirma la viabilidad de una metodología que emplea la teledetección mediante tecnología LiDAR SLAM, para llevar a cabo estimaciones de la biomasa y la fijación de carbono del arbolado urbano.

La tecnología empleada permite la obtención de parámetros forestales de manera similar a cómo ocurriría con un inventariado pie a pie. Además, emplear nubes de puntos en 3D permite tener un mayor control de la zona de estudio, disponiendo de una representación fehaciente de la realidad, con márgenes de error más que tolerables en el sector forestal (Apostol et al., 2007).

En cualquier caso, la estandarización de procedimientos de evaluación y cuantificación de compensación de emisiones empleando LiDAR puede suponer un paso importante a la hora de desarrollar y registrar proyectos de compensación más fácilmente (Tigges y Lakes, 2017). En el ámbito urbano, la planificación y mantenimiento de las infraestructuras verdes urbanas presenta un gran potencial, especialmente para instituciones públicas.

De hecho, el seguimiento y automatización de las masas arboladas urbanas con este propósito, mediante el uso de detección remota, constituye un camino aún en desarrollo, pero de gran interés, especialmente según se va mejorando la tecnología, tanto de escaneado como de procesado (Holopainen et al., 2013). Es por ello que este estudio cobra importancia, como una prueba de concepto exitosa para impulsar los procesos estandarizados de teledetección para el seguimiento y evaluación de emisiones en instituciones como la UPM, una entidad puntera en cuanto a avances tecnológicos y de sostenibilidad se refiere.

## 7. Agradecimientos

Ha resultado crucial para el desarrollo de este trabajo la cesión por parte de GRAFINTA SA del equipo de escaneo 3D y las licencias para trabajar con el software de procesado y postprocesado. Quiero hacer una especial mención en ese aspecto a Paloma, directora del Departamento de datos en 3D, por su predisposición e interés sobre el estudio, incluso cuando era sólo una idea.

He de mencionar que gran parte del conocimiento sobre LiDAR lo he adquirido trabajando en GRAFINTA, por lo que toda la formación que he recibido es algo que valoro y aprecio especialmente, ya que es una tecnología que me fascina y me alegra haber podido saber lo suficiente, así como disponer de los medios para



poder hacer este trabajo.

Adicionalmente, agradezco a la UPM la concesión de la Beca de Sostenibilidad para Trabajos de Fin de Titulación relacionados con la Sostenibilidad en los Campus Universitarios. El reconocimiento que conlleva ha sido especialmente alentador para trabajar en este estudio.

## 8. Bibliografía

ABBASS, K., QASIM, M.Z., SONG, H., MURSHED, M., MAHMOOD, H. y YOUNIS, I., 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 28, ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/s11356-022-19718-6.

AGARWAL, S., PARUNANDI, K.S. y CHAKRAVORTY, S., 2019. Robust Pose-Graph SLAM Using Absolute Orientation Sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, ISSN 2377-3766. DOI 10.1109/LRA.2019.2893436.

ÁLVAREZ GALLEGO, S., RUBIO SÁNCHEZ, A., & RODRÍGUEZ OLALLA, A., 2021. Conceptos básicos de la huella de carbono. 2a. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación.: [https://elibro.net/es/lc/upm/login\\_usuario/?next=/es/ereader/upm/184838/](https://elibro.net/es/lc/upm/login_usuario/?next=/es/ereader/upm/184838/). vol. 1.

ALVAREZ, S., BLANQUER, M. y RUBIO, A., 2013. Carbon footprint using the Compound Method based on Financial Accounts. The case of the School of Forestry Engineering, Technical University of Madrid. *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.11.050.

APOSTOL, B., CHIVULESCU, S., CICEU, A., PETRILA, M., PASCU, I.-S., APOSTOL, E.N., LECA, S., LORENT, A., TANASE, M. y BADEA, O., 2007. Data collection methods for forest inventory: a comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Research*, vol. 50, ISSN 2065-2445. DOI 10.15287/afr.2018.1189.

AVERY, C., 2024. Data snapshot: Pricing on the voluntary carbon market. *New Private Markets* [en línea]. [consulta: 6 septiembre 2024]. Disponible en: <https://www.newprivatemarkets.com/data-snapshot-pricing-on-the-voluntary-carbon-market/>.

BRACK, C.L., 2002. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution*, vol. 116, ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/S0269-7491(01)00251-2.

CATASTRO, 2024. Sede Electrónica del Catastro - Inicio. [en línea]. [consulta: 25 agosto 2024]. Disponible en: <https://www.sedecatastro.gob.es/>.



CHEN, X., LÄBE, T., MILIOTO, A., RÖHLING, T., VYSOTSKA, O., HAAG, A., BEHLEY, J. y STACHNISS, C., 2020. OverlapNet: Loop Closing for LiDAR-based SLAM. En: arXiv:2105.11344 [cs], Robotics: Science and Systems XVI [en línea]. S.l.: s.n., [consulta: 5 septiembre 2024]. DOI 10.15607/RSS.2020.XVI.009. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2105.11344>.

CHIAS NAVARRO, P., 1983. La Ciudad Universitaria de Madrid: planeamiento y realización [en línea]. phd. S.l.: E.T.S. Arquitectura (UPM). [consulta: 16 enero 2025]. Disponible en: <https://oa.upm.es/10629/>. east=-3.7187523000000056; north=40.4533216; name=Ciudad Universitaria, Madrid, Comunidad de Madrid, España

CNIG, O.A.C.N. de I., 2016. Centro de Descargas del CNIG (IGN). Centro de Descargas del CNIG [en línea]. [consulta: 7 septiembre 2024]. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>.

COMISIÓN EUROPEA, 2024. Glossary: Carbon dioxide equivalent. [en línea]. [consulta: 5 septiembre 2024]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon\\_dioxide\\_equivalent](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent).

DAVIET, F., RANGANATHAN, J. y DEVELOPMENT (WBCSD), W.B.C. for S., 2005. Greenhouse Gas Protocol: The GHG Protocol for Project Accounting [en línea]. S.l.: s.n. [consulta: 5 septiembre 2024]. ISBN 978-1-56973-598-5. Disponible en: <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol>.

ESPARZA JIMENEZ, J., DEVY, M. y GORDILLO, J.L., 2016. Visual EKF-SLAM from heterogeneous landmarks. Sensors, vol. 16, DOI 10.3390/s16040489.

GARCÍA GARCÍA, D., 2010. Estimación de variables de interés forestal basada en datos Lidar en el monte número 117 del C.U.P. término municipal de Cuenca. [en línea]. [consulta: 7 septiembre 2024]. Disponible en: <https://oa.upm.es/6171/>. east=-1.9881527000000006; north=40.1282707; name=Serrania de Cuenca, Cuenca, Castilla-La Mancha, España

GREENVALLEY INTERNATIONAL, 2024. LiGrip H300 Handheld Laser Scanning - GreenValley International. [en línea]. [consulta: 24 agosto 2024]. Disponible en: <https://www.greenvalleyintl.com/LiGripH300>.

HAINES, A. y PATZ, J.A., 2004. Health Effects of Climate Change. JAMA, vol. 291, no. 1, ISSN 0098-7484. DOI 10.1001/jama.291.1.99.

HOLOPAINEN, M., KANKARE, V., VASTARANTA, M., LIANG, X., LIN, Y., VAAJA, M.,



YU, X., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., KAARTINEN, H., KUKKO, A., TANHUANPÄÄ, T. y ALHO, P., 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 12, no. 4, ISSN 1618-8667. DOI 10.1016/j.ufug.2013.06.002.

JEFATURA DEL ESTADO, 2021. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética [en línea]. 21 mayo 2021. S.l.: s.n. [consulta: 16 agosto 2024]. Ley 7/2021. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>.

KOLLMANN, F., 1959. *Tecnología de la Madera Y Sus Aplicaciones* [en línea]. S.l.: Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. Disponible en: [https://books.google.es/books/about/Tecnologia\\_de\\_la\\_Madera\\_Y\\_Sus\\_Aplicacion.html?id=dFnauQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.es/books/about/Tecnologia_de_la_Madera_Y_Sus_Aplicacion.html?id=dFnauQEACAAJ&redir_esc=y).

LI, W., GUO, Q., JAKUBOWSKI, M. y KELLY, M., 2012. A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 78, DOI 10.14358/PERS.78.1.75.

LIU, Q., MA, W., ZHANG, J., LIU, Y., XU, D. y WANG, J., 2021. Point-cloud segmentation of individual trees in complex natural forest scenes based on a trunk-growth method. *Journal of Forestry Research*, vol. 32, no. 6, ISSN 1993-0607. DOI 10.1007/s11676-021-01303-1.

MCCARTHY, M.P., BEST, M.J. y BETTS, R.A., 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* [en línea], vol. 37, no. 9, [consulta: 15 agosto 2024]. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/2010GL042845. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010GL042845>.

MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R. y MUÑOZ, M., 2005. *Producción de Biomasa y Fijación de CO2 Por Los Bosques Españoles* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 978-84-7498-512-2. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/235639682\\_Produccion\\_de\\_Biomasa\\_y\\_Fijacion\\_de\\_CO2\\_Por\\_Los\\_Bosques\\_Espanoles](https://www.researchgate.net/publication/235639682_Produccion_de_Biomasa_y_Fijacion_de_CO2_Por_Los_Bosques_Espanoles).

MUYS, B., 2024. Mobile LiDAR technology for forest biomass inventories and carbon certification monitoring. *FACULTY OF BIOSCIENCE ENGINEERING* [en línea], Disponible en: <https://informa-forests.eu/wp-content/uploads/2022/10/Mobile-LiDAR-technology.pdf>.

NGUYEN, A. y LE, B., 2013. 3D point cloud segmentation: A survey. 2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM) [en línea]. S.l.: s.n., pp. 225-230. [consulta: 28 agosto 2024]. DOI 10.1109/RAM.2013.6758588. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6758588>.



PESCADOR, D., VAYREDA, J., ESCUDERO, A. y LLORET, F., 2019. Identificación y descripción de las variables utilizadas en el Inventario Forestal Nacional para la evaluación de la «Estructura y función» de los tipos de hábitat de bosque. . S.l.: s.n., pp. 135.

PITA CARPENTER, P.A., 1973. El inventario en la ordenación de montes. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. ISBN 978-84-500-5832-1. 630\*5 PIT INV, 630\*524 (S. 20.058) PIT INV, DS.44, DS.45, DS.1.238, SL.556 PIT INV, DB.94, 630\*5(S.15.150) ALFO, 630\*5 PITA INVE

PROUDMAN, A., RAMEZANI, M., DIGUMARTI, S.T., CHEBROLU, N. y FALLON, M., 2022. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. Robotics and Autonomous Systems, vol. 157, ISSN 0921-8890. DOI 10.1016/j.robot.2022.104240.

SCHMIDT, A., POULAIN, M., KLEIN, D., KRAUSE, K., PEÑA-ROJAS, K., SCHMIDT, H. y SCHULTE, A., 2009. Allometric above-belowground biomass equations for *Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) natural regeneration in the Chilean Patagonia. Annals of Forest Science, vol. 66, no. 5, ISSN 1297-966X. DOI 10.1051/forest/2009030.

SERRADA HIERRO, R., 2011. Apuntes de selvicultura. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. ISBN 978-84-96442-41-2. 630\*2 SER APU(11), CD-MA-269, 630\*2 SER APU CD, 630\*2 SERR APUN

SMITH, B., HAUGEN, H.A., COCHRAN, V.A., MURPHY, A.J., GUPTA, S., HOSOYA, Y., EATON, R., MCMAHON, M., HAMES, D., VANDERBORGHT, B., EDDIS, M., OREN, K., SEGALÉN, L., MARACHE, M., ACOSTA, R., CAMOBRECO, V., EPA, U.S., CUMMIS, C., EPA, U.S. y COOK, E., 2019. Protocolo de Gases de Efecto Invernadero. Edición Revisada. [en línea], [consulta: 5 septiembre 2024]. Disponible en: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo\\_spanish.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo_spanish.pdf).

TER-MIKAELIAN, M.T. y KORZUKHIN, M.D., 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. Forest Ecology and Management, vol. 97, no. 1, ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/S0378-1127(97)00019-4.

TIGGES, J. y LAKES, T., 2017. High resolution remote sensing for reducing uncertainties in urban forest carbon offset life cycle assessments. Carbon Balance and Management, vol. 12, DOI 10.1186/s13021-017-0085-x.

UPM, 2016. Huella de Carbono de la Universidad Politécnica de Madrid – Sostenibles. [en línea]. [consulta: 17 agosto 2024]. Disponible en: <https://sostenibilidad.upm.es/huella-de-carbono-de-la-universidad-politecnica-de-madrid-2016/>.



UPM, 2023. Huella de Carbono UPM 2013-2021. Huella de carbono UPM [en línea], [consulta: 15 agosto 2024]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/carbonfootprintmontes/proyectos-de-impacto/informes-de-huella-de-carbono?authuser=0>.

UPM, 2024. Sostenibles – Página oficial de Sostenibilidad en la Universidad Politécnica de Madrid. [en línea]. [consulta: 17 agosto 2024]. Disponible en: <https://sostenibilidad.upm.es/>.

### **Estudio de la compensación de la huella de carbono de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural por parte del Arboreto de Montes, empleando tecnología HLS (LiDAR)**

LÓPEZ TRAPERO, R. (1), CRUZ JOSA, D. (2), AGUIRRE ARNAIZ, A. (1,3)

(1) Departamento de Sistemas y Recursos Naturales. E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

(2) Departamento de datos 3D, GRAFINTA SA.

(3) Centro para la Conservación de la Biodiversidad y el Desarrollo Sostenible (CBDS), E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

#### **Resumen**

Bajo la premisa actual del cambio climático, las evaluaciones de los procesos de mitigación y compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero son cada vez más numerosas e importantes.

Así, el principal objetivo de este estudio es ofrecer una metodología para la determinación de la biomasa y, por extensión, del carbono fijado por el arbolado urbano en las ciudades. Para ello, se ha analizado el arboreto de la ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural. Con este fin, se ha empleado tecnología LiDAR, en concreto, un escáner 3D de mano, que emplea un algoritmo de localización y mapeo simultáneo.

Mediante el escaneado del Arboreto de la ETSI de Montes, se han obtenido los parámetros forestales de los pies necesarios para la estimación de su biomasa. Como resultado, se han obtenido 15,36 t de CO<sub>2</sub> equivalente anuales, lo cual suponen unas fijaciones medias anuales de aproximadamente 15,36 t de CO<sub>2</sub> eq el 10% de la huella de carbono de la ETSI de Montes en 2023 y el 0,5 % de las emisiones de toda la UPM para ese mismo año.

Los resultados obtenidos revelan que la metodología desarrollada cumple los objetivos planteados y demuestra su viabilidad para la implementación de procesos estandarizados de evaluación de compensación de emisiones mediante



teledetección.

### **Palabras clave**

Lidar, slam, compensación, carbono, biomasa.

#### **1. Introducción**

Para cumplir con el Pacto Verde Europeo y los ODS de la Agenda 2030, España ha traspuesto a su ordenamiento jurídico la Ley 7/2021, de cambio climático y transición energética (Jefatura del Estado, 2021). Así, se ha constituido el Marco estratégico de Energía y Clima creado desde 2019, estructurado en torno a 3 ejes principales: mitigación, adaptación y transición, todo ello orientado a la descarbonización de la economía española.

Una de las consecuencias más importantes de este cambio climático es el detrimento de la salud humana derivado del estrés térmico, la polución aérea, la proliferación de alérgenos y enfermedades infecciosas, entre otras repercusiones, además de factores psicológicos perniciosos (Haines y Patz, 2004). Debido a las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su consecuente acumulación en áreas metropolitanas, se genera, además de la obvia disminución de la calidad del aire, un aumento significativo de las temperaturas en las conocidas islas de calor que incluso contribuyen a rápidas modificaciones climáticas a nivel local (McCarthy et al., 2010).

Por tanto, una de las principales medidas en materia de sostenibilidad es el seguimiento y control de emisiones mediante la estimación de la huella de carbono (Álvarez et al., 2021), que son el conjunto de emisiones y absorciones de GEI que son producidas como consecuencia de una actividad asociada a un individuo, organización, evento o producto. Su cálculo se ha impulsado en todo tipo de organizaciones bajo el GHG Protocol, (Daviet et al., 2005).

Actualmente es el procedimiento seguido por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD) para el cálculo de emisiones. De acuerdo con esto, los cálculos estiman los alcances, que son grupos que incluyen las fuentes emisoras de GEI que puede tener una organización. Según el GHG Protocol existen 3 alcances, cuyas categorías se pueden observar en la Figura 1.

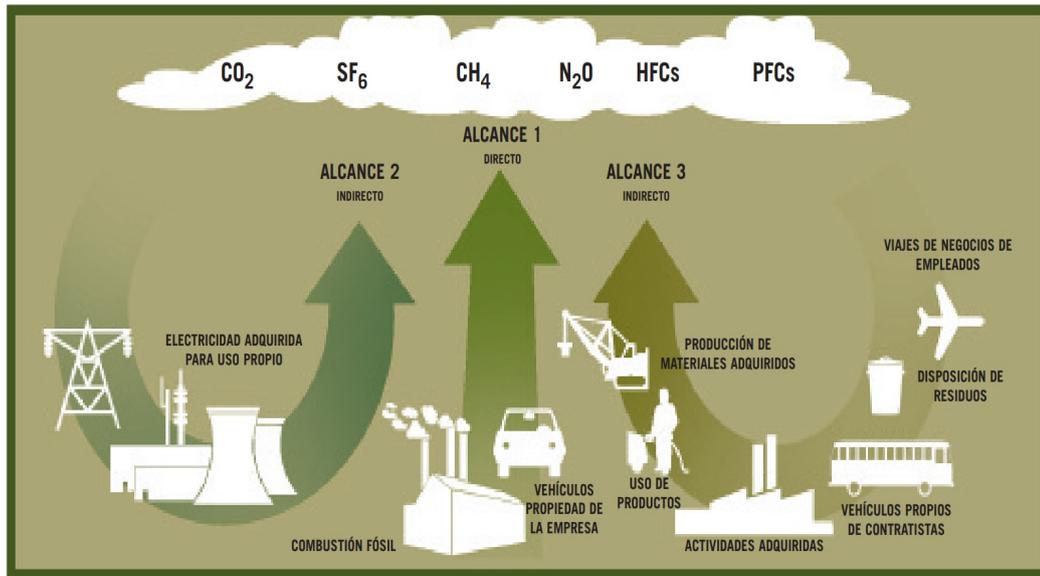


Figura 1. Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena de valor. (Smith et al., 2019)

La unidad estándar de medida de la huella de carbono es la tonelada de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{t CO}_2 \text{ eq}$ ), usada para comparar las emisiones de varios GEI, convirtiendo cantidades de otros GEI con el mismo potencial de calentamiento global, en su equivalente en dióxido de carbono (Comisión Europea, 2024).

Dentro de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural (ETSI Montes) ha sido pionera a la hora de desarrollar un cálculo de su huella de carbono, empezando en el año 2011 incluyendo los 3 alcances dentro de sus estimaciones (Alvarez et al., 2013). Ya en el 2016, la UPM expande las estimaciones, a todas las escuelas y centros de la UPM. La última estimación, de septiembre de 2023, incluye los 3 alcances para la secuencia 2013-2021 (UPM, 2023).

Dentro de la UPM, es la ETSI Montes el primer centro educativo que registró su huella de carbono en la OECC en el año 2011, para los alcances 1 y 2, repitiéndolo en 2012 y 2013 incluyendo el alcance 3. Estos análisis revelan que son las emisiones correspondientes al alcance 3 las principales contribuidoras al cómputo total.

A partir de 2015 el Equipo Huella de Carbono UPM se consolida y es en 2016 cuando se presenta el cálculo histórico de emisiones para la secuencia 2013-2016 en los alcances 1 y 2 de toda la UPM, incluyendo un desglose por campus y escuelas (UPM, 2016).

Los resultados del Equipo Huella de Carbono UPM permiten observar una reducción progresiva de las emisiones. Destaca el caso de los años 2020 y 2021, los



cuales cuentan con un cómputo nulo de emisiones asociados al alcance 2, correspondiente a las emisiones indirectas derivadas de la adquisición de energía eléctrica, algo que supone un gran paso en el proceso de descarbonización de la UPM.

Para 2023 se sabe que las emisiones globales han sido de 2.947,14 t CO<sub>2</sub> eq, de las cuales la ETSI Montes ha contribuido un 5,02 %, con 147,82 t CO<sub>2</sub> eq (UPM, 2024). Esto la sitúa como la 7ª facultad con más emisiones de GEI dentro de la UPM a día de hoy.

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es establecer una metodología para el cálculo de la biomasa del arbolado urbano, de manera que se pueda estimar el carbono fijado. Con este fin, este estudio se ha centrado en la compensación de la huella de carbono de la ETSI Montes por parte de su arboreto. Para alcanzar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Obtención de los principales parámetros del arbolado del Arboreto de Montes.
- Estimación de la biomasa, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, así como el contenido de carbono y peso en t CO<sub>2</sub> eq.
- Cálculo de la proporción de la huella de carbono de la ETSI de Montes establecida para 2023, compensada por la fijación realizada por el Arboreto de Montes a partir de los cálculos de biomasa previos.
- Evaluación del impacto y alcance del estudio en materia de mitigación del cambio climático y en particular, sobre compensación de emisiones dentro de la UPM.

## 3. Metodología

El inventario de la vegetación presente en el Arboreto de la ETSI Montes se ha realizado mediante un escaneo en 3D con un escáner láser de mano, en particular el LiGrip H300 de Green Valley International, que utiliza un algoritmo de localización y mapeo simultáneo, lo que se conoce como tecnología SLAM y que permite capturar nubes de puntos en movimiento (Esparza et al., 2016; Agarwal et al., 2019).

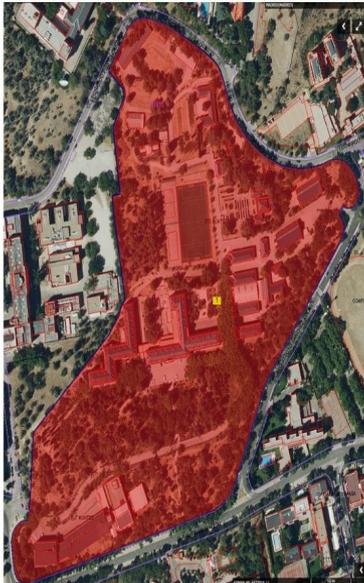
El cabezal tiene incorporada una cámara panorámica, capaz de capturar vídeo en 360° a calidad 4K, empleada para colorear la nube puntos. El LiGrip H300 emplea un sensor LiDAR electromecánico HESAI XT32, con una distancia máxima de funcionamiento de 300 metros. Presenta 32 canales, que constituyen el número de haces láser emitidos por el equipo, lo que permite obtener nubes densas y capturar elementos a menos de 0,5m del escáner, generando 640.000 puntos por segundo, cada uno con un único retorno (o reflejo), dando lugar a una precisión relativa de ±1 cm.

La captura de los datos se ha llevado a cabo a través de la aplicación móvil de Green Valley International (GreenValley International 2024) que va instalada en un smartphone. Esta permite realizar una gestión de proyectos completa, controlando sus funciones y procesos de captura de datos.

Los escaneados se han compaginado con la toma de videos para colorear las nubes de puntos resultantes. Los archivos generados de los escaneos se han procesado mediante el software LiFuser, de Green Valley International.

Adicionalmente, todo el trabajo de postprocesado se ha desarrollado en el paquete de software suite de Green Valley International, que incluye LiDAR360 y LiDAR360MLS, ambos con todos sus módulos incluidos.

Como se ha comentado, la zona de estudio constituye el Arboreto de Montes (Figura 2). Los escaneados se llevaron a cabo describiendo trayectorias cerradas y, siguiendo las recomendaciones del proveedor Green Valley International, con la cámara encendida y en configuración de video sin exceder los 15 minutos, con una velocidad de escaneado no superior a 1 m/s en la configuración de mano, evitando aceleraciones súbitas y giros bruscos del cabezal.



*Figura 2. Parcela de la ETSI Montes. (Catastro, 2024)*

Teniendo esto en cuenta, se estimó un rendimiento medio en entornos forestales de 1,5 ha cada 20 minutos. Considerando los tiempos de desplazamiento entre los puntos de inicio de los diferentes escaneados, así como el asociado a la puesta a punto del equipo, se consideró aumentar esta estimación a 35 minutos.

Para poder establecer un plan de trabajo en base a la valoración del rendimiento, se obtuvo de la Sede Electrónica del Catastro (Catastro, 2024), la superficie de la parcela a escanear (Tabla 1).

Tabla 1. Información de la parcela catastral de la ETSI Montes. Fuente: (Catastro, 2024)

Información de la parcela catastral 8781501VK3788B	
Dirección	Calle Leonardo Prieto Castro, 001. Madrid [Madrid]
Descripción de la parcela	Múltiples inmuebles, división horizontal. E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural
Superficie de la parcela (m <sup>2</sup> )	98.582
Superficie construida proyectada (m <sup>2</sup> )	15.709
Superficie no construida proyectada (m <sup>2</sup> )	82.873

Para facilitar el registro y alineado, es esencial la inclusión de superficies comunes solapadas entre escaneados, que deben suponer entre el 20 y el 40 % de superficie común entre escaneados (Chen et al., 2020) para facilitar el funcionamiento del algoritmo de alineación y reducir los posibles errores de registro. Si se aumenta la superficie de escaneado para cumplir con este requerimiento de postprocesado, esta puede sumar 11,6 ha en total, que es incluso superior a la total disponible en la parcela.

De esta manera, se estimó que el escaneado de esta superficie, en base al rendimiento antes mencionado de 1,5 ha cada 35 min, llevaría cerca de 4,5 h de trabajo.

Debido a que el sistema de navegación escogido en el trabajo de campo emplea únicamente los datos del sistema inercial, todos los archivos se encuentran en un sistema de coordenadas locales, propio de cada uno de ellos. Para poder alinearlos sin emplear un sistema de referencia de coordenadas, se enlazaron escaneados a partir de rasgos identificativos que eran comunes entre ellos, de ahí que se empleó un registro por superficies comunes mediante algoritmos de alineación.

Una vez aplicada la alineación burda y con las zonas comunes de ambos escaneados aproximadamente en el mismo sitio, se seleccionaron sobre la nube de puntos las zonas empleadas para aplicar el algoritmo.

El fichero unificado resultante fue registrado una vez más empleando herramientas manuales para alinearse con un escaneado georreferenciado de la ETSI Montes, en este caso un vuelo LiDAR del PNOA del año 2016 (CNIG, 2016), que se empleó de como referencia. Esto permitió la transformación de las coordenadas del escaneado, desde un sistema local a uno de coordenadas geográficas, particularmente el que emplea la nube de puntos utilizada en esta alineación: el ETRS 89/ UTM zona 30N.



Se empleó un procedimiento para llevar a cabo una clasificación de la nube unificada que consiste en asignar a cada punto un valor numérico identificativo que lo asocia a una categoría descriptiva. Esto permite que agruparlos en elementos distintivos para que puedan ser identificados e interpretados por el software.

Con la clasificación terminada, se procedió a segmentar la nube de puntos, que se trata de un procedimiento que clasifica las nubes de puntos en múltiples regiones homogéneas, teniendo los puntos contenidos dentro de estas, las mismas propiedades (Nguyen y Le, 2013). El algoritmo segmentación forestal por semillas de Green Valley International (Li et al. 2012), emplea como criterio de agregación el espacio relativo entre árboles, creando una región a partir de la semilla (puntos sobre los que se inicia la segmentación) y haciéndola crecer añadiéndola puntos que cumplen los criterios, construyendo poco a poco el árbol desde el tronco (Liu et al., 2021).

La normalización se llevó a cabo empleando los puntos de suelo. Adicionalmente, se mantuvieron los valores originales de Z (altura), para poder desnormalizar la nube de puntos tras el proceso de segmentación.

La determinación de la clasificación (conífera o frondosa) perteneciente a los árboles se llevó a cabo con el apoyo del contenido multimedia proporcionado por los videos grabados durante los escaneados, para facilitar la identificación. Las categorías asociadas se introdujeron en una columna adicional de la tabla de atributos del archivo de semillas, determinando para cada caso si se trataba de una conífera (c) o una frondosa (f). El último tratamiento de la nube de puntos fue revertir el proceso de normalización.

A partir de este momento el tratamiento de los datos se realizó en Excel. Por tanto, aparte del orden de especie al que pertenece cada pie, que fue introducido manualmente, los parámetros extraídos calculados por el software de procesado incluyen:

- d, diámetro normal, medido en cm
- h, altura total del árbol, medida en m
- $d_{\text{copa}}$ , diámetro de copa, medido en m
- $S_{\text{copa}}$ , superficie de copa, medida en  $m^2$

A partir de estos datos se llevaron a cabo una serie de cálculos para obtener diferentes índices de espesura y parámetros medios de masa, de acuerdo con la metodología del Inventario Forestal Nacional (Pescador et al. ,2019) y un Trabajo de Fin de Titulación con características similares a este estudio, donde se estiman las variables de interés basadas en datos LiDAR (García García, 2010).



Inicialmente se determinó la distribución de la población en clases diamétricas (CD), que se establecieron con 5 cm de amplitud, partiendo de un  $d$  mínimo de 2,5 cm para incluir en las estimaciones a todos los pies inventariados.

Entre el resto de las variables evaluadas se encuentra:

- Índices de espesura:
  - Densidad de pies (N), en pies/ha
  - Área basimétrica total (G), en  $m^2/ha$
  - Fracción de cubida cubierta (FCC), en porcentaje
- Parámetros medios de masa, donde se calculan los valores aritméticos medios de  $d$ ,  $h$ ,  $d_{copa}$  y  $S_{copa}$ , además de la biomasa aérea, radical y total. Su cálculo se explica a continuación.

Una vez obtenidas todas las variables necesarias, se estimó la biomasa de cada uno de pies de la muestra. Para ello, se han empleado las ecuaciones alométricas de Gregorio Montero (Montero et al., 2005), utilizando los grupos de especies “Otras coníferas” y “Otras frondosas”. Estas ecuaciones siguen la estructura de una ecuación alométrica (potencial), que linealizada resulta en:

$$B_x = a + b \cdot \ln B_x \text{ (Ec. 1)}$$

donde:

$B_x$  = biomasa en kg para las distintas “x” fracciones del árbol. De esta forma  $B_T$  constituye la biomasa total,  $B_r$  la radical y  $B_A$  la aérea (kg)

$d$  = diámetro normal (cm)

$a, b$  = parámetros adimensionales estimados para el modelo

Esto hace que la ecuación permita obtener los valores modulares de biomasa empleando los parámetros recogidos en la Tabla 2.

Aunque la parametrización en este caso está planteada para calcular directamente  $B_A$  y  $B_r$ , se puede determinar el cálculo de  $B_T$  como el sumatorio de ambos resultados.

*Tabla 2. Valor de los parámetros de la función (a y b, Ec.1).  $B_T$  constituye la biomasa aérea total en kg y  $B_r$  la biomasa radical en kg. Fuente: (Montero et al., 2005)*

Y	Parámetros	
	a	b

Otras coníferas		
B <sub>T</sub>	-2,21637	2,35162
B <sub>r</sub>	-2,46359	2,13727
Otras frondosas		
B <sub>T</sub>	-1,87511	2,29843
B <sub>r</sub>	-1,38199	1,96764

Por tanto, para poder comparar los resultados dados por esta ecuación alométrica con las estimaciones de emisiones, es necesario determinar el contenido de carbono de la biomasa seca calculada.

La composición de la madera, aunque no idéntica, es similar en las distintas especies leñosas, así como también dentro de un mismo árbol, en sus diversas partes, de manera que contienen aproximadamente, un 50% de carbono (Kollmann, 1959). En este caso es el tipo de porcentaje que se ha aplicado.

Con esta conversión, se obtiene el contenido en peso atómico de carbono en la biomasa seca para la clasificación estimada c y f. Para poder pasarlas a las mismas unidades empleadas para estimar la huella de carbono (t de CO<sub>2</sub> eq), es necesario multiplicarlas por la relación entre el peso atómico de C y el peso de una molécula de CO<sub>2</sub> (44/12=3,67).

Hay que tener en cuenta que los datos de huella de carbono UPM y la ETSI de Montes se obtienen a partir de los valores de emisión del año 2023, es decir que sus unidades son t de CO<sub>2</sub> eq/año. Para poder compararlos con los resultados obtenidos es necesario dar un valor de crecimiento medio anual de las fijaciones.

Normalmente se aplica al volumen, pero debido a la correspondencia directa que tiene con la biomasa, según la densidad de las especies, y de la biomasa con las fijaciones de carbono, se puede decir que este valor de crecimiento medio anual de las fijaciones del Arboreto es el valor acumulado (el obtenido), entre el número de años que ha tardado en alcanzar ese valor. Teniendo en cuenta que las obras del recinto de la ETSI de Montes finalizaron en 1945 (Chias Navarro, 1983), se puede determinar que el Arboreto de Montes ha estado fijando carbono durante 79 años hasta 2024.

Finalmente, para poner en perspectiva las ganancias de estos mecanismos de compensación, se ha realizado una estimación monetaria, traduciendo las fijaciones en créditos de carbono y aplicando su precio por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente en el mercado voluntario. Empleando las últimas valoraciones del año 2023, donde el precio del derecho de emisión es de 8,86 € t/CO<sub>2</sub> eq (Avery, 2024).

#### 4. Resultados

El trabajo de campo se consolidó en un total de 18 escaneados capturados en 4,5 h de trabajo efectivo, tal y como se estimó inicialmente. En la Figura 3 se muestra

la distribución espacial de estos trabajos, así como el orden de los escaneados.

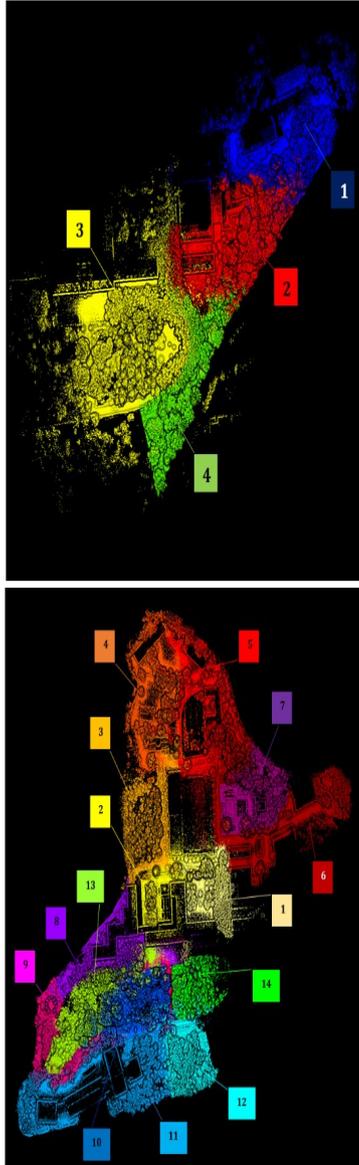


Figura 3. Planos con la distribución espacial de escaneados, numerados por orden de realización. Izquierda: escaneados 24-08-2024. Derecha: escaneados 25-08-2024.

Debido a la fecha en la que se realizó el trabajo, el sotobosque había crecido a alturas superiores a 1 m en algunos casos, compuesto por un denso pasto de herbáceas anuales. Esta situación contribuía no sólo a una reducción del rendimiento de trabajo por la dificultad para atravesar ciertas zonas, sino también al fenómeno de oclusión del escenario, algo especialmente relevante a la hora de estimar parámetros como  $d$ , medido a 1,3 m sobre el fuste.

La totalidad de los archivos 3D del estudio han ocupado 1.049 GB de almacenamiento, de los cuales un 61,10 % está vinculado exclusivamente a datos LiDAR, indicando la magnitud del proyecto.

La Tabla 4 muestra los resultados derivados del procesado de las nubes de puntos,

resumidos en función de los valores medios de la masa.

*Tabla 4. Resumen de los resultados del inventario del Arboreto de Montes.  $d_m$ : diámetro normal medio,  $h$ : altura total media,  $d_{copa}$ : diámetro de copa medio,  $S_{copa}$ : superficie de copa media,  $A$ : biomasa aérea media,  $r$ : biomasa radical media,  $T$ : biomasa total media*

Categoría	Parámetros dasométricos medios de la masa						
	$d_m$ (cm)	$h$ (m)	$d_{copa}$ (m)	$S_{copa}$ (m <sup>2</sup> )	$A$ (kg)	$r$ (kg)	$T$ (kg)
Coníferas	31,5	16,2	5,8	32,4	485,35	169,67	655,02
Fronosas	21,5	10,3	5,4	29,4	284,39	51,99	336,37
Total	26,5	13,2	5,6	30,9	315,68	169,67	485,35

A partir de los índices de espesura calculados para la masa (Tabla 5), se observa que se han podido recopilar y evaluar 1.403 pies. Teniendo en cuenta que la superficie aproximada del arboreto es de 8,27 ha y que se ha escaneado en su totalidad, la densidad de árboles que cumplen con los requisitos es de 170 pies/ha de media, aunque obviamente el espaciado no es consistente en toda el área de estudio, ya que dentro de esta se incluyen zonas desarboladas debido a la presencia de las instalaciones del centro y otras dotaciones e infraestructuras.

*Tabla 5. Índices de espesura calculados para el Arboreto de Montes.  $n$ : número de pies,  $N$ : densidad,  $G$ : área basimétrica total,  $S_{copa}$ : sumatorio de superficie de copa total,  $S_T$ : superficie total de la parcela, FCC: fracción de cabida cubierta*

Categoría	Índices de espesura						
	$n$	Relación de especies	$N$ (pies/ha)	$G$ (m <sup>2</sup> )	$S_{copa}$ (m <sup>2</sup> )	$S_T$ (m <sup>2</sup> )	FCC (%)
Coníferas	597	43%	73	56,0	19,3	82.873	23%
Fronosas	806	57%	98	40,5	23,7		29%
Total	1.403	100%	170	96,6	42,9		52%

Algo similar ocurre a la hora de estimar la espesura a partir de la fracción de cabida cubierta (FCC), donde el valor medio para el arboreto es del 52%, lo cual indica que presenta una espesura abierta (Pita Carpenter, 1973), siendo incluso inferior (espesura clara), para cada orden por separado.

Se puede observar que la distribución de especies en el arboreto es de aproximadamente la mitad para cada orden, aunque existe una mayor presencia de frondosas que de coníferas (un 14% más), presentando estas últimas como contraste, mayores dimensiones para todos los parámetros evaluados.

También se aprecia que el principal aporte de biomasa lo realiza la parte aérea del arbolado en ambos casos, aunque el sistema radical supone un mayor aporte en el caso de las coníferas.

Un análisis de la distribución diamétrica a lo largo del Arboreto de Montes permitiría determinar su forma fundamental de masa, aunque se debe tener en cuenta la distribución espacial de las zonas arboladas. Ésta hace referencia a la distribución espacial de las clases de edad, que en este caso son artificiales y están determinadas por las CD.

Para interpretar más claramente los resultados, se han representado gráficamente las distribuciones diamétricas en función de la densidad. En la Figura 5, se puede observar cómo la forma fundamental de masa para las frondosas se corresponde con una masa irregular, ya que su distribución se acerca a la de una exponencial negativa (Serrada Hierro, 2011), con prevalencia de CD pequeñas, mientras que las coníferas se asemejan a una distribución normal, lo cual indica que se trata de una masa regular. En el caso de las frondosas, se podría llegar a pensar que tiene una distribución normal con una curva perteneciente a una masa muy joven, ya que hay menos pies en la CD 5 que en las siguientes 3 clases, sin embargo, esto se puede deber a un sesgo derivado de las limitaciones del programa de procesado a la hora de identificar  $d$  inferiores a 10 cm (Proudman et al., 2022).

Por otro lado, ambos órdenes de especies se encuentran entremezclados a lo largo de la superficie del arboreto, de manera que su distribución conjunta también se puede interpretar como una normal, indicando que se trata de una masa regular.

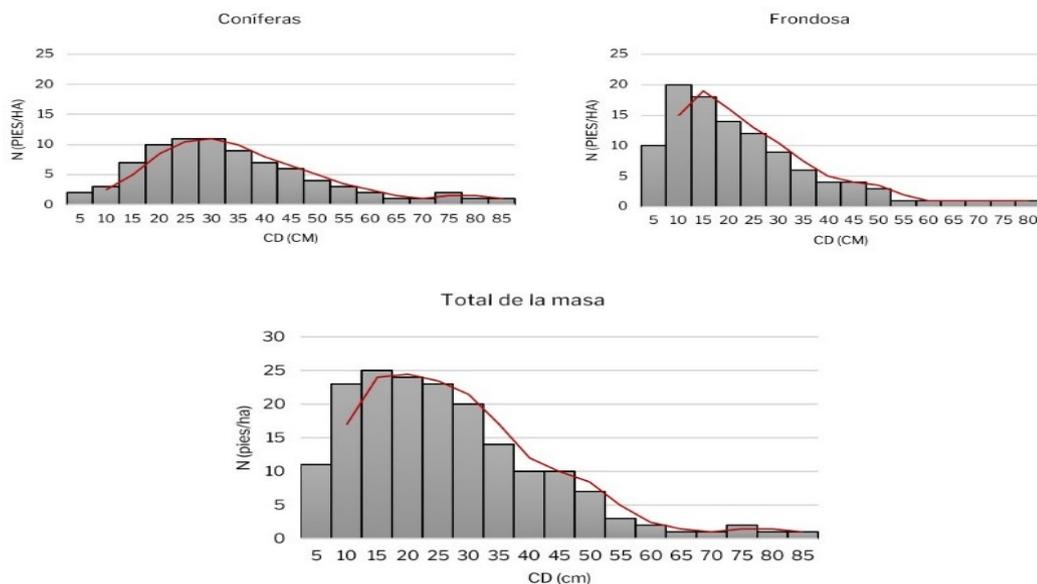


Figura 5. Distribución diamétrica en función de la densidad de la población de estudio, diferenciando la total (abajo) de los cálculos según orden de especies

(arriba). En rojo se indica la línea de tendencia. CD: clase diamétrica, N: densidad.

Adicionalmente, la Figura 10 permite observar cómo se ha producido el aporte y distribución de biomasa por CD y por orden. En este caso, los árboles con un valor de  $d$  comprendido entre 27,5 cm y 52,5 cm suponen la principal contribución. Esto guarda relación con la densidad de las CD correspondientes (30 a 50) para ambos órdenes, independientemente de que presentes una forma fundamental diferente. Esto se debe a que la distribución diamétrica a partir de la CD 30 es bastante similar en ambos casos.

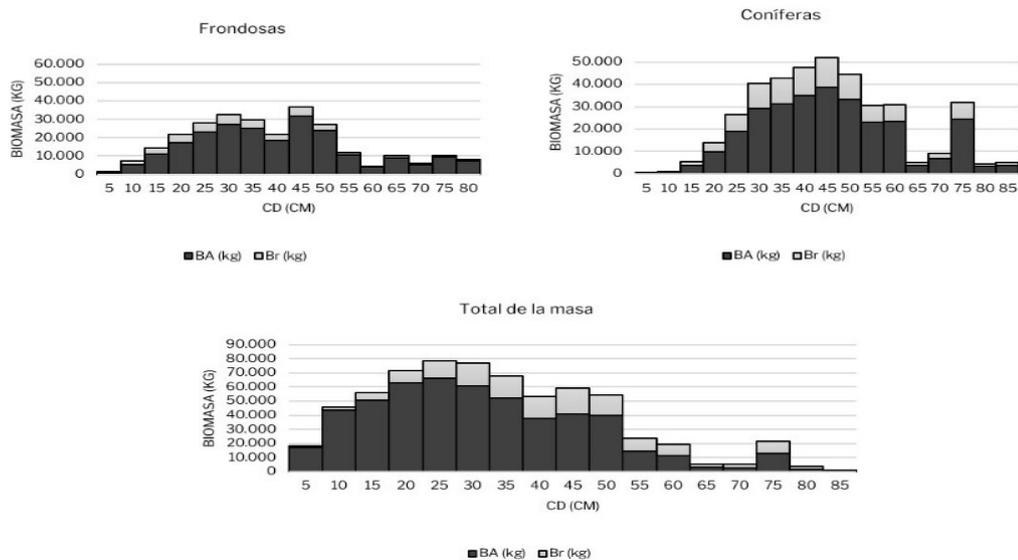


Figura 6. Distribución diamétrica en función de la biomasa de la población de estudio, diferenciando la total (abajo) de los cálculos según orden de especies (arriba). CD: clase diamétrica

Destaca el aporte realizado por pies de conífera de grandes diámetros, particularmente los pertenecientes a la CD 75, especialmente teniendo en cuenta que presentan una densidad inferior a las de las CD más prevalentes.

Finalmente, los cálculos de biomasa para toda la masa determinan que la producción total de 662,06 t de materia vegetal, que se traducen en la fijación 1.213,97 t de  $\text{CO}_2$  eq. Además, se confirma que el principal aporte a la captura de carbono es realizado por la biomasa aérea, computando más del 75% (Tabla 6). Se corrobora que el aporte medio por cada pie de frondosa es menor que para las coníferas, ya que el sumatorio total indica un 9% más de fijación, tanto en la biomasa radical como en la aérea, con una diferencia unas 200 t de  $\text{CO}_2$  eq entre ambos órdenes. De esta manera, a pesar de que hay un menor número de coníferas en la masa, estas suponen casi el 60% de la aportación.

Tabla 6. Estimaciones de biomasa y carbono fijado por el Arboreto de Montes en base a los resultados del inventario

Cálculos de biomasa					
Coníferas					
	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa
Aérea	289.755,34	50%	144.877,67	531,22	44%
Radical	101.294,12		50.647,06	185,71	15%
Total	391.049,46		195.524,73	716,92	59%
Fronchosas					
	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa
Aérea	229.214,77	50%	114.607,39	420,23	35%
Radical	41.901,49		20.950,75	76,82	6%
Total	271.116,27		135.558,13	497,05	41%
Total de la masa					
	Biomasa (kg)	Porcentaje en peso de carbono de la biomasa	Peso en C (kg)	Peso en CO <sub>2</sub> eq (t)	Aporte respecto al total de la masa (%)
Aérea	518.970,11	50%	951,45	951,45	78%
Radical	143.195,61		71.597,81	262,53	22%
Total	662.165,73		331.082,86	1.213,97	100%

En base a estos resultados se observa cómo estos cálculos de fijación compensan las emisiones de la ETSI Montes. Ahora bien, aunque los resultados obtenidos se proporcionan en valor absoluto (t CO<sub>2</sub> eq), deben compararse con los datos de emisiones anuales de 2023 (t CO<sub>2</sub> eq/año). Esto se debe a que, en el momento de realización de este estudio, no se conoce ninguna estimación realizada previamente del carbono fijado por el Arboreto de Montes.

Por tanto, en los 79 años que se han sucedido desde su creación hasta 2024, se han fijado 1.213,97 t de CO<sub>2</sub> eq, lo cual suponen unas fijaciones medias anuales de aproximadamente 15,36 t de CO<sub>2</sub> eq.

Este valor supone el 10% de las 147,82 t CO<sub>2</sub> eq, que la ETSI Montes tuvo como huella de carbono en 2023. Adicionalmente, esta captura compensaría el 0,5 % de las 2.947,14 t CO<sub>2</sub> eq emitidas por toda la UPM para ese mismo año.

Finalmente, si tenemos en cuenta el precio del derecho de emisión en el mercado voluntario de carbono, la fijación realizada por el Arboreto de Montes supone un total de 10.754,09 €, en 2024, tras capturar carbono desde 1945.

## 5. Discusión



Los resultados de la inventariación a través del software de Green Valley son sólidos y permiten fundamentar otros cálculos de existencias, sin embargo, el empleo de ecuaciones alométricas requiere una determinación más exacta de las especies, ya que la parametrización que emplean y los modelos en los que se basan funcionan a nivel local y se basan en soluciones particulares para cada una de ellas.

De acuerdo con esto, debido a la dependencia del valor del diámetro normal para obtener los cálculos de biomasa, se puede observar que un aumento de 10 cm sobre el diámetro normal medio de cada árbol supone que este produce de promedio, aproximadamente 1,7 veces más biomasa que una frondosa.

Esto también viene derivado de las limitaciones que tiene actualmente la tecnología de postprocesado en materia de identificación de especies, de forma que es muy posible que en el futuro estos inconvenientes se vayan resolviendo con los avances que se llevan a cabo en este campo.

También es cierto que uno de sus principales inconvenientes es que la capacidad de replicar el procedimiento planteado está supeditada a la posibilidad de realizar una mayor inversión inicial en materiales, tanto hardware como software, que son más costosas que las herramientas usadas con técnicas convencionales. Además, el procedimiento de tratamiento de datos en gabinete requiere una inversión importante de tiempo y personal especializado familiarizado con el software.

En el futuro se considera realizar un inventario mediante métodos tradicionales para contrastar la precisión de las mediciones obtenidas.

## 6. Conclusiones

A la vista de los resultados de este estudio, se confirma la viabilidad de una metodología que emplea la teledetección mediante tecnología LiDAR SLAM, para llevar a cabo estimaciones de la biomasa y la fijación de carbono del arbolado urbano.

La tecnología empleada permite la obtención de parámetros forestales de manera similar a cómo ocurriría con un inventariado pie a pie. Además, emplear nubes de puntos en 3D permite tener un mayor control de la zona de estudio, disponiendo de una representación fehaciente de la realidad, con márgenes de error más que tolerables en el sector forestal (Apostol et al., 2007).

En cualquier caso, la estandarización de procedimientos de evaluación y cuantificación de compensación de emisiones empleando LiDAR puede suponer un paso importante a la hora de desarrollar y registrar proyectos de compensación más fácilmente (Tigges y Lakes, 2017). En el ámbito urbano, la planificación y mantenimiento de las infraestructuras verdes urbanas presenta un gran potencial, especialmente para instituciones públicas.



De hecho, el seguimiento y automatización de las masas arboladas urbanas con este propósito, mediante el uso de detección remota, constituye un camino aún en desarrollo, pero de gran interés, especialmente según se va mejorando la tecnología, tanto de escaneado como de procesado (Holopainen et al., 2013). Es por ello que este estudio cobra importancia, como una prueba de concepto exitosa para impulsar los procesos estandarizados de teledetección para el seguimiento y evaluación de emisiones en instituciones como la UPM, una entidad puntera en cuanto a avances tecnológicos y de sostenibilidad se refiere.

## 7. Agradecimientos

Ha resultado crucial para el desarrollo de este trabajo la cesión por parte de GRAFINTA SA del equipo de escaneo 3D y las licencias para trabajar con el software de procesado y postprocesado. Quiero hacer una especial mención en ese aspecto a Paloma, directora del Departamento de datos en 3D, por su predisposición e interés sobre el estudio, incluso cuando era sólo una idea.

He de mencionar que gran parte del conocimiento sobre LiDAR lo he adquirido trabajando en GRAFINTA, por lo que toda la formación que he recibido es algo que valoro y aprecio especialmente, ya que es una tecnología que me fascina y me alegra haber podido saber lo suficiente, así como disponer de los medios para poder hacer este trabajo.

Adicionalmente, agradezco a la UPM la concesión de la Beca de Sostenibilidad para Trabajos de Fin de Titulación relacionados con la Sostenibilidad en los Campus Universitarios. El reconocimiento que conlleva ha sido especialmente alentador para trabajar en este estudio.

## 8. Bibliografía

ABBASS, K., QASIM, M.Z., SONG, H., MURSHED, M., MAHMOOD, H. y YOUNIS, I., 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 28, ISSN 1614-7499. DOI 10.1007/s11356-022-19718-6.

AGARWAL, S., PARUNANDI, K.S. y CHAKRAVORTY, S., 2019. Robust Pose-Graph SLAM Using Absolute Orientation Sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, ISSN 2377-3766. DOI 10.1109/LRA.2019.2893436.

ÁLVAREZ GALLEGO, S., RUBIO SÁNCHEZ, A., & RODRÍGUEZ OLALLA, A., 2021. Conceptos básicos de la huella de carbono. 2a. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación.: [https://elibro.net/es/lc/upm/login\\_usuario/?next=/es/ereader/upm/184838/](https://elibro.net/es/lc/upm/login_usuario/?next=/es/ereader/upm/184838/). vol. 1.

ALVAREZ, S., BLANQUER, M. y RUBIO, A., 2013. Carbon footprint using the Compound Method based on Financial Accounts. The case of the School of Forestry



Engineering, Technical University of Madrid. Journal of Cleaner Production, vol. 66, ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.11.050.

APOSTOL, B., CHIVULESCU, S., CICEU, A., PETRILA, M., PASCU, I.-S., APOSTOL, E.N., LECA, S., LORENT, A., TANASE, M. y BADEA, O., 2007. Data collection methods for forest inventory: a comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. Annals of Forest Research, vol. 50, ISSN 2065-2445. DOI 10.15287/afr.2018.1189.

AVERY, C., 2024. Data snapshot: Pricing on the voluntary carbon market. New Private Markets [en línea]. [consulta: 6 septiembre 2024]. Disponible en: <https://www.newprivatemarkets.com/data-snapshot-pricing-on-the-voluntary-carbon-market/>.

BRACK, C.L., 2002. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. Environmental Pollution, vol. 116, ISSN 0269-7491. DOI 10.1016/S0269-7491(01)00251-2.

CATASTRO, 2024. Sede Electrónica del Catastro - Inicio. [en línea]. [consulta: 25 agosto 2024]. Disponible en: <https://www.sedecatastro.gob.es/>.

CHEN, X., LÄBE, T., MILIOTO, A., RÖHLING, T., VYSOTSKA, O., HAAG, A., BEHLEY, J. y STACHNISS, C., 2020. OverlapNet: Loop Closing for LiDAR-based SLAM. En: arXiv:2105.11344 [cs], Robotics: Science and Systems XVI [en línea]. S.l.: s.n., [consulta: 5 septiembre 2024]. DOI 10.15607/RSS.2020.XVI.009. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2105.11344>.

CHIAS NAVARRO, P., 1983. La Ciudad Universitaria de Madrid: planeamiento y realización [en línea]. phd. S.l.: E.T.S. Arquitectura (UPM). [consulta: 16 enero 2025]. Disponible en: <https://oa.upm.es/10629/>. east=-3.7187523000000056; north=40.4533216; name=Ciudad Universitaria, Madrid, Comunidad de Madrid, España

CNIG, O.A.C.N. de I., 2016. Centro de Descargas del CNIG (IGN). Centro de Descargas del CNIG [en línea]. [consulta: 7 septiembre 2024]. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>.

COMISIÓN EUROPEA, 2024. Glossary: Carbon dioxide equivalent. [en línea]. [consulta: 5 septiembre 2024]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon\\_dioxide\\_equivalent](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent).

DAVIET, F., RANGANATHAN, J. y DEVELOPMENT (WBCSD), W.B.C. for S., 2005. Greenhouse Gas Protocol: The GHG Protocol for Project Accounting [en línea]. S.l.:



s.n. [consulta: 5 septiembre 2024]. ISBN 978-1-56973-598-5. Disponible en: <https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol>.

ESPARZA JIMENEZ, J., DEVY, M. y GORDILLO, J.L., 2016. Visual EKF-SLAM from heterogeneous landmarks. *Sensors*, vol. 16, DOI 10.3390/s16040489.

GARCÍA GARCÍA, D., 2010. Estimación de variables de interés forestal basada en datos Lidar en el monte número 117 del C.U.P. término municipal de Cuenca. [en línea]. [consulta: 7 septiembre 2024]. Disponible en: [https://oa.upm.es/6171/east=-1.9881527000000006;north=40.1282707;name=Serrania de Cuenca, Cuenca, Castilla-La Mancha, España](https://oa.upm.es/6171/east=-1.9881527000000006;north=40.1282707;name=Serrania%20de%20Cuenca,Cuenca,Castilla-La%20Mancha,España)

GREENVALLEY INTERNATIONAL, 2024. LiGrip H300 Handheld Laser Scanning - GreenValley International. [en línea]. [consulta: 24 agosto 2024]. Disponible en: <https://www.greenvalleyintl.com/LiGripH300>.

HAINES, A. y PATZ, J.A., 2004. Health Effects of Climate Change. *JAMA*, vol. 291, no. 1, ISSN 0098-7484. DOI 10.1001/jama.291.1.99.

HOLOPAINEN, M., KANKARE, V., VASTARANTA, M., LIANG, X., LIN, Y., VAAJA, M., YU, X., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., KAARTINEN, H., KUKKO, A., TANHUANPÄÄ, T. y ALHO, P., 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 12, no. 4, ISSN 1618-8667. DOI 10.1016/j.ufug.2013.06.002.

JEFATURA DEL ESTADO, 2021. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética [en línea]. 21 mayo 2021. S.l.: s.n. [consulta: 16 agosto 2024]. Ley 7/2021. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>.

KOLLMANN, F., 1959. Tecnología de la Madera Y Sus Aplicaciones [en línea]. S.l.: Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. Disponible en: [https://books.google.es/books/about/Tecnologia\\_de\\_la\\_Madera\\_Y\\_Sus\\_Aplicacion.html?id=dFnauQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.es/books/about/Tecnologia_de_la_Madera_Y_Sus_Aplicacion.html?id=dFnauQEACAAJ&redir_esc=y).

LI, W., GUO, Q., JAKUBOWSKI, M. y KELLY, M., 2012. A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 78, DOI 10.14358/PERS.78.1.75.

LIU, Q., MA, W., ZHANG, J., LIU, Y., XU, D. y WANG, J., 2021. Point-cloud segmentation of individual trees in complex natural forest scenes based on a trunk-growth method. *Journal of Forestry Research*, vol. 32, no. 6, ISSN 1993-0607. DOI 10.1007/s11676-021-01303-1.



MCCARTHY, M.P., BEST, M.J. y BETTS, R.A., 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* [en línea], vol. 37, no. 9, [consulta: 15 agosto 2024]. ISSN 1944-8007. DOI 10.1029/2010GL042845. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010GL042845>.

MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R. y MUÑOZ, M., 2005. Producción de Biomasa y Fijación de CO<sub>2</sub> Por Los Bosques Españoles [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 978-84-7498-512-2. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/235639682\\_Produccion\\_de\\_Biomasa\\_y\\_Fijacion\\_de\\_CO2\\_Por\\_Los\\_Bosques\\_Espanoles](https://www.researchgate.net/publication/235639682_Produccion_de_Biomasa_y_Fijacion_de_CO2_Por_Los_Bosques_Espanoles).

MUYS, B., 2024. Mobile LiDAR technology for forest biomass inventories and carbon certification monitoring. *FACULTY OF BIOSCIENCE ENGINEERING* [en línea], Disponible en: <https://informa-forests.eu/wp-content/uploads/2022/10/Mobile-LiDAR-technology.pdf>.

NGUYEN, A. y LE, B., 2013. 3D point cloud segmentation: A survey. 2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM) [en línea]. S.l.: s.n., pp. 225-230. [consulta: 28 agosto 2024]. DOI 10.1109/RAM.2013.6758588. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6758588>.

PESCADOR, D., VAYREDA, J., ESCUDERO, A. y LLORET, F., 2019. Identificación y descripción de las variables utilizadas en el Inventario Forestal Nacional para la evaluación de la «Estructura y función» de los tipos de hábitat de bosque. . S.l.: s.n., pp. 135.

PITA CARPENTER, P.A., 1973. El inventario en la ordenación de montes. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. ISBN 978-84-500-5832-1. 630\*5 PIT INV, 630\*524 (S. 20.058) PIT INV, DS.44, DS.45, DS.1.238, SL.556 PIT INV, DB.94, 630\*5(S.15.150) ALFO, 630\*5 PITA INVE

PROUDMAN, A., RAMEZANI, M., DIGUMARTI, S.T., CHEBROLU, N. y FALLON, M., 2022. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 157, ISSN 0921-8890. DOI 10.1016/j.robot.2022.104240.

SCHMIDT, A., POULAIN, M., KLEIN, D., KRAUSE, K., PEÑA-ROJAS, K., SCHMIDT, H. y SCHULTE, A., 2009. Allometric above-belowground biomass equations for *Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) natural regeneration in the Chilean Patagonia. *Annals of Forest Science*, vol. 66, no. 5, ISSN 1297-966X. DOI 10.1051/forest/2009030.

SERRADA HIERRO, R., 2011. Apuntes de selvicultura. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar. ISBN 978-84-96442-41-2. 630\*2 SER APU(11), CD-MA-269, 630\*2 SER APU CD, 630\*2 SERR APUN



SMITH, B., HAUGEN, H.A., COCHRAN, V.A., MURPHY, A.J., GUPTA, S., HOSOYA, Y., EATON, R., MCMAHON, M., HAMES, D., VANDERBORGHT, B., EDDIS, M., OREN, K., SEGALLEN, L., MARACHE, M., ACOSTA, R., CAMOBRECO, V., EPA, U.S., CUMMIS, C., EPA, U.S. y COOK, E., 2019. Protocolo de Gases de Efecto Invernadero. Edición Revisada. [en línea], [consulta: 5 septiembre 2024]. Disponible en: [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo\\_spanish.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo_spanish.pdf).

TER-MIKAELIAN, M.T. y KORZUKHIN, M.D., 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, vol. 97, no. 1, ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/S0378-1127(97)00019-4.

TIGGES, J. y LAKES, T., 2017. High resolution remote sensing for reducing uncertainties in urban forest carbon offset life cycle assessments. *Carbon Balance and Management*, vol. 12, DOI 10.1186/s13021-017-0085-x.

UPM, 2016. Huella de Carbono de la Universidad Politécnica de Madrid – Sostenibles. [en línea]. [consulta: 17 agosto 2024]. Disponible en: <https://sostenibilidad.upm.es/huella-de-carbono-de-la-universidad-politecnica-de-madrid-2016/>.

UPM, 2023. Huella de Carbono UPM 2013-2021. Huella de carbono UPM [en línea], [consulta: 15 agosto 2024]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/carbonfootprintmontes/proyectos-de-impacto/informes-de-huella-de-carbono?authuser=0>.

UPM, 2024. Sostenibles – Página oficial de Sostenibilidad en la Universidad Politécnica de Madrid. [en línea]. [consulta: 17 agosto 2024]. Disponible en: <https://sostenibilidad.upm.es/>.