



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
BIOCIENCIAS**

**NEKAZARITZAKO INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI
MAILAKO ESKOLA TEKNIKO**

*Estimación y análisis de parámetros indicativos de
un Bosque de Alto Valor Ecológico (BAVE) de
Quercus pubescens mediante datos LiDAR*

presentado por

*Maidier Antín Gutiérrez
(e)k*

aurkeztua

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
UNIBERTSITATE MASTERRA INFORMAZIO GEOGRAFIKOKO SISTEMETAN ETA TELEDETEKZIOAN



Septiembre, 2021 / 2021, Iraila

**Agradecimientos:**

Quiero agradecer a mi tutor Jesús Álvarez Mozos su paciencia, los consejos y haber tenido siempre unas palabras que me han motivado a seguir. Agradecer a Anika y a Jon del equipo de GAN-NIK todos los madrugones que se han pegado para hacer las tutorías por Zoom y poner en valor el trabajo realizado. Pero en especial, agradecer a mi familia y amigos por creer en mí y apoyarme siempre. Y por último, pero no menos importante, un abrazo a mis compañeras de MUSIGT; sin vosotras este máster habría sido mucho más duro.

Resumen:

El objetivo de este trabajo ha sido calcular y analizar métricas LiDAR indicativas de un bosque de alto valor ecológico (BAVE). Para ello se ha trabajado en un bosque de Beasoáin-Eguillor (Navarra), considerado potencialmente BAVE por el arbolado monumental de roble pubescente que lo compone. Se han revisado los criterios que caracterizan un BAVE y se han extraído métricas LiDAR a nivel de árbol y de masa que puedan ser útiles para su identificación. La metodología propuesta permite extraer información relacionada con la complejidad y madurez del bosque, su estructura vertical, así como la diferencia y continuidad horizontal del dosel y la densidad de árboles. Además, se ha desarrollado un modelo de segmentación del dosel que permite identificar árboles individuales, obtener su altura y una serie de métricas interesantes para identificar ejemplares maduros. Se espera que la propuesta metodológica realizada permita agilizar el procedimiento para detectar zonas potencialmente BAVE y permita reducir el esfuerzo de muestreo en campo para su caracterización.

Palabras clave: Alto valor ecológico, gestión forestal, LiDAR, *Quercus pubescens*

Abstract:

The aim of this paper is to calculate and analyze LIDAR metrics indicative of forests of high environmental value (HVE). To this end, work has been done on a forest in Beasoáin-Eguillor (Comunidad Foral de Navarra, Spain), a potentially considered HVE forest, because of the monumental trees of pubescent oak that make it up. Criteria used to define a HVE forest have been revised, and LIDAR metrics have been collected, at both the tree and the forest mass level, considered useful for its identification. The proposed methodology allows for obtaining information about the complexity and maturity of the forest, its vertical structure, as well as the difference and horizontal continuity of the canopy and the tree density. In addition, a canopy segmentation model has been developed, allowing us to identify single trees, obtain their height, and a series of metrics useful to find mature individuals. The proposed methodology is expected to speed up procedures for detecting HVE forest areas and minimize field sampling efforts to characterize them.

Keywords: Forest management, High ecological value, LiDAR, *Quercus pubescens*

Laburpena:

Lan honen helburua balio ekologiko handiko baso (BEHB) baten adierazgarriak diren metrikak zenbatetsi eta LiDAR bidez aztertzea da. Hori lortzeko, BEHB izan litekeen Beasoain-Egileorreko (Nafarroa) adin zaharreko ametz ilaundun zuhaitzi bat hartu da oinarri gisa. BEHB bat izateko behar diren irizpideak aztertu ondoren, hauek xedatzen dituen metrikak zuhaitz eta zuhaitzi mailan atera dira. Aurkezten den metodologiak baso baten konplexutasunaren, egitura bertikalaren eta zahartasun mailaren informazioa lortzea ahalbidetzen du, bai eta baso egituraren jarraitasun eta zuhaitz dentsitatearen informazioa ere. Honez gain, zuhaitz bakanen identifikazioa eta segmentazioa lortzen duen eredu bat garatu da. Eredu honen bitartez, zuhaitz aleen altura eta bestelako metrikak lor daitezke. Aldi berean, hau interesgarria izan daiteke zuhaitz zaharrak karakterizatzen balio izan lezakeelako. Hortaz, proposatzen den metodologiak BEHB-ak aurkitzeko denbora eta aztertze eremuan egin beharreko laginketa kopurua murriztea du helburu.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Objetivos del trabajo	4
2. Metodología	5
2.1 Zona de Estudio	5
2.2 Muestreo en campo	7
2.3 Datos LiDAR	9
2.4 Pretratamiento de datos LiDAR.....	11
2.5 Métricas LiDAR con relación a variables BAVE.....	15
2.6 Herramientas informáticas empleadas	18
3.Resultados.....	20
3.1 Análisis de correlación entre métricas LiDAR.....	20
3.2 Métricas LiDAR para caracterizar un BAVE a nivel de árbol.....	22
3.3 Métricas LiDAR a nivel de árbol	26
3.4 Métricas LiDAR para caracterizar un BAVE a nivel de masa	30
4. Discusión	39
4.1 Cadena de procesado: la importancia de las unidades de medida y escala	39
4.2 Métricas de diversidad vertical:	40
4.3 Métricas de diversidad estructural horizontal:.....	42
5. Conclusión	45
6. Bibliografía	47
ANEXO I	50
Esquema de los algoritmos y parámetros utilizados para la obtención de las métricas	i
Métricas consideradas de interés para la caracterización de un BAVE y obtenidas a partir de los algoritmos CloudMetrics y GridMetrics.....	ii
Resumen de los resultados obtenidos de las métricas consideradas de interés para la caracterización de un BAVE y obtenidas a partir de los algoritmos CloudMetrics y GridMetrics	iii
Representación de la proporción de retornos de la zona de estudio por estratos	iv
Listado de acrónimos	viii
Bibliografía del anexo.....	viii

1. Introducción

Los bosques son una fuerza estabilizadora del clima, ya que regulan los ecosistemas, protegen la biodiversidad y juegan un papel importante en el ciclo del carbono (IUCN, 2021a). Es sabida la influencia negativa que tiene la deforestación sobre la biodiversidad, sobre todo teniendo en cuenta que cada año la deforestación acaba con 13 millones de hectáreas de bosque (WWF, 2021) y que la deforestación y la degradación del mismo es una de las mayores fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (IUCN, 2021a; WWF, 2021). Se puede afirmar que los bosques son cruciales para luchar contra el cambio climático, ya que un manejo basado en soluciones forestales y de usos de suelo permite, además combatir la degradación de la tierra, conservar y/o restaurar la biodiversidad, tanto en zonas naturales como en zonas urbanas, a partir de la implementación de soluciones basadas en la naturaleza (NBS de las siglas en inglés *Nature Based Solutions*) que posibilitan una restauración del paisaje forestal (IUCN, 2021b).

El concepto de Bosque de Alto Valor de Conservación (BAVC) surge de la necesidad de conciliar la conservación de los recursos forestales con la explotación de los mismos, ya que el sector forestal es fuente de empleo y recursos de millones de personas en todo el mundo (WWF, 2021). Este concepto, impulsado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) tiene como objetivo proporcionar un marco conceptual para identificar las áreas forestales con atributos especiales que las hacen particularmente valiosas, para posteriormente implementar prácticas que ayuden a preservar o enriquecer su valor ecológico o socioeconómico clave (WWF, 2021).

De forma paralela, y con el objetivo de gestionar, proteger y restaurar los valores ecológicos de los bosques mediterráneos, nace en 2014 la red temática "*High ecological value Mediterranean forests network*" (MEDFORVAL por las siglas), donde uno de los objetivos principales fue definir el concepto de 'Alto Valor Ecológico' (AVE). A finales del año 2019 comienza un segundo proyecto internacional de INTERREG POCTEFA y llamado "CONNECTFOR: Caracterización y preservación de los bosques de alto valor ecológico (BAVE) y su conectividad ecológica", cuyo propósito es desarrollar nuevas herramientas de gestión que permitan preservar, conservar y proteger Bosques de Alto Valor Ecológico (de aquí en adelante BAVE, por sus siglas) (FORESTPIR, s.f.). Estos bosques son considerados como "*hotspots* de la biodiversidad" por el número elevado de fauna y flora que albergan en ellos y por los servicios ecosistémicos que proporcionan (FORESTPIR,2021). Si bien no existe a día de hoy una definición concreta de lo que se podría considerar un BAVE, dentro del proyecto no se cuestiona la importancia que tienen los bosques con un interés o AVE. Es por eso que en el proyecto CONNECTFOR se parte de los criterios propuestos en el proyecto MEDFORVAL para desarrollar un concepto BAVE que pueda abarcar el conjunto del territorio transfronterizo del Pirineo, que es donde actúa FORESPIR.

La red temática recoge tres criterios principales para considerar un bosque mediterráneo de alto valor ecológico: su diversidad biológica, la funcionalidad del ecosistema y su madurez o antigüedad (MEDFORVAL, s.f.). Sobre estos ejes se han realizado varias propuestas para incluir diferentes criterios e indicadores como la madurez de la especie (LIFE RedBosques, 2018) o la presencia cercana a las zonas BAVE de centros de interpretación, ya que fomentarían la educación ambiental y ayudarían a promover la protección, la valorización y el uso sostenible de los recursos de la zona (Gobierno de Navarra, 2020). Así mismo, siguiendo las indicaciones de la formulación de candidatura para el territorio de Navarra y realizada por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental de Navarra (a partir de ahora GAN-NIK por las siglas) (Gobierno de Navarra, 2020) se consideran como criterios BAVE los siguientes puntos:

- La diversidad biológica, comprendida como la diversidad genética, entre especies y grupos o niveles de taxones (plantas, animales, hongos, etc.) (MEDVAL,s.f). Dentro de la diversidad genética se consideran importantes los endemismos y el grado de amenaza de las especies.
- La funcionalidad del ecosistema hace referencia a si la dinámica natural funciona correctamente y se cumplen los ciclos ecológicos y naturales, asegurando la resiliencia ambiental y, por consiguiente, la dinámica de sucesión. La funcionalidad viene ligada al tamaño del ecosistema, los procesos ecológicos que se dan en él y los grupos funcionales que lo comprenden.
- Por último, la madurez o la antigüedad del bosque, por la presencia de árboles monumentales (de gran diámetro y copa) y que cumplen con los criterios anteriores, ya que proporcionan servicios ecosistémicos y una variedad de nichos ecológicos (aportación de madera muerta, huecos en los troncos...)(Europarc-España, 2020a; Hernández,2017).

Es por eso que un bosque maduro se describe como un bosque estructuralmente complejo y diverso, es decir, pluriestratificado, con aperturas en el dosel que permiten la regeneración de la especie, permitiendo así la incorporación en el subpiso de especies más tolerantes a la sombra. La madurez también se refleja en la diferencia en las alturas y en la presencia de ejemplares con grandes diámetros del tronco (Europarc-España, 2015, 2020a; MEDFORVAL,s.f). Este último punto es lo que desde la Comunidad Foral de Navarra se propone utilizar como punto de partida para caracterizar un bosque de alto valor ecológico, ya que, en definitiva, se acepta que un bosque antiguo no sólo hace referencia a la edad de los árboles individuales, sino que abarca la madurez, complejidad y diversidad de toda la comunidad forestal, como los arbustos, vegetación herbácea, helechos, hongos, insectos, aves, mamíferos, reptiles y toda la diversidad biológica. Además, un bosque maduro es un hábitat propicio para especies amenazadas y taxones incluidos en la Directiva de Hábitats y aves, como *Osmoderma eremita* u otros quirópteros forestales (Gobierno de Navarra, 2020). Por consiguiente, es necesario entender un BAVE como un bosque maduro, diverso y estratificado, con un funcionamiento que permita que se desarrollen los procesos ecológicos y una dinámica natural.

Un inventario forestal es una fuente de información cuantitativa y cualitativa sobre el estado, la utilización y ordenación de recursos forestales (FAO, 2004). Estos inventarios se han solido realizar mediante trabajo de campo in situ, y permiten obtener variables forestales de los bosques mediante muestreos. Sin embargo, esto supone un elevado coste de recursos humanos materiales y de tiempo.

La aparición de la teledetección ha permitido desarrollar técnicas de predicción de atributos forestales, como la biomasa sobre el suelo (AGB), la altura, el volumen, la cubierta de la copa y la complejidad del dosel (White et al., 2016). Los sistemas de escaneo láser aerotransportados con LiDAR (del inglés *Light Detection and Ranging*) por ejemplo, permiten describir la estructura tridimensional de la vegetación con gran precisión (Coops et al., 2021). La altimetría láser o tecnología LiDAR ha demostrado tener un gran potencial para la elaboración de inventarios forestales (Sánchez Alberola et al., 2018; Coops et al., 2021) y a día de hoy existen diferentes trabajos desarrollados en el ámbito nacional (e internacional) que han demostrado tener una mejor precisión que un inventario forestal convencional, además de abaratar y automatizar cálculos dasométricos (Segú, 2018; Sánchez Alberola et al., 2018). La tecnología LiDAR es una técnica de teledetección óptica que se basa en un sensor láser óptico activo que obtiene información a partir de la medición de la distancia entre el emisor (que emite el pulso) y el objeto

o la superficie de estudio con la que interactúa, en base al tiempo que transcurre desde que el pulso se emite hasta que se recibe (IGN,sf). Esta tecnología se comienza a desarrollar en la década de los sesenta en los Estados Unidos de América, principalmente para aplicaciones topográficas (Nelson, 2013). En las últimas décadas, el abaratamiento de los costos, el incremento de la disponibilidad de los sensores y las plataformas, el desarrollo y la integración de los sistemas GNSS y el INS al sistema láser han permitido el desarrollo de esta tecnología como fuente de datos clave para obtener de manera más precisa información tridimensional sobre la estructura forestal (Coops et al., 2021). De la misma manera, la aparición de nuevas tecnologías LiDAR en el mercado comercial, como por ejemplo el “LiDAR de fotón único” (SPL) o el *Geiger-mode LiDAR* (GML) han permitido maximizar la eficiencia de recopilación de información, ya que se utilizan detectores de gran sensibilidad, sensibles incluso a fotones individuales (Brown et al.,2020).

Los data sets o la información obtenida de la nube de puntos masiva (puntos con coordenadas tridimensionales georreferenciadas y de alta precisión) se pueden administrar, visualizar y analizar utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (GIS) y otros softwares específicos, como por ejemplo el visualizador de datos LiDAR FUSION ‘LDV’ (ArcGIS Desktop, s.f; Mcgaughey, 2021). El análisis de datos LiDAR mediante softwares gratuitos como FUSION/LDV, o de pago como LASTools, permite la obtención de subproductos LiDAR como Modelos Digitales de Terreno (MDT) o modelos de dosel (de aquí en adelante CHM, del inglés *Canopy Height Model*). Por otro lado, también permiten al usuario seleccionar y visualizar subconjuntos de datos LiDAR y extraer sus métricas, de manera que se facilita enormemente la tarea de analizar y comprender los datos (Mcgaughey, 2021).

Si bien el LiDAR se ha utilizado principalmente para inventario forestal, su uso en aplicaciones de conservación de bosques como la caracterización de BAVEs ha sido hasta la fecha más reducido, aunque constituya una tecnología con potenciales aplicaciones.

Uno de los principales retos a los que se enfrentan los agentes conservacionistas y las administraciones es llegar a desarrollar una definición compartida de lo que es un BAVE, que permita establecer unos criterios comunes a incorporar en los instrumentos de planificación territorial. Un fin más secundario en este ámbito, pero que es la base de este trabajo fin de máster, es mejorar los métodos de caracterización de estas masas y el desarrollo exploratorio de técnicas innovadoras utilizando herramientas de teledetección, como, por ejemplo, LiDAR (hazi, s.f.). En el presente trabajo se tratará de realizar una propuesta de los criterios que podrían considerarse propios de un BAVE, de manera que estos criterios en un futuro se incluyan en las herramientas de gestión en el territorio. Con este fin, se establecerán relaciones entre las métricas obtenidas del vuelo del LiDAR realizado sobre el territorio de Navarra durante el año 2017 y con una densidad media de puntos de 14 puntos/m² y los criterios considerados fundamentales para categorizar una zona como BAVE. En este aspecto, se realizará una propuesta de metodología para identificar zonas potencialmente BAVE partiendo de un bosque piloto del que se tienen inventariados los árboles maduros considerados de alto valor ecológico. Al desarrollar esta metodología empleando herramientas de teledetección, se espera reducir el tiempo y los recursos necesarios para la identificación de zonas potencialmente BAVE. En ningún caso la metodología propuesta reemplazaría la necesidad de recoger información, sino que es complementaria y podría utilizarse para un diseño más eficiente y dirigido de las salidas a campo, además de necesitar ser validada en campo.

1.1 Objetivos del trabajo

El objetivo general del presente Trabajo de Fin de Máster es desarrollar una metodología para la identificación de Bosques de Alto Valor Ecológico (BAVE) a partir de datos LiDAR. Para ello se procesaron los datos LiDAR disponibles, de los que se extrajeron distintas métricas, tanto a nivel de árbol como de masa, que pudieran ser indicativas de BAVE. Se trabajó en una zona piloto dentro del proyecto CONECTFOR (POCTEFA) ubicada en Eguillor (Navarra), considerada potencialmente BAVE y compuesta por árboles del taxón *Quercus pubescens* Willd.

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

Establecer la cadena de procesado que permita extraer métricas LiDAR de interés forestal, tanto a nivel de árbol como de masa.

Determinar las métricas LiDAR a nivel de árbol que se pueden considerar características de un BAVE.

Observar si las métricas utilizadas a nivel de árbol son sensibles a las diferencias que puedan existir entre los árboles más maduros (de mayor valor) y los más jóvenes.

Determinar las métricas obtenidas a nivel de masa forestal que se pueden considerar características de un BAVE, realizando para ello un análisis de la diversidad horizontal y estructural de las masas.

2. Metodología

2.1 Zona de Estudio.

La zona de estudio se corresponde a un robledal de roble peloso, donde el taxón dominante del estrato arbóreo es el roble pubescente (*Quercus pubescens* Willd).

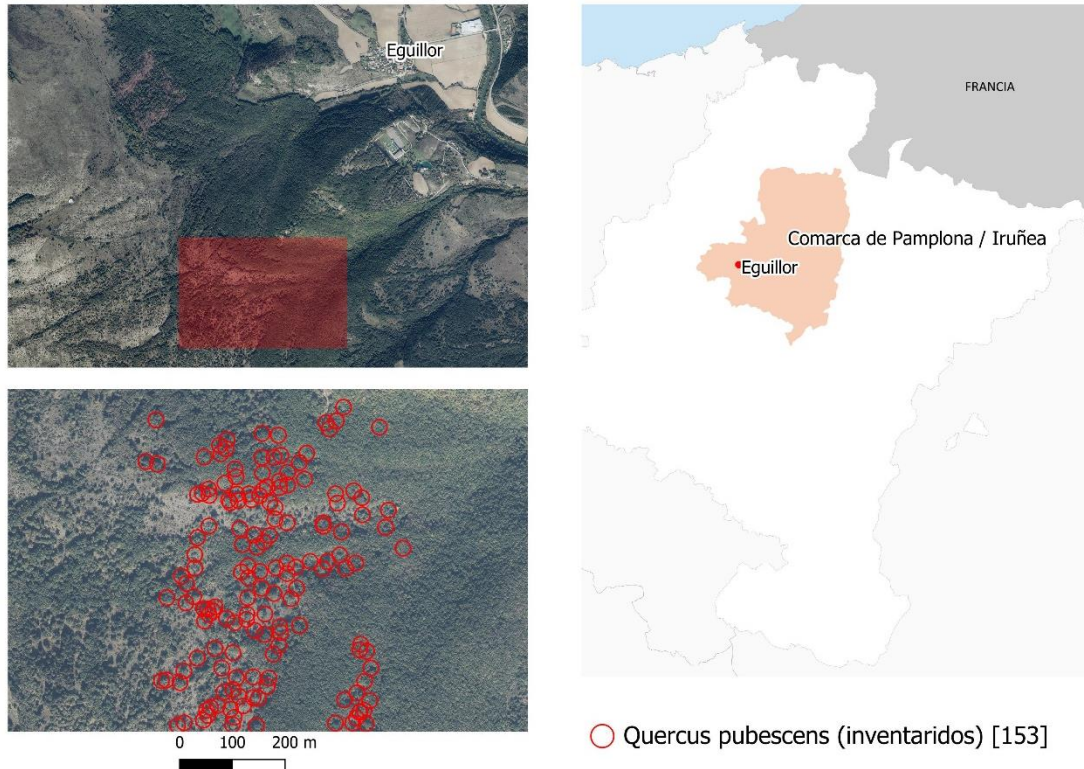


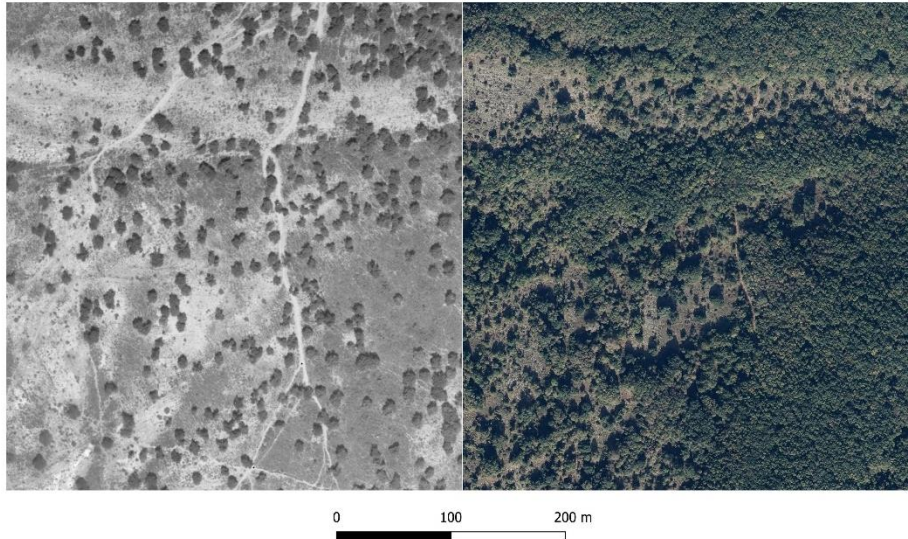
Figura 1. Localización de la zona de estudio. En rojo, los árboles maduros inventariados utilizados en el análisis.

El roble pubescente o *Quercus humillis* (sinónimo heterotópico) es una especie categorizada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) como ‘Least Concern’ (de preocupación menor) en Europa (Harvey-Brown, 2017). Las principales amenazas que existen sobre la especie se considera que son la transformación o modificación de su medio (construcciones y desarrollo residencial, incendios) y los efectos del cambio climático, así como las temperaturas extremas. Actualmente existen proyectos de conservación ex situ de la especie (Harvey-Brown, 2017).

La zona de estudio está conformada por ejemplares de gran madurez y porte, y se trata de una zona donde el bosque se encuentra en transición entre la regeneración y la madurez (GAN-NIK, 2020). El robledal estudiado se localiza en el valle de Olo, ubicado en la comarca geográfica de la cuenca de Pamplona y tiene una extensión de casi 50 hectáreas (Figura 1). El robledal está gestionado por el concejo de Beasoain-Eguillor (parcelas rústicas número 312 y 314 y el polígono 1 catastral), y en él se realizó un muestreo de campo a lo largo de aproximadamente 200 hectáreas durante los meses de octubre y noviembre del año 2020, el cual que se describe en el apartado 2.2. Al tratarse de un bosque en regeneración, entre los ejemplares más antiguos existen ejemplares más jóvenes, con lo que la masa forestal es densa. Sin embargo, en algunas zonas más cercanas al borde se conserva un paisaje más adhesado. Esto sucede porque el uso del suelo ha cambiado, ya que antiguamente predominaban los pastizales por la presión ejercida

por las actividades de ganadería extensiva (actividad principal del valle) que definían el paisaje. En las últimas décadas, la disminución de la presión ganadera ha propiciado el cambio en el paisaje dando lugar a un estrato arbóreo más denso (Figura 2). Este cambio significativo en el uso del suelo se puede constatar en las imágenes aéreas tomadas entre los años 1927-1934 y la ortofoto más actual (2020).

Figura 2. De izquierda a derecha: imagen aérea (tomada entre el 1927 y 1934) y una ortofoto del año



2021 sobre la misma zona. (Escala 1: 1500) La diferencia en la morfología del paisaje es evidente.

Según el estudio realizado por GAN-NIK en esta zona, hoy en día los ejemplares más jóvenes compiten con los árboles más maduros. Más de la mitad de los árboles singulares estudiados son árboles maduros y de gran porte, con un diámetro a la altura del pecho (DAP) medio de ~113 cm y una altura media de ~13 m, que tienen al menos la mitad de la copa cubierta o en contacto con vegetación competidora (Sarasa, 2021). Los robledales de roble peloso están formados, además de por el estrato arbóreo, por un estrato arbustivo y herbáceo. En el área de estudio, el estrato arbustivo está compuesto también por especies arbóreas de una menor altura que la alcanzada por la especie predominante, como las siguientes: *Acer campestre* L., *Crataegus monogyna* Jacq, *Crataegus laevigata* (Poir.) DC. y *Fraxinus excelsior* L. (GAN-NIK, 2020), así como otras especies arbustivas como *Buxus sempervirens* L., *Juniperus communis* L., *Rosa arvensis* Huds, *Cornus sanguinea* L. y trepadoras y lianas, como *Hedera helix* L., *Clematis vitalba* L., *Rubia peregrina* L. El estrato herbáceo es diverso en especies, ya que incluye especies como *Viola alba* Besser, *Euphorbia amygdaloides* L., *Primula veris* L., entre otros (GAN-NIK, 2020). Además de la vegetación herbácea, también podríamos englobar en este estrato las zarzas (*Rubus* spp) y otros objetos como madera y ramas muertas en el suelo y rocas.

El área de estudio alberga gran cantidad de microhábitats en un número elevado de árboles (GAN-NIK, 2020), por lo que se puede considerar que su valor ecológico es alto gracias al nicho ecológico que ofrece para diferentes especies. Por ello, es de gran importancia la correcta conservación del bosque y su biodiversidad (Sarasa, 2021). De ahí que la selección del robledal peloso de Beasoain-Eguillor cumpla con las características funcionales y de diversidad propias de un BAVE.

2.2 Muestreo en campo

Tal y como se ha expuesto, el área de estudio es de gran interés por los ejemplares antiguos de roble que contiene. Éstos se inventariaron en un trabajo realizado por la empresa GAN-NIK, en el que se georreferenciaron 366 individuos, se midieron sus parámetros dasométricos y se tomaron otros datos sobre el estado de conservación del bosque como el estado de los árboles, su morfología, la presencia de especies epífitas, huecos y madera muerta (Tabla 1). Esta información quedó registrada en unas fichas como anexos del estudio (GAN-NIK, 2020), que siguen las recomendaciones de distintos proyectos relevantes (GREEN, CONECTFOR, MEDFORVAL).

Tabla 1. Parámetros medidos en campo para la realización del estudio sobre el estado de conservación del robledal comunal del concejo de Beasoáin-Eguillor (GAN-NIK, 2020).

Parámetros medidos en campo
Identificación de los pies (coordenadas x,y, con código de pie y una foto)
Características dasométricas (altura, perímetro de tronco a 1.3m, distancia al pie más cercano)
Estado bajo cubierta (porcentaje del estrato arbóreo cubierto, cobertura herbácea, regenerado, madera muerta)
Estado general del árbol (porcentaje de las ramas secas)
Uso actual y antiguo (signos de pastoreo, aprovechamiento forestal, otros)
Presencia de especies (fauna, flora)
Porcentaje de la superficie del tronco cubierta por vegetación (epífitas)

Lamentablemente, en el estudio de campo no se midió la altura vertical del sotobosque ni de las especies que crecen bajo el dosel del bosque; únicamente se anotó la presencia de arbustos, epífitas y el porcentaje del tronco cubierto con vegetación. Tal y como se ha mencionado en la introducción (pág. 2), la complejidad y diversidad estructural del bosque es un aspecto importante de un BAVE. Por ello, se realizó una salida a campo posterior (20 julio de 2021) con el objeto de aportar esta información a la base de datos original, al menos en una selección de árboles del área de estudio (árboles: 344, 345, 351, 353, 354, 378, 379, 431, 432, 433, 436 y 498) (Figura 3). En estos árboles se midió la altura a la que llegaban los distintos estratos del bosque para realizar una clasificación de los estratos por altura. El resultado quedó recogido en la Tabla 2.

Por otro lado, de una visita anterior a la fecha mencionada, se tienen algunos registros de la diagonal principal de la copa, cuya media se aproxima a los 13m. Estos datos se tienen para los siguientes árboles: A.05, A.08, I.6, S.105, S.14, S.15 y S.30. Cabe mencionar que para estos mismos ejemplares no se tiene la altura medida en campo.

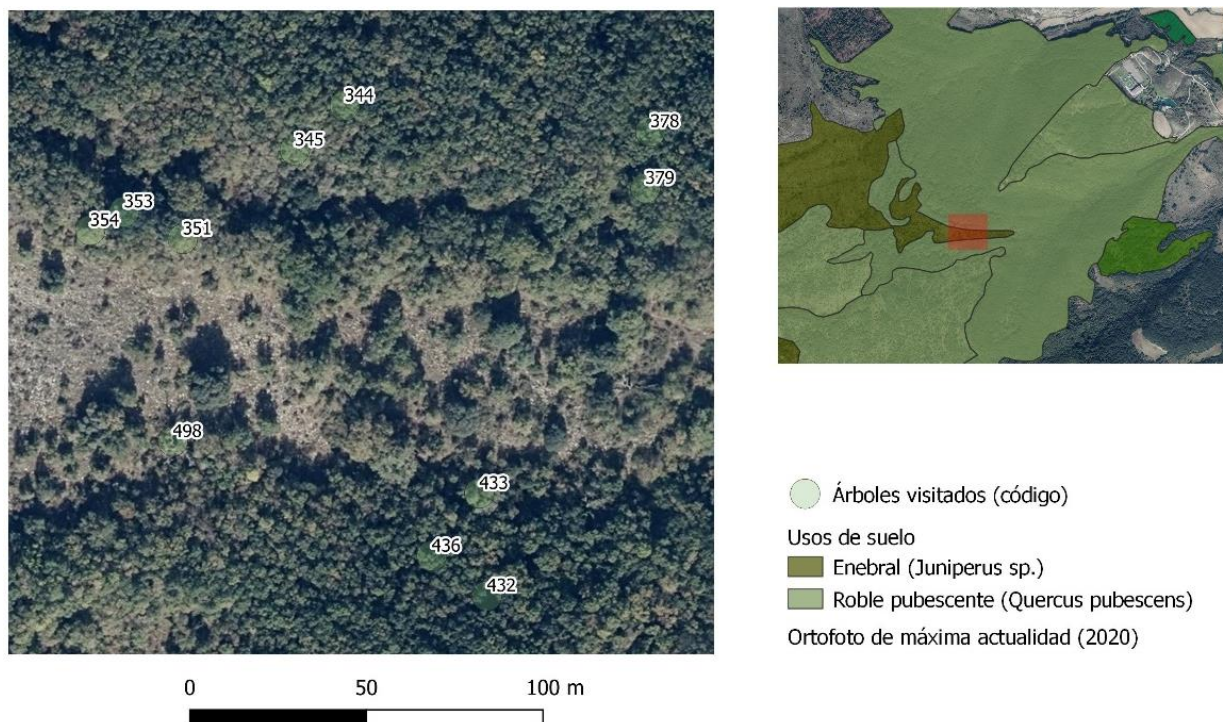


Tabla 2. Caracterización del dosel. Clasificación de la altura de los estratos inferiores

Figura 3. Árboles avistados en la zona de estudio para definir el rango de las alturas de los estratos.

Altura (m) de los estratos	Especies observadas
Suelo, rocas, madera muerta (<0.5m)	Se encontraron ramas, rocas y madera muerta debajo de la copa de los árboles.
Zarzal y herbazal (0.5-2m)	Se identificaron especies arbustivas como juniperos (<i>Juniperus communis</i> L.), rosales (<i>Rosa arvensis</i>), cornejas (<i>Cornus sanguinea</i> L.) inferior a dos metros de altura
Estrato arbustivo (2-5m)	En cuanto a especies de mayor altura, se encontraron espinos (<i>Crataegus monogyna</i> Jacq <i>Crataegus laevigata</i> (Poir.) DC), quejigos (<i>Ilex aquifolium</i> L.) y fresnos (<i>Fraxinus excelsior</i> L) con alturas superiores a los cuatro metros.
Estrato arbóreo (>5 m)	Principalmente a partir de esta altura únicamente se encontraron especies epífitas (musgo, helecho) y <i>Hedera hélix</i> L. sobre el tronco.

Por otro lado, debido a que el estudio de campo se realizó con un equipo GPS de características medias (modelo *Garmin MAP 64*) y en zonas arboladas se pueden presentar limitaciones en la cobertura GNSS, se decidió verificar la exactitud de las coordenadas de los pies inventariados con otro modelo GNSS (*Leica Viva GS14*). Al incorporar a este trabajo el análisis de datos LiDAR, resulta clave asegurar la exactitud de las coordenadas de los pies (Tugay Demiraslan, 2019); además, se recomienda considerar las eventuales desviaciones entre la posición del pie y del punto más alto de la copa del árbol (Popescu et al., 2003).

La verificación se realizó de manera manual utilizando un software GIS de escritorio, superponiendo a la capa de puntos original distintas ortofotografías (1927-1934 y 1982-1984) y productos derivados LiDAR de 2017 como el MDT y Modelo Digital de Superficie (MDS) y el modelo de dosel (CHM) (IDENA, 2021). En algunos casos se reubicaron ligeramente los pies y se descartaron algunos otros en los que la reubicación no era clara. Tras esta verificación, de los 171 árboles iniciales que contenían el dato de las alturas, se seleccionaron 153, al considerarse que tenían una georreferenciación suficientemente precisa para el análisis posterior.

Por último, la base de datos obtenida en campo se enriqueció con distintas capas de información geoespacial disponible mediante el *Web Map Service* (WMS) de IDENA (IDENA; 2021), así como con la cartografía de ocupación del suelo, información catastral y ortofotografías actuales y antiguas. Toda esta información resulta de utilidad para describir adecuadamente el área de estudio.

2.3 Datos LiDAR

La descarga de datos LiDAR de la segunda cobertura sobre Navarra (2017) se realizó desde la web del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), siendo siete las hojas (de 1x1 km) que se descargaron para cubrir toda el área de estudio. Los datos LiDAR se encuentran también disponibles en los servidores del Gobierno de Navarra, pero en un formato menos adecuado que los del IGN para el trabajo a realizar (con alturas elipsoidales). En la Tabla 3 se aporta información sobre las siete hojas descargadas.

Los archivos descargados están en formato '.laz', versión 1.2, clasificados mediante un algoritmo de '*Machine Learning*', en alturas ortométricas y con datos de reflectancia en el infrarrojo cercano. Estos datos son fruto del ambicioso proyecto del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA-LiDAR), cuyo objetivo es cubrir todo el territorio español con vuelos LiDAR periódicos (con una frecuencia de 6 años) (Martínez et al., 2015). En el caso de la Comunidad Foral de Navarra se planeó de manera que tuviera una densidad mínima de 10 puntos/m² de media del primer retorno (sin considerar puntos de solape entre pasadas), (Tracasa Instrumental SL, 2017) lo que resulta en una densidad media real de los datos de 14 puntos/m².

Tabla 3. Información de los retornos y rango de valores de las intensidades de las nubes de puntos descargadas.

Hojas LiDAR descargadas de la segunda cobertura sobre Navarra (2017)							
Nube de puntos	min.x, min.y, max.x, max.y	Nº puntos en total:	Primeros retornos:	Retornos únicos:	Intensidad media:	Puntos con una intensidad menor a 100:	Puntos con una intensidad menor a 4.600:
PNOA_2017_NAV_5 95-4744_ORT-CLA- IRC.las	595.000, 4.743.000, 595.999, 4.744.000	29282944	25351143	21759994	5755	6448229	6454031
PNOA_2017_NAV_5 95-4745_ORT-CLA- IRC.las	595.000, 4.744.000, 595.999, 4.745.000	43986080	38284235	32948808	5528	8322922	8323020
PNOA_2017_NAV_5 96-4743_ORT-CLA- IRC.las	596.000, 4.742.000, 596.999, 4.743.000	35052455	29385257	24232741	4658	6753988	6758691
PNOA_2017_NAV_5 96-4744_ORT-CLA- IRC.las	596.000, 4743.000, 596.999, 4.744.000	38943279	32791369	27127239	5005	5678548	5684070
PNOA_2017_NAV_5 96-4745_ORT-CLA- IRC.las	596.000, 4.744.000, 596.999, 4.745.000	39262998	33518620	28204861	5211	7550472	7550745
PNOA_2017_NAV_5 97-4744_ORT-CLA- IRC.las	597.000, 4.743.000, 597.999, 4.744.000	33249592	29491115	25991121	5469	5720899	5733128
PNOA_2017_NAV_5 97-4745_ORT-CLA- IRC.las	597.000, 4.744.000, 597.999, 4.745.000	43986080	38284235	32948808	5528	8322922	8331893

El vuelo de 2017 utilizado en este trabajo se realizó con el sensor *Single Photon LiDAR* (SPL) o “LiDAR de fotón único” que Leica comenzó a comercializar en el año 2017 (Brown et al., 2020). Este innovador sensor se plantea como una opción más efectiva, y de menor costo para realizar mapeos de grandes superficies y también para la caracterización de la estructura forestal (Brown et al., 2020; Hexagon Leica Geosystems, s.f; White et al., 2021). La Tabla 4 muestra las especificaciones del vuelo.

Tabla 4. Ficha de especificaciones técnicas de la segunda cobertura de Navarra, disponible en la web.

Especificaciones técnicas	
Sensor LiDAR	<i>Single Photon LiDAR</i> (SPL100)
Cámara	RCD 30
Plataforma	Avión Beechcraft B200 King Air
Patrón escaneo	Circular
Laser	100 canales: todos en 532 nm
Retorno múltiple	Hasta 10 por canal
Líneas de vuelo	482
Altura de vuelo (m)	3.900-6.300
Altura de vuelo (AGL)(m)	2.850-4.680
Ancho pasada (m)	2.300m
Velocidad	200 nudos
Densidad de puntos media	14 puntos/m ²
Precisión planimétrica	<30cm RMSE X,Y
Precisión altimétrica	≤ 20 cm RMSE Z

Los ficheros digitales, además de contener información altimétrica de la nube de puntos LiDAR y una clasificación de estos (Tabla 5), contienen también el dato de intensidad del pulso de retorno e información de color RGBI (4 bandas: RGB + Infrarrojo cercano), obtenida de la ortofotografía rápida generada mediante una cámara de medio formato (RCD30) en vuelo conjunto con el sensor *LiDAR SPL100*. Se advierte de que esta ortofotografía rápida puede tener diferencias radiométricas y geométricas importantes con los datos LiDAR, por lo que esta información debe ser utilizada con cautela (Gobierno de Navarra, s.f). Con todo, los archivos se pueden descargar coloreados bien en Infrarrojo (IRC) o en RGB (Coloreados RGBIr).

Tabla 5. Clasificación de puntos del vuelo LiDAR (2ª cobertura) para el territorio de Navarra. Gobierno de Navarra (s.f.).

Clasificación de puntos vuelo	
2017	
Número	Clase
2	Suelo
3	Baja vegetación
4	Media vegetación
5	Alta vegetación
6	Edificios
8	Coches
9	Fondo de agua
10	Solape desechado
11	Ruido
12	MDT 2014
17	Puntos fugados
18	Ruido sensor
28	Ruido sensor solape
32	Puentes

2.4 Pretratamiento de datos LiDAR

Filtrado de nube de puntos

El modelo de sensor utilizado para cubrir todo el territorio de Navarra es un sensor SPL que emite un haz de luz (pulso laser) que se multiplica en una matriz de 10x10, generando un número de pulsos muy elevado que se detectan de manera independiente en un canal del detector. A su vez, de un mismo pulso se pueden identificar diferentes retornos, correspondientes a distintos objetos con los que el pulso impacta en su trayectoria. Otra de las características del SPL es que trabaja en el rango del espectro de 532 nm (verde), lo que lo vuelve sensible al ‘ruido solar’ (White et al., 2021). Por ello, resulta importante realizar una serie de correcciones para eliminar puntos correspondientes a ruido. La empresa encargada de procesar los datos realiza un primer filtrado que elimina los puntos que están por encima de los 50 metros del terreno. Sin embargo, al abrir los archivos en un visor, se puede apreciar que aún conservan puntos ruidosos (Figura 4). Para eliminar este ruido se realiza un filtrado eliminando puntos con una intensidad inferior a 4.600. Este filtro fue efectivo y redujo la práctica totalidad de puntos ruidosos.

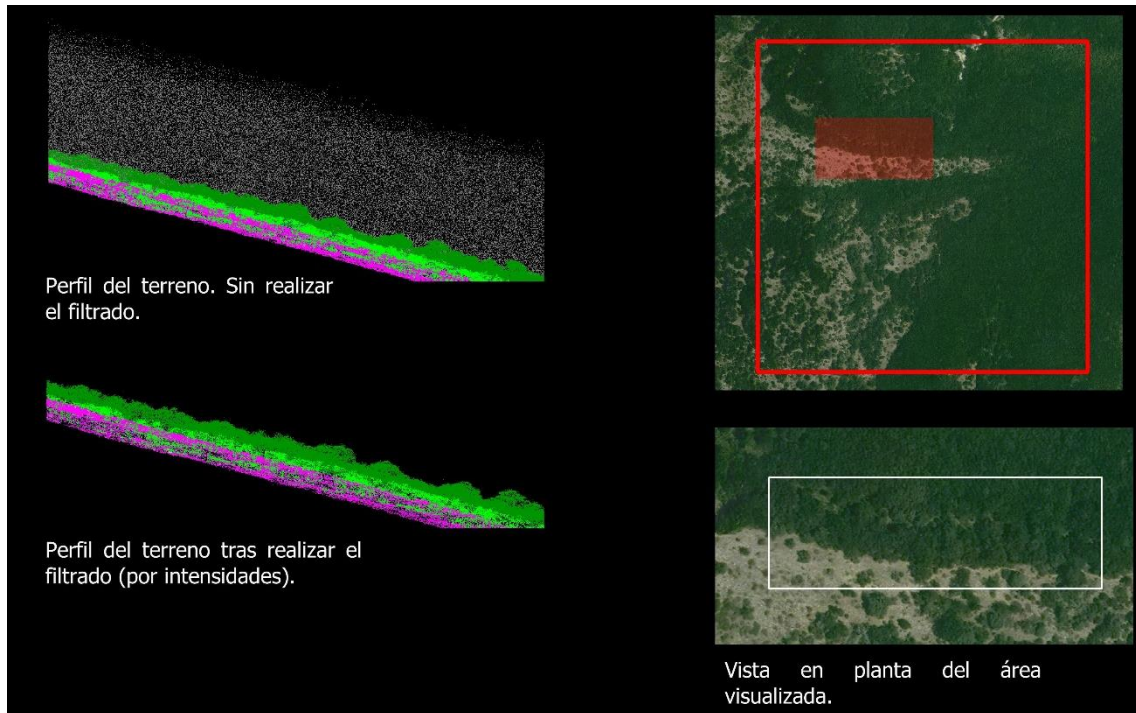


Figura 4. A la izquierda, la diferencia tras realizar el filtrado de la nube de puntos. A la derecha, la muestra ubicada en la zona de estudio.

Normalización de las alturas de la nube de puntos

Una vez eliminado el ruido, se extrajeron aquellos puntos clasificados como suelo (clase 2), para construir un modelo digital del terreno (MDT). Este modelo y las nubes de puntos originales se recortaron a la extensión del área de estudio. Posteriormente, se utilizó el MDT para calcular la altura normalizada de los puntos de los archivos originales. La altura normalizada es la altura sobre el nivel del suelo; por tanto, esta conversión (esquemática en la Figura 5) permite la comparación de las alturas medidas en campo con aquellas métricas obtenidas a partir del vuelo LiDAR.

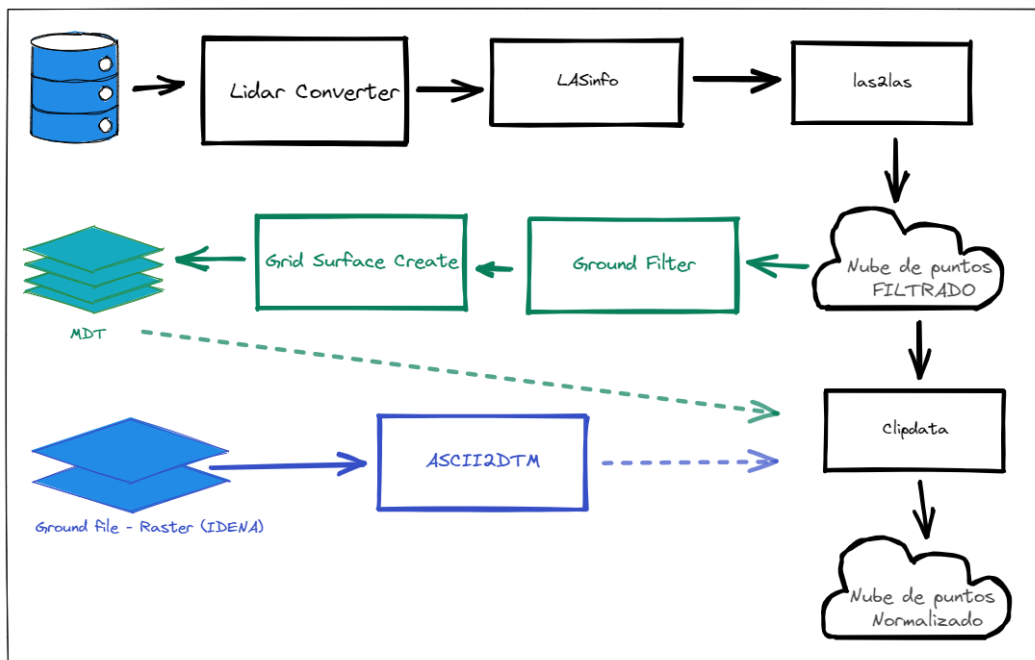


Figura 5. Esquema del proceso seguido para la normalización de la altura de los retornos.

Caracterización y modelización del dosel

Tras normalizar las nubes de puntos, se generó un modelo de dosel (CHM), que es un modelo ráster que representa las elevaciones del dosel. Previamente, es necesario determinar una altura de corte para el dosel, que se fijó en 5 metros, en base a las alturas de los estratos determinadas en campo (Tabla 2 **Tabla 2. Caracterización del dosel. Clasificación de la altura de los estratos inferiores**).

). Para generar el CHM se utilizó el comando *CanopyModel* de FUSION, que permite trabajar a diferentes tamaños de celda, utilizar ventanas de filtrado (mediana, suavizado) y filtrar los puntos por categoría. Se consideró utilizar únicamente los puntos clasificados como 3, 4 y 5, una altura de corte de 5 metros para eliminar la influencia de los retornos procedentes del estrato arbustivo. Se consideraron distintas combinaciones de parámetros de entrada para generar el modelo de dosel (CHM):

- Tamaño de celda: 0,5 y 1m.
- Tamaño de ventana del filtro de mediana: 3x3, 7x7
- Tamaño de ventana del filtro de suavizado: 7x7, 9x9
- Números de retornos: todos los retornos, primeros retornos, primeros tres retornos.

Se escribió un archivo *batch* que permitió la generación simultánea de los 43 modelos resultantes con las diferentes configuraciones recogidas en la tabla 6, y para cada modelo se obtuvo un CSV y una capa vectorial (shapefile de ESRI) de salida. Los CHM únicamente se utilizaron como archivo de entrada para el algoritmo de segmentación de árbol o *Tree Segmentation Model* (TSM).

Selección de unidad de árbol

Para extraer las métricas de cada pie de árbol de una nube de puntos (previamente filtrada y tratada), se precisa de una unidad de medida individual que permita identificar cada pie seleccionado. La unidad individual o recinto representará un árbol, el cual es el resultado de una segmentación por unidades de recorte que limitará la extensión de la submuestra. Inicialmente se pensó en delimitar estos recintos únicamente sobre los árboles inventariados recortando la nube de puntos por buffers (circulares) generados a partir de la ubicación de cada árbol. Sin embargo, existen procedimientos para delimitar los recintos correspondientes a cada árbol a partir de las nubes de puntos LiDAR, como es el caso del algoritmo TSM. Este algoritmo realiza una segmentación múltiple a la nube de datos dividiendo el bosque en recintos de forma irregular, lo que permite trabajar con toda el área de estudio, y no únicamente con los árboles inventariados. La segmentación se realiza por 'cuencas hidrográficas' del CHM, para producir "cuencas" o recintos que corresponden a grupos dominantes de follaje y ramas de árboles (Mcgaughey, 2021), que idealmente se corresponden con árboles individuales. Este algoritmo nuevamente requiere una serie de parámetros de entrada para los que se probaron distintos valores, generando distintos modelos de segmentación de árboles.

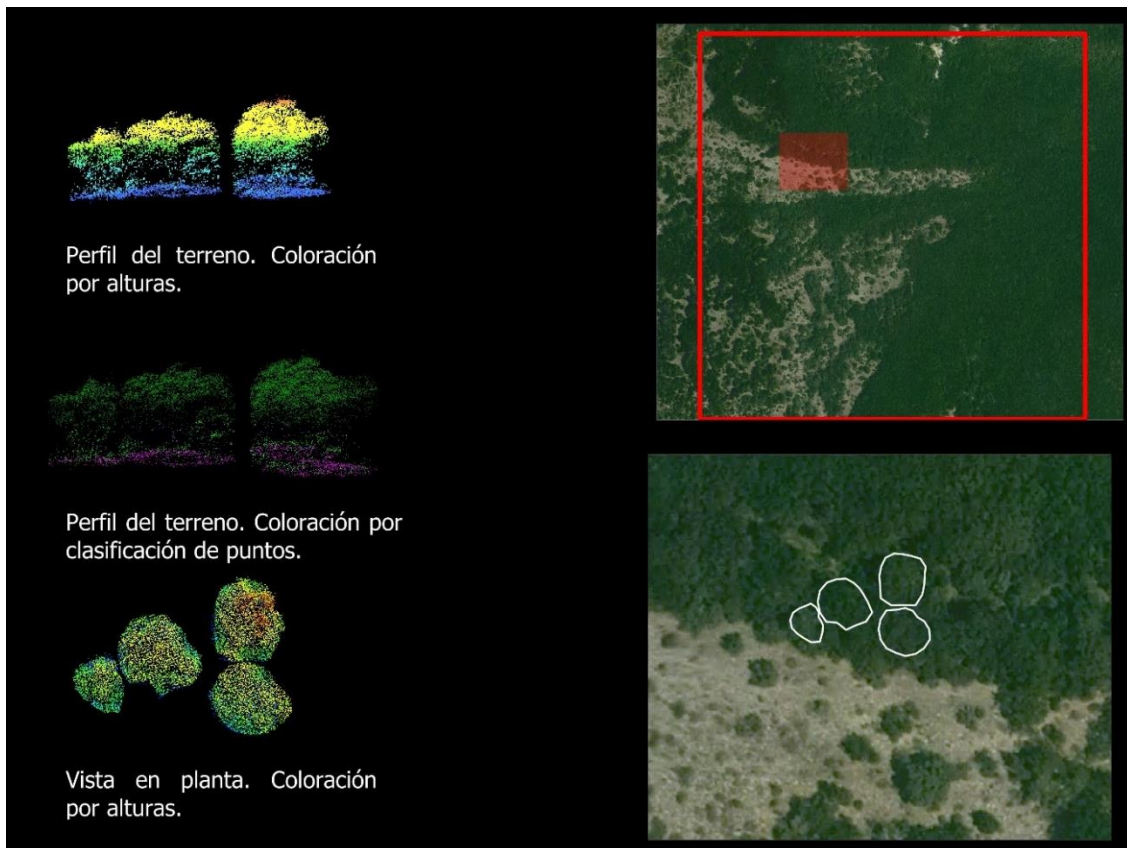


Figura 6. Contornos de las copas generadas a partir del TSM y subconjuntos de nubes de puntos correspondientes. De izquierda a derecha, los códigos de los árboles: 354,353,352,351. En rojo, la zona de estudio. En blanco los recintos segmentados.

Cada vez que se procesa el algoritmo TSM se genera un archivo vectorial con los recintos (contornos de cada árbol, tal como se muestra en la Figura 6), la altura máxima de cada árbol, un ráster y un CSV con las estadísticas. De entre las estadísticas generadas, nos interesan el área del recinto, su altura máxima y sus coordenadas.

Finalmente, la forma en la que se representa cada unidad puede ser:

- mediante un buffer circular a partir de los puntos inventariados (Figura 7, la línea de proceso azul)
- a partir del contorno (polígono generado) del árbol segmentado (Figura 7, la línea de proceso verde)
- o mediante un buffer circular a partir del centroide de ese polígono (Figura 7, la línea de proceso verde y naranja)

Por tanto, este paso se realizó para las tres opciones (Figura 7), pero únicamente se analizaron y estudiaron aquellas obtenidas con la tercera opción.

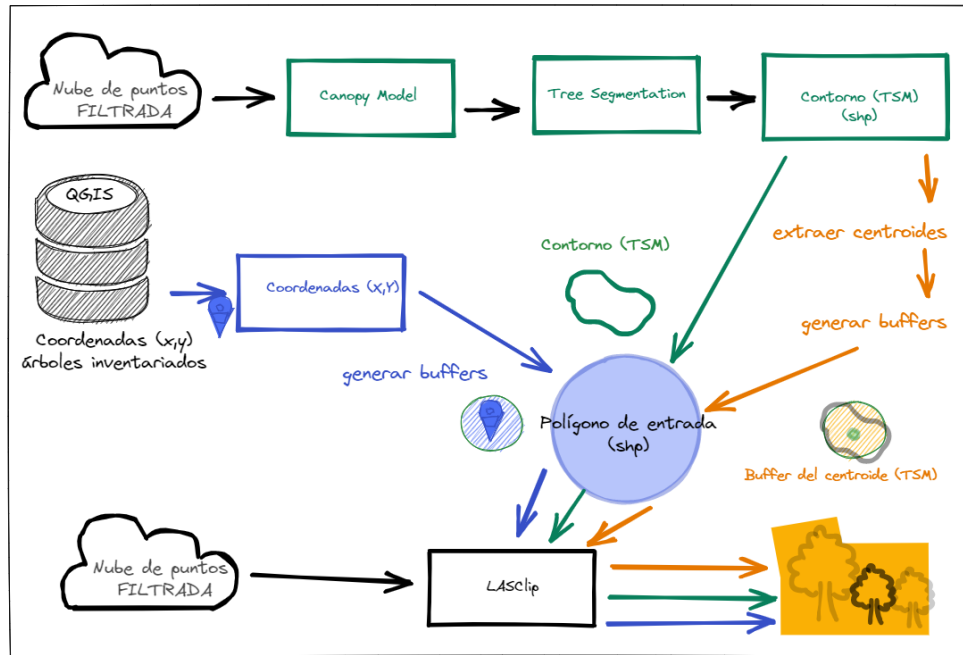


Figura 7. Esquema de la obtención del subconjunto de la nube de puntos a nivel de árbol. Cada color (azul, verde y naranja) indica las tres variantes consideradas.

2.5 Métricas LiDAR con relación a variables BAVE

A partir de los criterios desarrollados en la introducción (página 2), en la Tabla 6 se propone la siguiente relación entre las métricas LiDAR y los criterios BAVE relacionados con la madurez de un bosque (Tabla 6). Además de estos criterios, también se consideran importantes la presencia y densidad de árboles monumentales. A nivel de árbol, el TSM también extrae la altura máxima del árbol y el área del contorno segmentado.

Tabla 6. La relación entre las métricas y los criterios considerados BAVE.

CRITERIO	INDICADOR	Métrica	Unidad de medida (escala)	
			Árbol	Malla
Complejidad estructural: Diversidad vertical	Presencia de estratos en el perfil vertical (subpisos)	Porcentaje de retornos a diferentes alturas.	x	x
	Aproximación de la edad por la altura (especie)	Altura dominante (Ho)		x
	Diferencia en las alturas verticales del dosel /copa	Asimetría en la distribución de las alturas (<i>Skewness</i>)	x	x
Complejidad estructural: Diversidad horizontal	Estado de conservación y aproximación de la fase del ciclo silvogenético	Fracción de Cabida Cubierta (FCC)		x
	Diferencia en el espacio que ocupa la proyección de la copa	Fracción de Cabida Cubierta (FCC)	x	
	Rugosidad y continuidad del perfil horizontal: Diferencia de alturas	Coefficiente de variación (CV) de las alturas	x	x
	Rugosidad y continuidad del perfil horizontal: Detección de claros en el dosel y suelo sin cobertura vegetal	Varianza de la altura		x

Extracción de métricas a nivel de árbol

Para la extracción de las métricas a nivel de árbol se utilizó el algoritmo *CloudMetrics* de FUSION, ya que permite trabajar con recortes de una nube de puntos. Se realizaron recortes múltiples de una única nube de puntos, utilizando los contornos circulares con un radio de 6m obtenidos del TSM (Figura 7, la línea de proceso verde y naranja). Antes de procesar todos los datos, se seleccionaron los 137 polígonos correspondientes a los árboles maduros que cumplían con los mínimos establecidos (altura máxima de al menos 5m y un área mínima de 50m²) y del resto de polígonos filtrados, se seleccionaron de manera aleatoria 150 árboles que se definieron como 'jóvenes'. El realizar los recortes a nivel de árbol, permitió poder comparar las métricas en función de la clasificación del contorno (árbol maduro o árbol joven).

CloudMetrics permite extraer diferentes métricas generadas de cada subconjunto de datos LiDAR (Mcgaughey, 2021), que se pueden clasificar como medidas de posición (percentiles, cuantiles), medidas de centralización (media, mediana, moda) y medidas de dispersión (varianza, coeficiente de variación) (Sánchez Alberola et al., 2018). Estas métricas se calculan a partir de los datos de elevación de los puntos que conforman la nube, e idealmente pueden servir para estimar parámetros biofísicos de los árboles. Entre las características biofísicas, probablemente la más importante es la altura del árbol (Li et al., 2020), que se ha solido estimar a partir de las métricas de altura máxima y los percentiles superiores (P90, P95 y P95). Por ejemplo, Popescu et al. (2003) propusieron el percentil 90 para extraer la altura dominante (H_0) de los árboles y García (2020) el percentil 95. Además de este parámetro, tanto el diámetro como la Fracción de Cobertura Cubierta son variables importantes para determinar el estado (o fase) silvogenético.

En relación a la altura, para comprobar si es posible la predicción de las alturas, se realizó una comparación entre las diferentes métricas obtenidas del LiDAR (percentiles superiores y altura máxima) y las observadas en campo. Para ello, se extrajeron los valores de error cuadrático medio (RMSE) y se trabajó con la métrica que obtuvo un error medio más bajo, con el objetivo de utilizarlo para realizar la predicción del parámetro. En cuanto a la fracción de cobertura cubierta (FCC), el objetivo es medir de manera relativa la cantidad del terreno que es ocupado por la proyección de las copas de los árboles.

Extracción de métricas de masa forestal

Para la extracción de las métricas a nivel de masa se utilizó el algoritmo *GridMetrics* de FUSION, que, al igual que *CloudMetrics*, permite extraer métricas, pero en este caso el cálculo se realiza para cada celda de una malla predefinida y no por recintos (Mcgaughey, 2021). En este último caso se consideraron dos tamaños de celda: 10x10m y 100x100m. Las métricas que se pueden obtener son las mencionadas en el apartado previo.

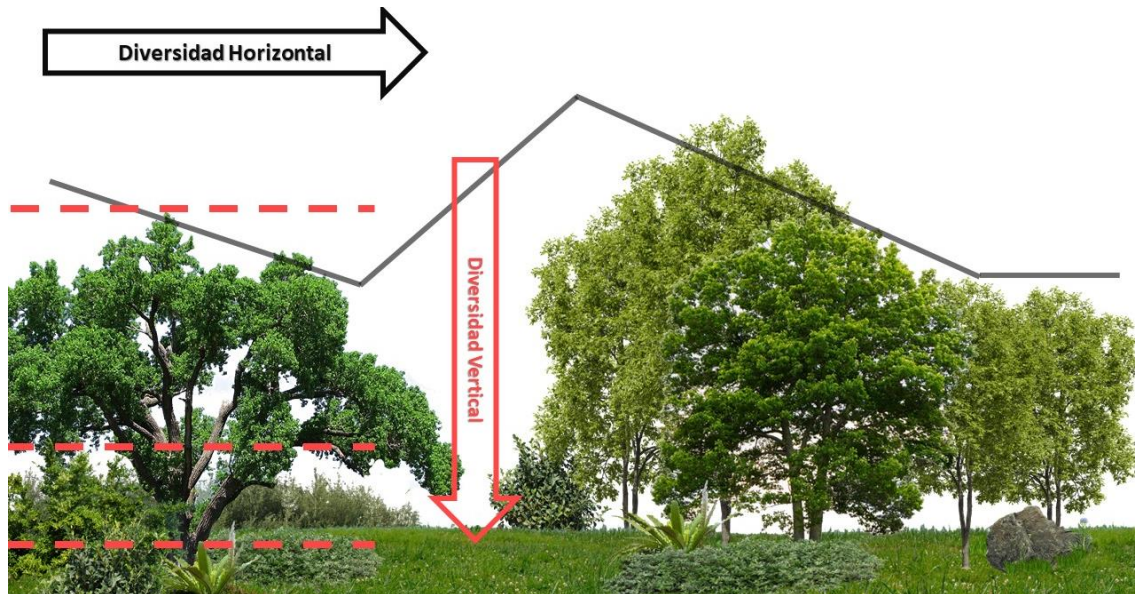


Figura 8. Representación del concepto de diversidad horizontal y vertical de un bosque.

Análisis de diversidad vertical

El objetivo del estudio de la diversidad vertical es observar los cambios de altura a lo largo de la estructura vertical tanto a nivel de árbol como a nivel de masa (Figura 8). En el caso del árbol, además de observar la altura máxima se obtiene la media y la asimetría en la copa del árbol. La asimetría (*skewness*) de la distribución de probabilidad de las alturas es una medida de forma que puede aportar información interesante. En distribuciones simétricas (asimetría=0) la mayoría de los retornos están centrados en la altura media, mientras que valores negativos, indican que la mayoría de los elementos de la cubierta están por encima de la altura media, y, por el contrario, valores positivos indican que los elementos se concentran en alturas más bajas. Por tanto, se decidió utilizar la asimetría para obtener una aproximación del lugar de la copa y del dosel donde se concentran las alturas (si en la parte superior de la copa / dosel o si en la parte inferior).

Así mismo, se consideró de interés estudiar la estratificación de la estructura vertical de la vegetación por debajo del dosel principal, para evaluar la capacidad del LiDAR de penetrar el dosel e identificar las estructuras vegetales no dominantes. A tal efecto, se propuso calcular la proporción de retornos intermedios y el porcentaje de retornos que se encuentran por debajo de la altura media del dosel.

Análisis de diversidad horizontal

Para caracterizar la diversidad horizontal, a nivel de masa, se estudió la diferencia de los valores de la altura entre celdas vecinas. Esta diferencia se puede cuantificar mediante las métricas de varianza de la altura, el coeficiente de variación o por el apuntamiento. Además, el estudio de la distribución de los valores de FCC permite realizar una aproximación de las diferentes fases o ciclos presentes de un rodal (LIFE RedBosques, 2018).

El Coeficiente de Variación (CV), es una medida de dispersión relativa (rango de valores entre 1 y 0) que se utilizó para comparar el grado de dispersión en la elevación de los retornos de la altura respecto a su celda vecina. En una zona de masa forestal, una mayor variabilidad en la altura indicaría heterogeneidad o diversidad en el rango de valores de la altura. Esta diferencia podría reflejar la variedad de edades existente dentro de la masa forestal analizada (García, 2020). Por el contrario, una zona con un CV bajo indicaría la presencia de individuos de la misma altura, edad y fase silvogenética, y, por ende, menor grado de diversidad horizontal. Por otro lado, el apuntamiento de las alturas o curtosis se relaciona con el estado sucesional de la masa forestal; sin embargo, finalmente se decidió no incluir los resultados porque no se llegó a una lectura clara de los resultados.

El último parámetro estudiado, y que añade información sobre la distribución horizontal de la especie, es la densidad (pies/ha). Se contabilizaron los árboles identificados mediante LiDAR en el área de estudio, aunque estos pueden corresponder a cualquier especie (no únicamente *Q. pubescens*). A partir de este conteo se obtiene la densidad. Para caracterizar mejor el área de estudio se decidió estudiar por separado zonas con una masa más compacta (FCC>70%) y aquellas más dispersas o adehesadas (FCC<70%). Esta decisión se tomó por las diferencias existentes entre ambas zonas, con una presencia mayor de especies arbustivas (zarzas, rosales, espinos) y una presencia menor de robles en la zona adehesada.

Correlación entre las métricas

Para elegir las métricas que más información aportan, se realizó un análisis de correlación entre ellas, para determinar cuáles podrían mostrar una información similar o redundante y cuáles podrían ser complementarias. Se observó que la mayoría de las métricas obtenidas no seguían una distribución normal, por lo que se optó por realizar una matriz de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Spearman.

2.6 Herramientas informáticas empleadas

En este apartado se relacionan las herramientas y programas utilizados en el proceso de la obtención de las métricas y análisis de los resultados. Por otro lado, en el Anexo I, se recogen en diferentes tablas (Tabla 1. y Tabla 2.) los *switches* utilizados en los comandos de FUSION y LASTools. Además, en la Tabla 3 del Anexo I. se mencionan las métricas consideradas más importantes para el análisis.

Los programas utilizados fueron los siguientes:

LASTools: Herramienta de procesamiento de datos LiDAR. Requiere de licencia para ciertas herramientas. De LASTools se emplearon los siguientes algoritmos:

-Lasinfo: para extraer la información de cabecera de la nube de puntos y el rango de intensidades de estos.

-Las2las: para filtrar las nubes de puntos por rango de valores de la intensidad.

-LasClip: para realizar el recorte de una nube de puntos por polígonos (archivos shp) y obtener de cada uno un archivo LAS de salida, con los puntos que caen dentro.

FugroViewer™3.3: Software gratuito para visualizar y analizar los datos LiDAR.

Notepad++ v7.9.1: Editor de código fuente gratuito. Se utilizó para escribir los *batch* o archivos de lote (.bat) y guardar las líneas de comando a ejecutar en el comando de Windows o Sistema de Windows.

FUSION/LDV v4.2: Software gratuito para analizar, visualizar y editar los datos LiDAR. Consta de dos programas, FUSION, con el que se han extraído las métricas y LDV, el visor que permite visualizar las nubes de puntos y productos derivados de LiDAR. A continuación, se relacionan los algoritmos utilizados del programa FUSION:

–*GroundFilter* Genera un archivo LiDAR con puntos que se corresponden con el suelo desnudo, filtrando la nube de puntos de entrada, generalmente con el objetivo de producir a posteriori un modelo de superficie de suelo (MDT). Permite seleccionar únicamente los puntos clasificados como ‘suelo’.

–*GridSurfaceCreate*: para generar un modelo de superficie cuadrulado a partir de la nube de puntos. Se utiliza la elevación promedio de todos los puntos de cada celda de la cuadrícula. Permite trabajar con un modelo de ráster de alturas.

–*ASCII2DTM*: Permite convertir un archivo ráster (por ejemplo, un modelo digital de terreno ASCII con extensión ‘.asc’) a un archivo plano de modelo digital de terreno con extensión ‘.dtm’.

–*CanopyModel*: Se utilizó para generar los diferentes modelos de Canopy Height Model (CHM). Permite suavizar el modelo utilizando filtros de media y de mediana, o ambos. El algoritmo asigna la elevación del retorno más alto a la celda de cada cuadrícula.

–*TreeSeg*: Genera una segmentación por ‘cuencas hidrográficas’ para producir "cuencas" o recintos a partir de un modelo de dosel (CHM). Entre los archivos de salida que genera, están los archivos de texto con los datos de altura máxima y área del contorno de la copa (formato CSV), los polígonos del dosel (formato shape), y un mapa de los contornos con las alturas máximas (formato ASCII).

–*CloudMetrics* extrae métricas estadísticas a partir de las alturas de la nube de puntos o las intensidades por cada archivo de datos LiDAR procesado. Genera un único archivo de texto separado por comas (CSV) que contiene con su identificador las métricas de cada archivo de LiDAR procesado.

–*GridMetrics*: Genera estadísticas a partir de un conjunto de datos LiDAR y un modelo de superficie plano (por teselado por cuadrículas). El archivo de salida es un ráster (grid) que se guarda en formato de texto (CSV). Permite seleccionar los puntos clasificados por tipo y por número de retornos, además de obtener las métricas por estratos de altura.

RStudio v. 1.4.1106: Se trata de un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R, gratuito. Se utilizaron la consola y editor de RStudio para la extracción y tratamiento de las métricas obtenidas de FUSION. Se utilizó para obtener las medias, medianas, máximos, mínimos de las métricas obtenidas a partir de FUSION. También, para obtener los errores medios cuadrados (RSME) y realizar otro tipo de test y comprobaciones estadísticas (finalmente no incluidas en el trabajo), así como el análisis de la correlación entre métricas. Por otro lado, se utilizó R para la generación de histogramas, diagramas de barras y tablas de las métricas.

QGIS 3.12 Bucarest: Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto. Permite visualizar, analizar y complementar los datos de la base de datos con información geográfica descargada desde las IDEs y las ortofotos de la zona de estudio. Se utilizó para realizar la verificación de las coordenadas obtenidas en campo y correspondientes a los árboles maduros, la visualización los modelos de TSM y selección aleatoria de 150 polígonos, el análisis de la densidad (pies por hectárea) y finalmente la representación y diseño de mapas temáticos a partir de los CSVs generadas en FUSION y editadas en RSTUDIO.

3.Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las métricas y el análisis a tres diferentes escalas: por un lado, se exponen los resultados obtenidos a nivel de árbol diferenciando entre árboles jóvenes y maduros. Por otro lado, se mostrarán los resultados a nivel de malla, con una unidad de medida de una hectárea (100x100m) y otra de 0,01 hectárea (10x10m).

3.1 Análisis de correlación entre métricas LiDAR

El análisis de correlación permitió identificar aquellas métricas que tenían más relación entre sí, y eliminar aquellas que podrían aportar información más redundante o fueran más difíciles de interpretar. Este análisis se realizó tanto a nivel de árbol como de masa, utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (Figura 9 y Figura 10).



Figura 9. Correlación entre las métricas potencialmente interesantes para la caracterización de un BAVE (a nivel de árbol).

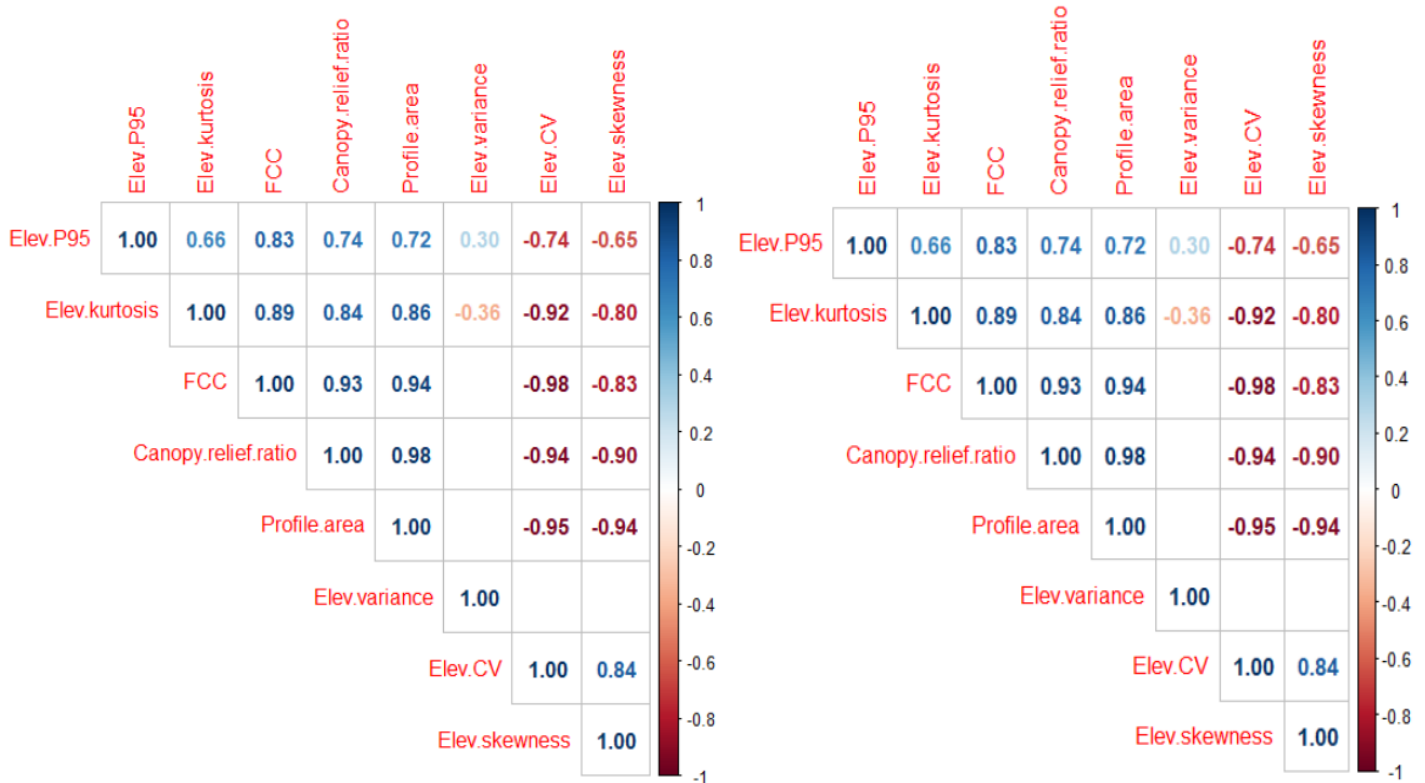


Figura 10. Correlación entre las métricas potencialmente interesantes para caracterizar un BAVE (a nivel de malla: Izquierda, por hectárea, a la derecha, 0,01 hectárea).

El análisis de correlación a nivel de malla sigue un patrón parecido al observado a nivel de árbol. A nivel de malla, para las dos escalas de medida, los resultados de las correlaciones son semejantes, ya que varían muy poco.

Con el objetivo de trabajar con una menor cantidad de métricas y seleccionar aquellas que mejor caractericen un BAVE, se decidió eliminar aquellas variables que ofrecen información redundante como el *Profile Area* y *Canopy Relief Ratio*, por su correlación con el Coeficiente de Variación, Fracción de Cobertura y la asimetría.

Se observa que la altura media se relaciona muy significativamente con la asimetría y el apuntamiento de la distribución, así como con la FCC. La altura media tiene también una correlación significativa con el coeficiente de variación (por lo que este se correlaciona también con las métricas anteriores). Sin embargo, la varianza tiene correlaciones reducidas, por lo que parece que ofrece otro tipo de información complementaria a las otras métricas.

3.2 Métricas LiDAR para caracterizar un BAVE a nivel de árbol

Evaluación del modelo de dosel y segmentación de árboles

Para crear el modelo de dosel y la segmentación de los árboles, se evaluaron diferentes combinaciones de parámetros (descritos en el apartado de caracterización y modelización del dosel). De forma previa a la evaluación numérica, se visualizaron los recintos generados tras la segmentación (un modelo de segmentación de dosel (TSM) por cada CHM procesado). En algunos casos se observó un alto número de recintos (copas) con un área muy reducida, e incluso superpuestos a otros recintos de mayor área (Figura 11). Esto puede deberse a que, dependiendo de los parámetros considerados, la segmentación puede generar varias copas por árbol además de representar árboles dominantes y codominantes (Mcgaughey, 2021). Para evitar trabajar con un número excesivo de contornos y con contornos no dominantes, se decidió realizar un ranking para seleccionar un único modelo. Los criterios de selección se resumen a continuación (Tabla 7):

Tabla 7. Criterios utilizados para seleccionar el TSM más adecuado al área de estudio.

	<u>Indicador</u>		
	Número de recintos generados	Área de los recintos	Coincidencia con árboles inventariados
Criterio	Menor	Mayor	Mayor

Se consideró como criterio decisivo el número de coincidencias con los árboles inventariados, ya que indicaría que el modelo identifica las copas inventariadas. Para eliminar o evitar incluir copas codominantes y superposiciones (Figura 11) se realizó un filtrado de aquellos contornos de una altura máxima muy baja y un área muy pequeña (ya que no se consideraría una copa de *Q. pubescens*).

Como resultado, el modelo seleccionado fue uno con las siguientes características: un tamaño de píxel de 0.5 metros, un filtrado de suavizado con una ventana de 9x9 y un filtrado de mediana de 3x3, y considerando únicamente los primeros retornos. Este modelo se denominó "Tamaño05_suavizado9_retorno1_mediana3". La nomenclatura a la que se hace referencia es primero el tamaño de celda del CHM, el filtrado al que se ha sometido (*smooth/median*) y el tamaño de la ventana de suavizado, los retornos considerados para el modelo y si se aplica el filtro de mediana.

Tabla 8. Resultado de los criterios de selección del modelo.

nombre modelo	Nº recintos		Área recintos		Coincidencia inventario	
	Total	Filtrado	Total	Filtrado	Total	Filtrado
Tamaño1_suavizado3	5208	2951	62	83	154	141
Tamaño1_suavizado3_1,2,3-retornos	5208	2952	62	83	154	141
Tamaño05_suavizado9_retorno1_mediana3.	2868	2104	84	102	146	140
Tamaño05_suavizado7	7157	2261	41	82	162	139
Tamaño05_suavizado7_retornos_123	7156	2263	41	82	162	139
Tamaño1_suavizado3_retorno_1	5245	2935	61	83	153	139
Tamaño05_suavizado_retorno_1	6524	2367	45	82	152	138
Tamaño05_suavizado_mediana3	2967	2099	81	101	142	138
Tamaño05_suavizado9_retorno_1	4507	2212	60	96	145	138
Tamaño05_suavizado9_retorno_123_mediana3	2966	2101	81	101	142	138
Tamaño05_suavizado9_retorno_123	5072	2123	53	96	145	136
Tamaño1_suavizado3_mediana3	3171	2346	80	95	140	134
Tamaño1_suavizado3_retorno_123_mediana3	3173	2349	80	95	140	134
Tamaño05_suavizado9_mediana7	1956	1636	109	124	134	133
Tamaño05_suavizado9_retorno_123_mediana7	1956	1634	109	124	134	133
Tamaño1_suavizado3_retorno_1_mediana3	3169	2346	79	95	142	133

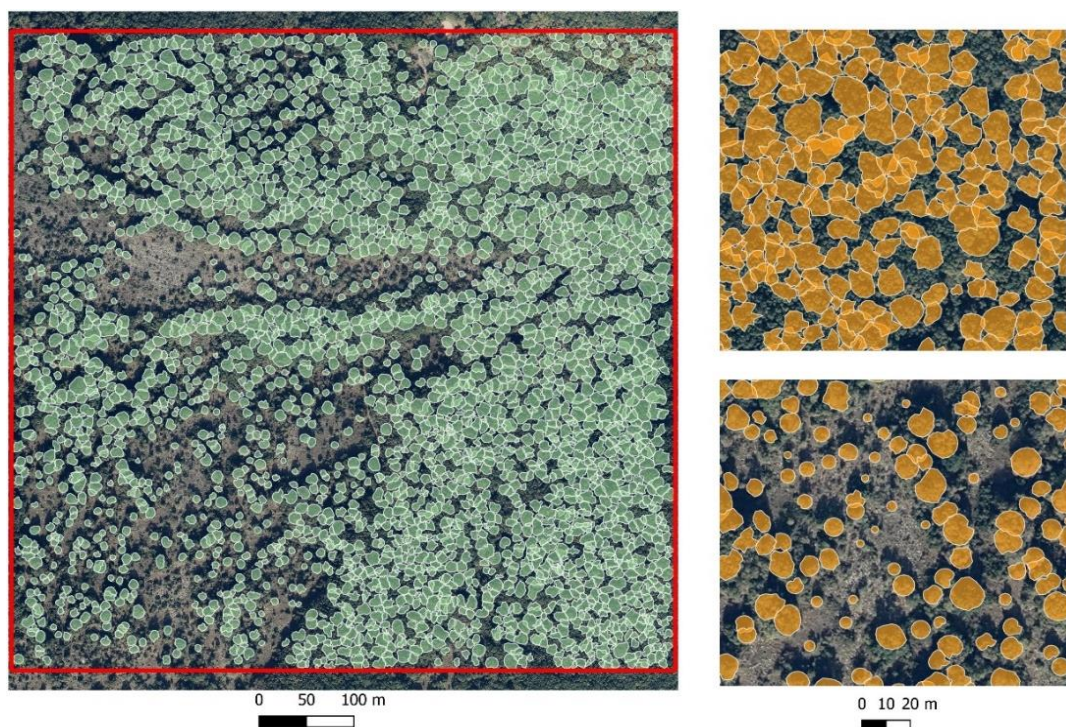


Figura 11. En verde y a la izquierda, el modelo seleccionado. A la derecha, ejemplos de otros modelos con resultados pobres: arriba, ejemplo de solapamiento de recintos, y debajo, ejemplo de recintos con un área insuficiente.

Predicción de la altura

Tal y como se explica en la metodología, para estimar la altura de los árboles, en primer lugar, es necesario normalizar las alturas de los puntos LiDAR a unidades de altura sobre el suelo, para lo que es necesario contar con un Modelo Digital del Terreno (MDT) subyacente, respecto al que normalizar las alturas (calculando la diferencia). Se consideró utilizar el MDT obtenido mediante el algoritmo *GridSurfaceCreate* y con un tamaño de celda de 1m.

La selección de la unidad de árbol se relaciona con la predicción de la altura del árbol a partir de las métricas LiDAR. Inicialmente, y como se detalla en el apartado de ‘Selección de unidad de árbol’ y en la Figura 7, se utilizó un buffer de 9m de radio sobre los pies inventariados. Sin embargo, en un segundo intento de reducir la diferencia de alturas, se propuso utilizar un tamaño de buffer más pequeño, y generar el buffer sobre el centroide del contorno generado en el TSM (Figura 7, proceso verde y naranja). Además de los contornos regulares (buffers) se extrajeron también las métricas de los recintos generados a partir del modelo de segmentación de árboles. En pocas palabras, se realizó la predicción y extracción de las métricas sobre las unidades de medida representadas en la figura 7, que son las siguientes:

- 1-Buffer de 9m de radio sobre los puntos de los pies inventariados
- 2-Recintos generados a partir de la segmentación de árboles
- 3-Buffer de 6m a partir de los centroides de los recintos del punto anterior

Para cada una de ellas se extrajeron las siguientes métricas LiDAR:

- Altura máxima
- P99 de la altura
- P95 de la altura
- P90 de la altura

Se calculó la diferencia de la altura medida en campo para los árboles inventariados con las alturas estimadas con estas 12 combinaciones posibles (1 MDT x 3 recintos x 4 métricas) de procesado LiDAR (Tabla 9). Los resultados ilustran que la métrica LiDAR resulta el aspecto más determinante, obteniéndose mejores resultados con la altura máxima, y a continuación los percentiles P99, P95 y P90, en orden. La forma de determinar el recinto es también importante, produciéndose una mejora clara al utilizar los recintos segmentados o los buffers sobre su centroide respecto al uso de un buffer de 9m sobre las coordenadas de los pies.

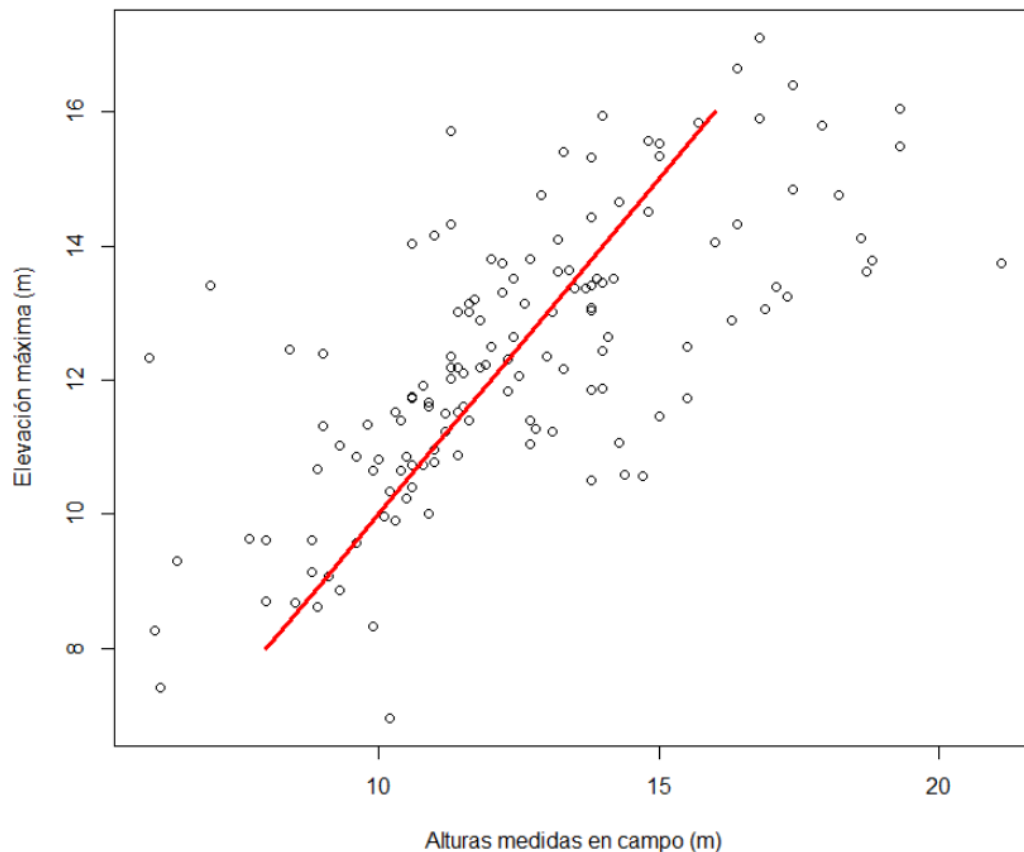
Tabla 9. Resultados del error medio cuadrático (RMSE) para las diferentes métricas y recintos.

Recintos/Métricas	RMSE			
	P90	P95	P99	Max
Buffer sobre el centroide del recinto	2,69	2,44	2,19	2,13
Recinto segmentado (TSM)	2,82	2,57	2,31	2,17
Buffer sobre el inventario	3,61	3,01	2,51	2,78

La dispersión entre los datos observados y los predichos (Figura 12) denota una relación entre las dos muestras, ya que los puntos se concentran alrededor de la línea y parecen seguir una tendencia normal. Cabe resaltar que, en el caso de los árboles medidos en campo, para aquellos individuos con una altura mayor existe una subestimación por parte de la métrica de elevación máxima, ya que se predice una altura menor a la observada.

Figura 12. Gráfico de dispersión entre las alturas observadas en campo y las alturas máximas obtenidas mediante del buffer del centroide del modelo de segmentación (TSM).

Gráfico de dispersión de las alturas



3.3 Métricas LiDAR a nivel de árbol

En este apartado se mostrarán las métricas obtenidas del análisis realizado en *CloudMetrics* y que corresponden a cada subconjunto de datos (árbol).

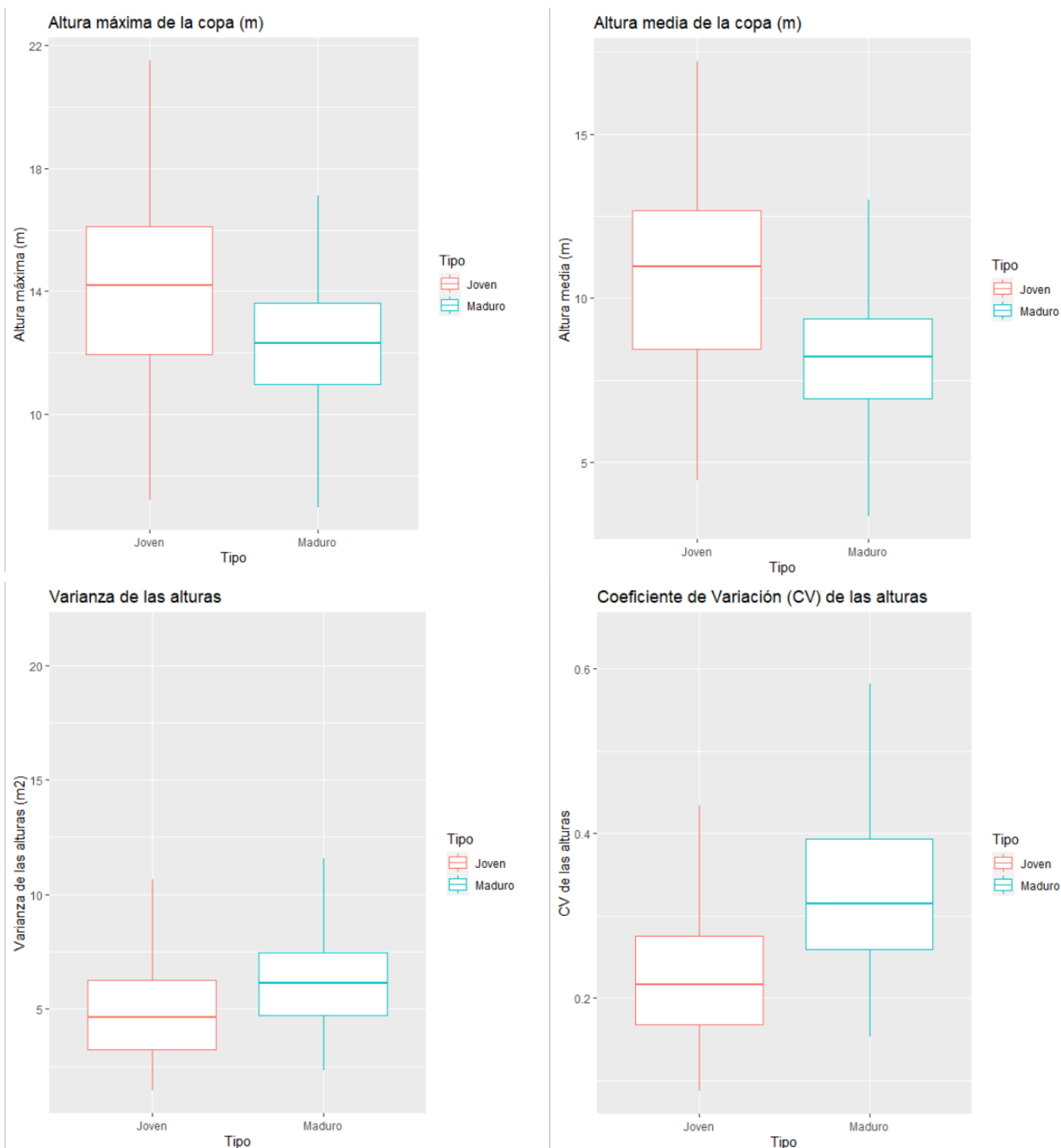


Figura 13. Representación de la diferencia entre los ejemplares jóvenes y los maduros, para las alturas máximas, alturas medias, y la varianza y covarianza de las alturas.

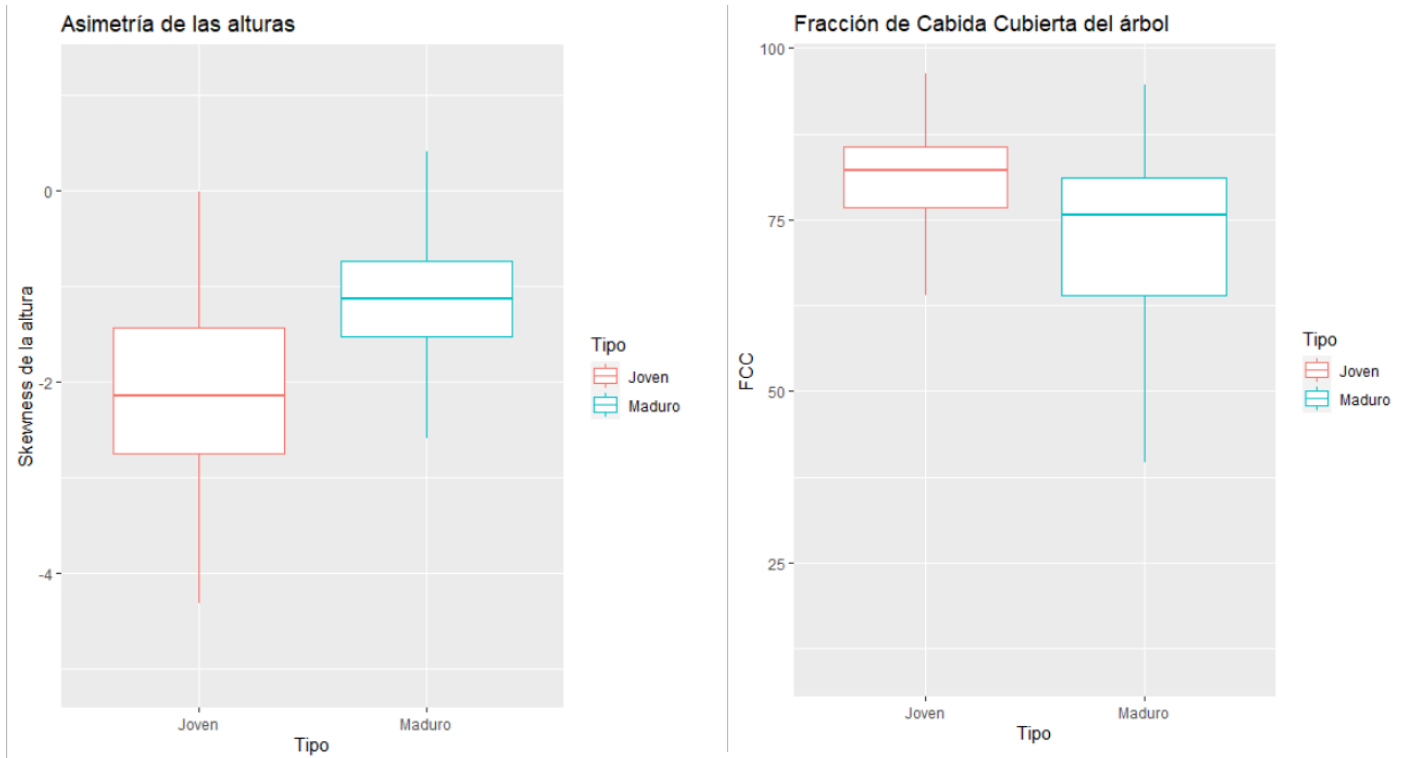
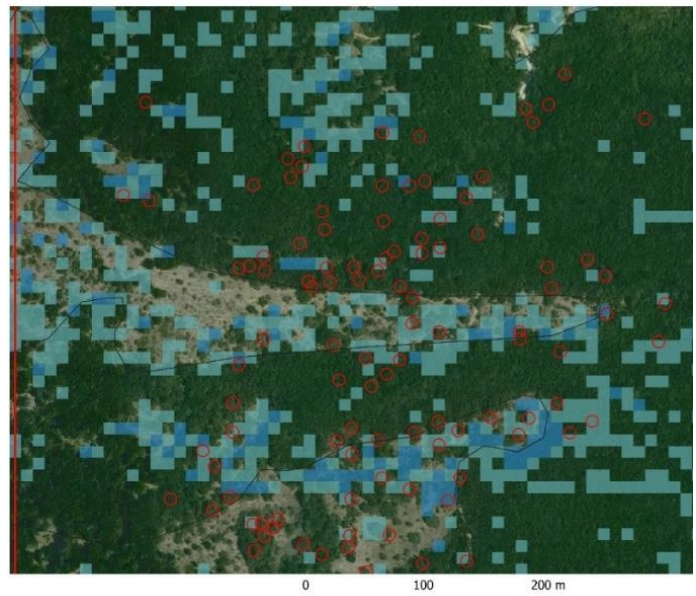
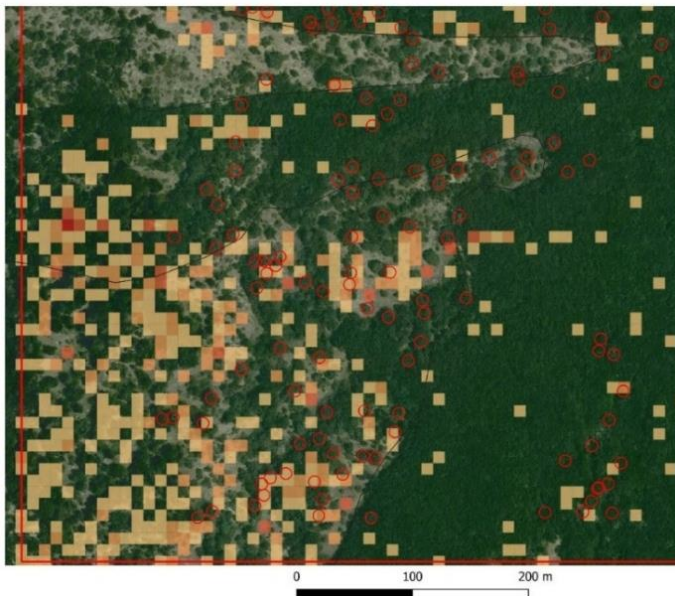


Figura 14 Representación de la diferencia entre los ejemplares jóvenes y los maduros, para la asimetría de las alturas y la Fracción de Cabida Cubierta.

Proporción de retornos por rango de alturas (estratos)

Previo a realizar una clasificación por retornos, se estudió la proporción de retornos intermedios (2º, 3º) sobre el total y a diferentes escalas (Tabla 10).



2ºdos 3ºeros retornos (%)

- 14 - 16%
- 16 - 19%
- 19 - 27%
- 27 - 33%

2ºdos 3ºeros retornos (%)

- 2 - 8%
- 8 - 10%

Figura 15. Segundos y terceros retornos sobre la zona con presencia de árboles adultos (buffers rojos).

Aunque no se apreció ninguna diferencia significativa entre ejemplares jóvenes y maduros, la representación de estos valores (Figura 15) permite ver los lugares donde la proporción de retornos es mayor.

Tabla 10. Resultados de la proporción de los retornos por el número de retornos sobre el total.

	% 1º retornos (0,5-25 m)	% 2º retornos (0,5 -25)	% 3º retornos (0,5 -25)	% 4º retornos (0,5 -25)
Ejemplares maduros	87,56	11,68	0,73	0,03
Ejemplares jóvenes	87,35	11,81	0,81	0,03
Malla (ha)	87,95	11,31	0,71	0,03

Se analizó la proporción de puntos en los estratos verticales definidos en el apartado 2.2 (Tabla 2). El objetivo de este análisis es explorar el perfil vertical de los puntos, clasificar los puntos en función de su altura, ver su proporción y observar si existen diferencias en los estratos, y como consecuencia, concluir si el LiDAR es capaz de penetrar el estrato arbóreo e identificar estratos no dominantes.

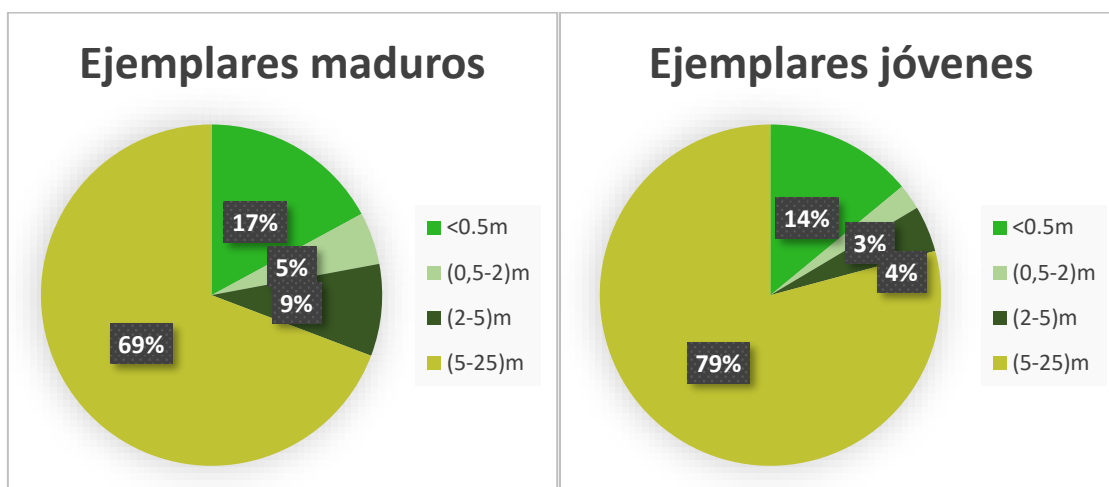


Figura 16. Comparación de retornos por rango de alturas entre árboles maduros y árboles jóvenes.

Tal y como se muestra en la Figura 16, en el caso de los árboles maduros, la proporción de retornos con una altura inferior a los cinco metros es un 10% superior a la observada en los ejemplares más jóvenes, estando las diferencias concentradas principalmente en el estrato definido entre los 2-5m, si bien los estratos inferiores presentan también porcentajes algo más elevados en los árboles maduros que en los jóvenes. La altura media de los árboles maduros se encuentra en los 8m, por lo que, si consideramos esta parte como ‘la parte inferior de la copa del árbol’, se observa que, en el rango de alturas entre 5-8m, en los ejemplares antiguos la proporción de retornos es del 20,30%, frente al 12,68% de los jóvenes.

En pocas palabras, la proporción de retornos en la parte inferior de la copa (<8m) y por debajo de la copa (<5m) es superior en el caso de los árboles maduros.

Altura del árbol

La diferencia entre la altura máxima de los árboles maduros y los jóvenes es de dos metros de media (Figura 13), alcanzando estos últimos una altura superior. Si no se realiza una discriminación por tipo de árboles, la altura máxima media es de $13.29 \pm 2.75\text{m}$, lo que entraría dentro del rango de alturas para la especie. En el caso de los árboles maduros, la mediana es de 12,31m y en el caso de los jóvenes de 14,19m. En cuanto a la variabilidad de los datos de altura máxima, es mayor en el caso de los árboles jóvenes, ya que cubren un mayor rango de alturas máximas.

Altura media de los retornos del árbol

Como ocurre con la altura máxima, la altura media de los retornos de la copa del árbol está dos metros por encima en los árboles jóvenes (8,12m en los árboles maduros frente a 10,59m de los jóvenes), así como también lo es la desviación típica de la media. La media total del dosel, sin diferenciar por tipos de árboles es de $9.4 \pm 2,90\text{m}$.

Asimetría de la altura

La asimetría (*skewness*) de la altura nos informa sobre la forma de la distribución de los valores de la altura de la copa. Los valores obtenidos son negativos, lo que indica que la mayoría de los elementos de la cubierta se concentran por encima de la altura media. En el caso de los árboles jóvenes, los valores son más negativos, lo que lleva a pensar que la mayoría de los retornos proceden de la parte superior de la copa. Los árboles maduros tienen valores algo menos negativos (Figura 14).

Fracción de Cobida Cubierta (FCC)

El parámetro de fracción de cobida cubierta, como se ha mencionado anteriormente, es un parámetro de interés en estudios de masa forestal. En este apartado se muestran los resultados a nivel de árbol, es decir, la proyección de la copa sobre el área del contorno ($113,1\text{m}^2$). Se observó que la FCC en el caso de los árboles maduros es menor (Figura 17), y del total, un 8% tienen una FCC inferior al 40%, que podrían considerarse valores atípicos. En los individuos jóvenes los valores son mucho más altos y sólo un 12% tiene una FCC inferior al 60%.

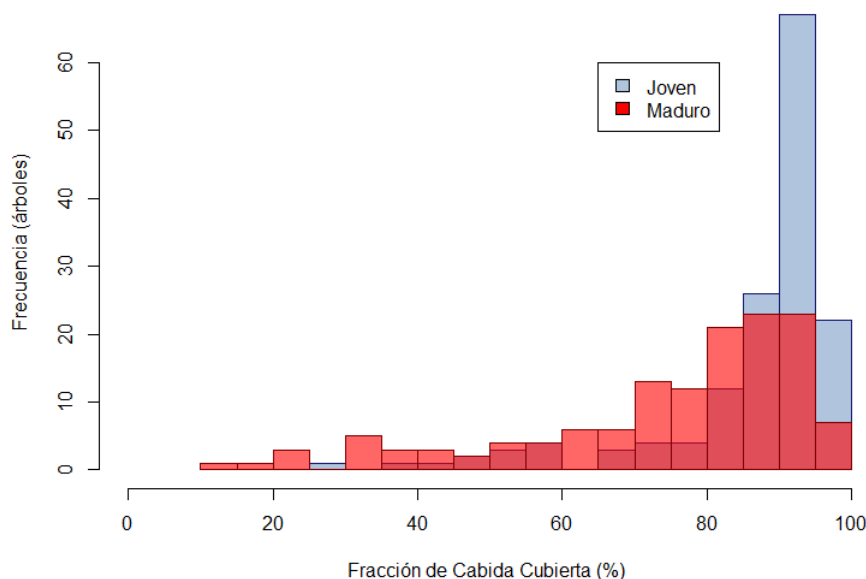


Figura 17. Distribución de los valores de la Fracción de Cobida Cubierta a nivel de árbol.

En cuanto a los valores superiores al 80%, un 54% de los ejemplares maduros tienen una FCC superior a dicho valor, y en los jóvenes un 84,66%.

Varianza de la altura

En cuanto a la varianza de la altura, la tendencia es inversa, ya que, en el caso de los árboles maduros, la varianza es mayor: el 25% de los árboles maduros tiene un 4,7m² de varianza y el 75% 7,47, mientras que los árboles jóvenes el 25% tiene una varianza de 3,24 m² y el 75% un 6,23 m². Sin embargo, la variabilidad de esta métrica es similar (Figura 13).

Coefficiente de variación de la altura (CV)

Por último, se estudió el coeficiente de variación de la altura. Esta métrica resulta interesante, ya que se encuentra muy correlacionada con otras métricas como el *Canopy Relief Ratio*, *Profile Area*, altura media o la asimetría (Figura 10). Esta métrica permite realizar una comparación relativa en la variabilidad de las alturas entre los ejemplares jóvenes y adultos.

El valor medio de CV para todos los árboles es de $0,27 \pm 0,10$, siendo superior la de los árboles maduros (0,31) a la de los jóvenes (0,21). En los árboles maduros, el 54% tiene un CV superior al 0,3 mientras que entre los jóvenes solo un 18% supera ese valor. Resumiendo, la variabilidad en las alturas de la copa es claramente superior en el caso de los ejemplares maduros (Figura 13), mientras que la distribución de las alturas en los jóvenes es más homogénea. Probablemente esta métrica, el CV, sea la que proporcione una mayor separabilidad entre ejemplares jóvenes y maduros, por lo que, si se quisiera diseñar una herramienta de clasificación para diferenciar ambos tipos de árboles a partir de datos LiDAR, sería una buena candidata como variable predictiva.

3.4 Métricas LiDAR para caracterizar un BAVE a nivel de masa

Como se ha comentado en la metodología, el análisis a nivel de masa considera dos escalas: por un lado, la escala de una hectárea, y por otro, la de 0,01ha (100m²). En el caso del análisis por hectárea, el coste computacional es mucho menor, pero a una escala más fina el grado de detalle es mayor, lo que permite apreciar patrones espaciales y evaluar la variabilidad espacial de los resultados.

Densidad

El estudio de la densidad se realizó utilizando las mismas cuadrículas que se utilizaron para el análisis de malla a escala de hectárea. En las zonas con una FCC superior al 70% se observó una densidad media de 60pies/ha, con un mínimo de 42pies/ha pies y un máximo de 78. Para las zonas adhesadas (FCC<70%), la densidad no sigue una distribución normal (Figura 18), donde se predijo un mínimo de 14pies/ha y un máximo de 52pies/ha. En cuanto a los valores centrales, la mediana es de 25pies/ha.

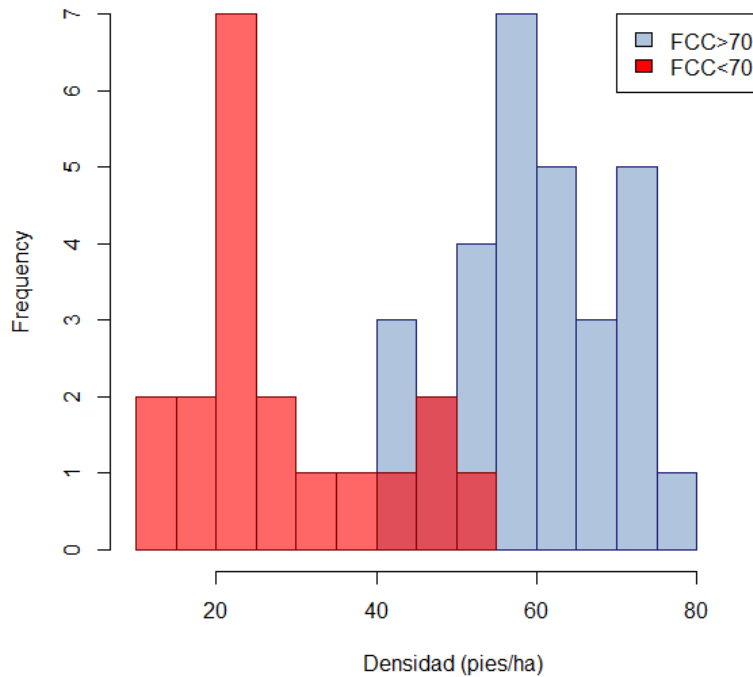


Figura 18. Histograma de la distribución de la densidad (árboles/hectárea) para las diferentes zonas segmentadas por la FCC.

Proporción de puntos por estrato

Se analizó la proporción de puntos por estrato (rango de alturas) también a nivel de masa considerando la escala fina de 10x10 metros.

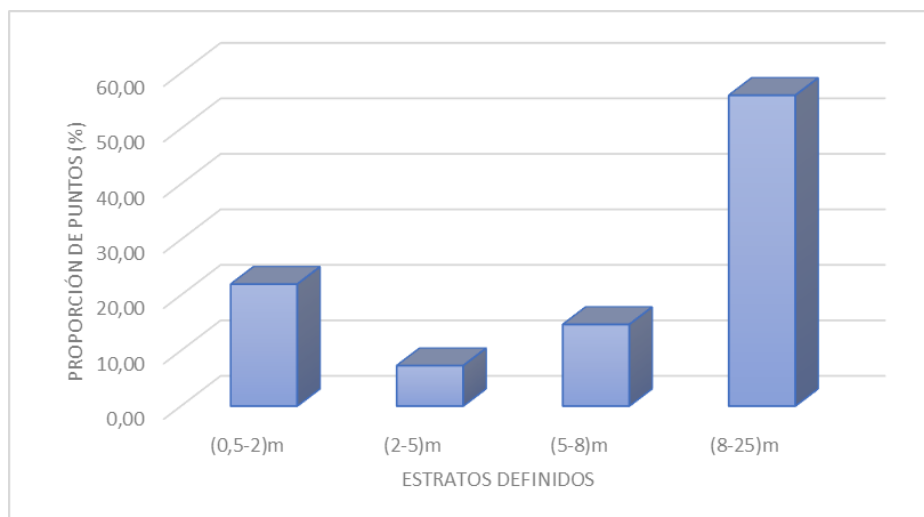


Figura 19 Porcentaje de retornos medidos con un tamaño de celda de 10x10 metros.

La clasificación por estratos deja en evidencia la diferencia en la distribución de puntos por estrato. En el anexo I se adjuntan cuatro mapas que muestran el porcentaje de retornos por los estratos definidos en la Tabla 2 para el área de estudio.

Para el área de estudio, más de la mitad de los puntos se concentran en el estrato arbóreo. Dicho de otra manera, el 84% de los puntos tienen una altura superior a los cinco metros. En un segundo lugar, casi el 22% de los puntos procede del estrato herbáceo, y donde menos puntos se obtiene es en el rango intermedio de 2-5m.

En la Figura 20 se muestra una zona dentro del área de estudio donde se puede observar dónde se ubican las zonas con mayor proporción de retornos entre los 5 m y 8m, que resultan ser aquellas que albergan la mayoría de los árboles maduros seleccionados para el análisis.

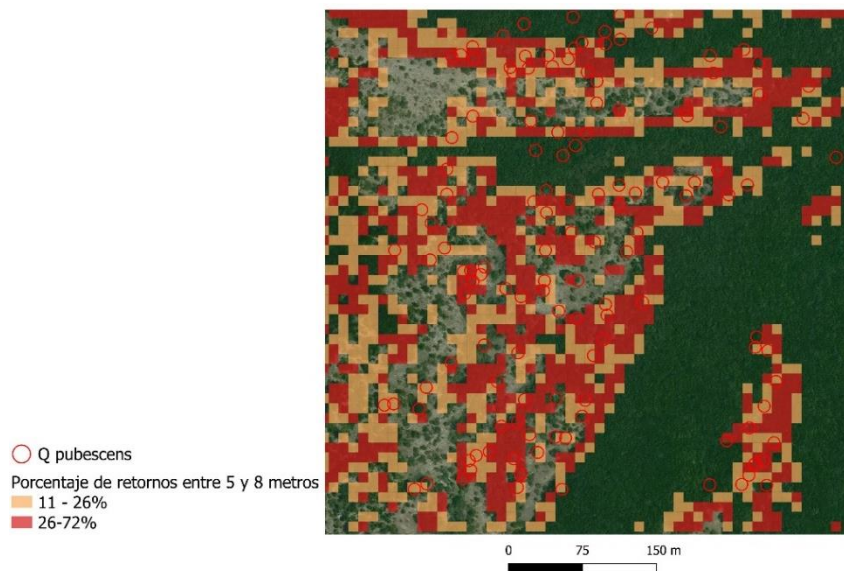


Figura 20. Porcentaje del total de retornos entre las alturas de 5 y 8 metros.

Altura dominante:

Hectárea

La altura dominante se puede obtener bien del percentil 90, o bien del percentil 95. En ambos casos, los resultados siguen una distribución normal de los valores, con una altura dominante media entre los 12,67m y 13,45m (P90 y P95, respectivamente).

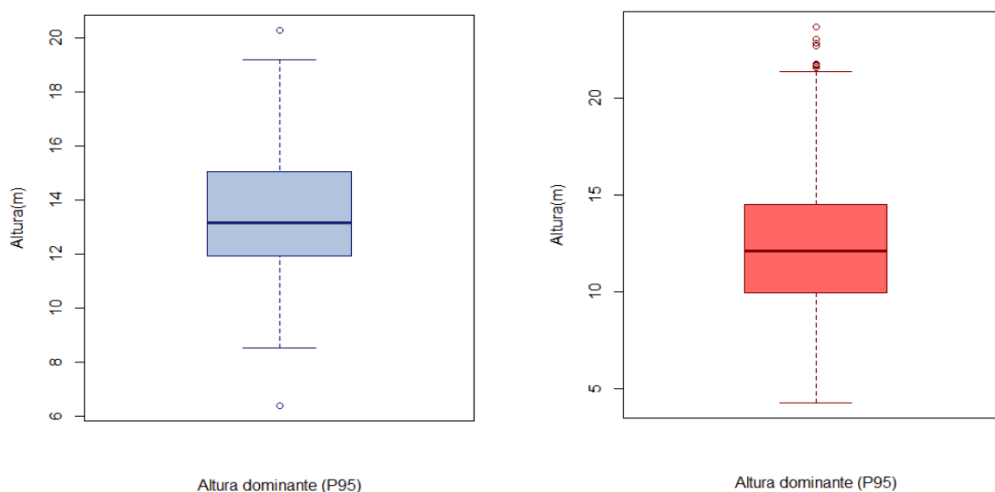


Figura 21. Alturas dominantes (H_0) calculadas a partir del percentil de elevación 95. A la izquierda, la altura dominante por hectárea, a la izquierda, 10x10m.

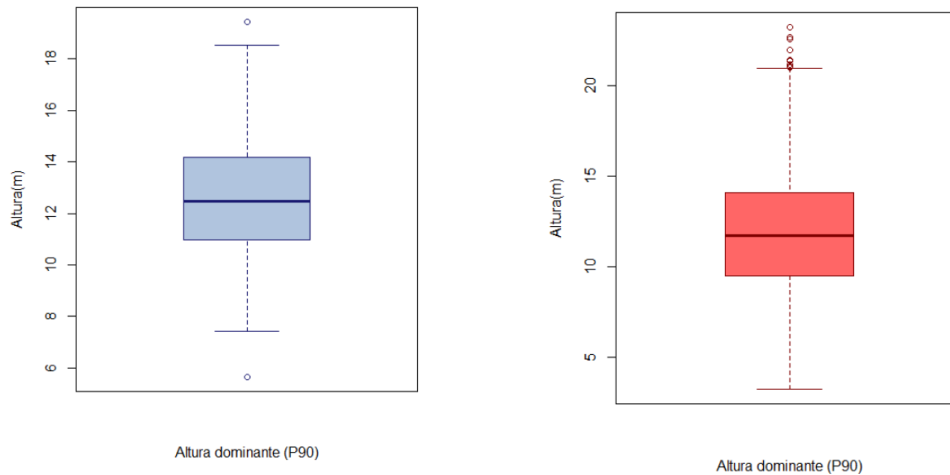


Figura 22. Alturas dominantes (H_o) calculadas a partir del percentil de elevación 90. A la izquierda, la altura dominante por hectárea, a la izquierda, 10x10m.

100m²

En esta escala más fina la altura dominante media es ligeramente inferior (11,70m para P90 y 12,098m P95). Ahora bien, al trabajar con una unidad más pequeña, se detecta una mayor dispersión de los valores.

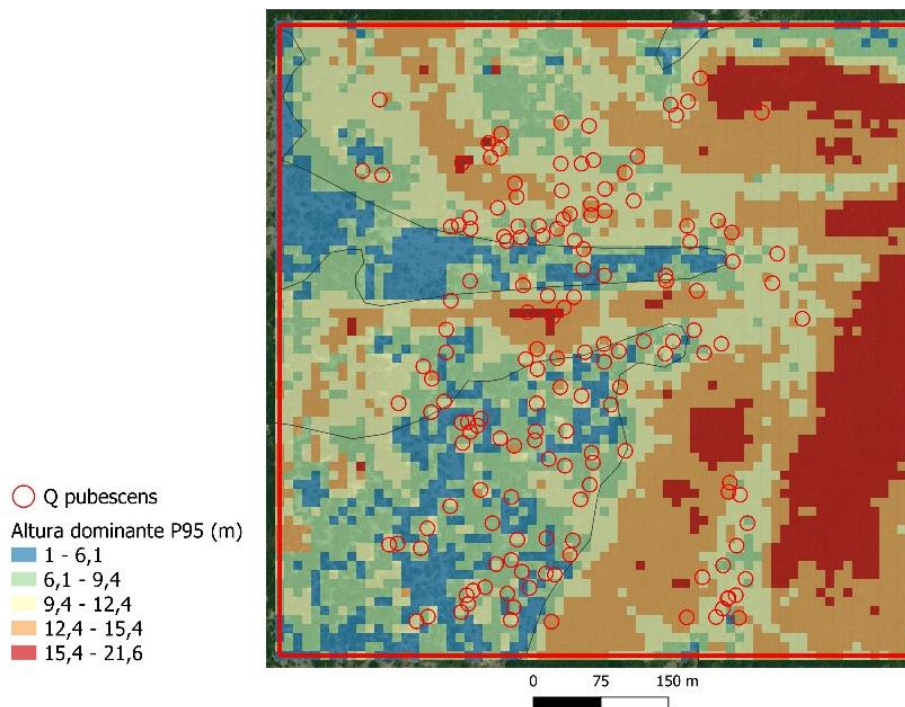


Figura 23. Representación de la altura dominante (percentil 95) para la zona de estudio. La clasificación de los valores sigue una distribución de rupturas naturales.

Al este del área de estudio (Figura 23) donde el bosque es más denso, la altura dominante es superior a 12,4m, es decir, es superior a la media de la altura máxima de los árboles maduros (Figura 13) y entra dentro del rango de los valores teóricos que puede alcanzar la especie. Sin embargo, en esta zona apenas se encuentran unos pocos árboles monumentales, y estos se localizan en las zonas más periféricas o en transición entre las zonas con una altura dominante superior a los 12,4m (en naranja y rojo) y las zonas con una altura dominante inferior a los 6,1m (azul).

Varianza de la altura:

Hectárea

El rango de varianza de las alturas por hectárea es como mínimo de 2,70m² para zonas muy homogéneas, y máximo de 19,32 m², en zonas donde la diferencia de alturas de los árboles para cada celda es mayor. La mediana de la varianza es de 9,13 m².

100m²

La diferencia en la varianza de la altura también aumenta al incrementar la escala, encontrándose los valores mínimos desde los 0,92 m² hasta los 49,46 m² de máxima. A su vez, las medidas de centralización son inferiores a las obtenidas en el análisis por hectáreas: mientras que por hectáreas la mediana de la varianza es de 9,13m, a escala de 0,01 hectáreas desciende a un valor de 5,46 m². Estos valores son más cercanos al valor de mediana observada a nivel de árbol (4,6m² para ejemplares jóvenes y 6,1m² los maduros), pero resulta lógico a tratarse de una unidad de medida con una extensión más similar (100m² y 113,1m²).

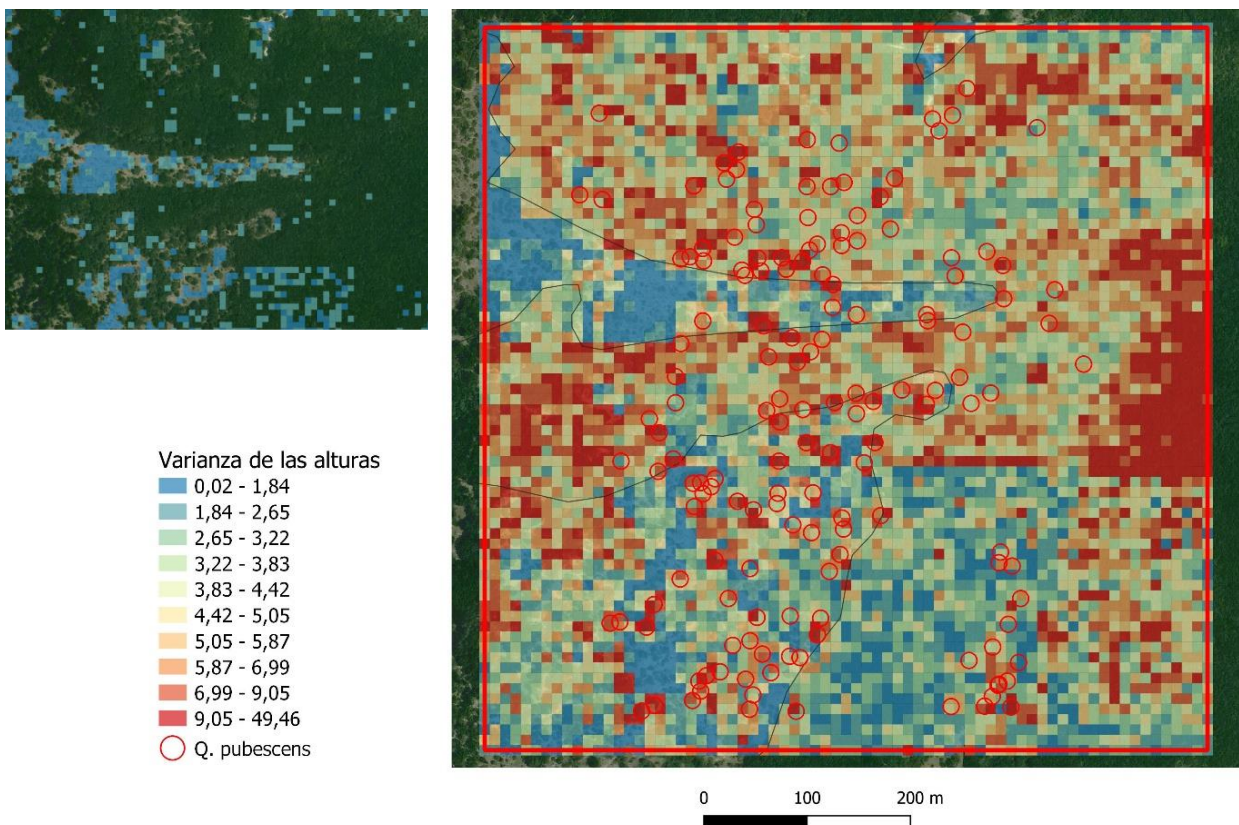


Figura 24. A la derecha, representación de la varianza de la altura en zona de estudio. A la izquierda, las zonas con valores de varianza más pequeñas. La clasificación de los valores sigue una distribución cuantil.

Asimetría:

Hectárea

Como pasaba con los resultados a nivel de árbol, la asimetría de la distribución de los valores de la altura para la zona de estudio analizada es de carácter negativo, es decir, la mayoría de los retornos proceden de alturas superiores a la altura media. Sin embargo, como se observa en la Figura 25, un 20% de las celdas de 1ha siguen una distribución positiva; esto indica que los retornos proceden de una altura inferior a la media.

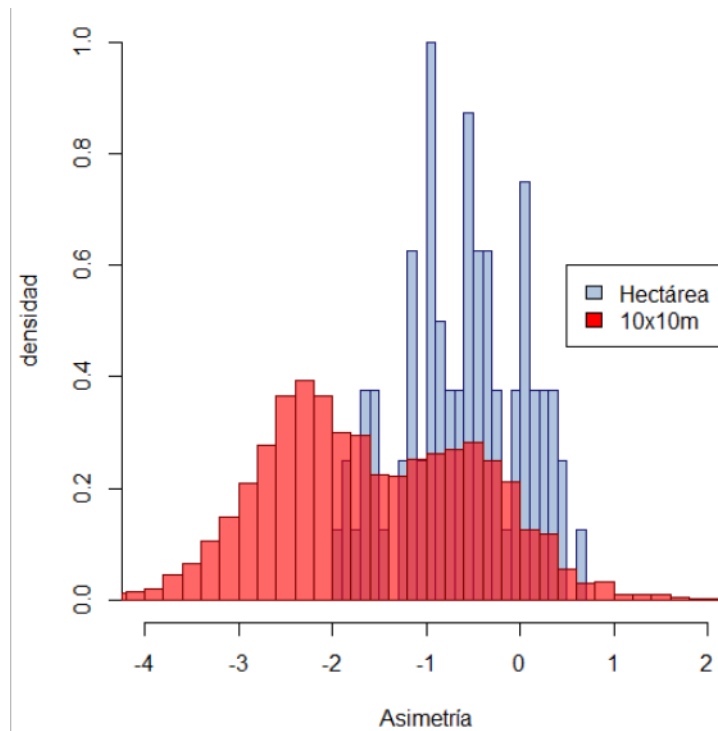


Figura 25. Comparación de la distribución de los valores de asimetría en la altura.

100m²

A esta escala, la diferencia en la asimetría de las alturas se percibe mejor (Figura 25). Existe una tendencia de valores muy negativos (ente -4 y -1) y otra tendencia a valores más positivos (-1 y 1). En rojo y naranja, valores positivos (Figura 26).

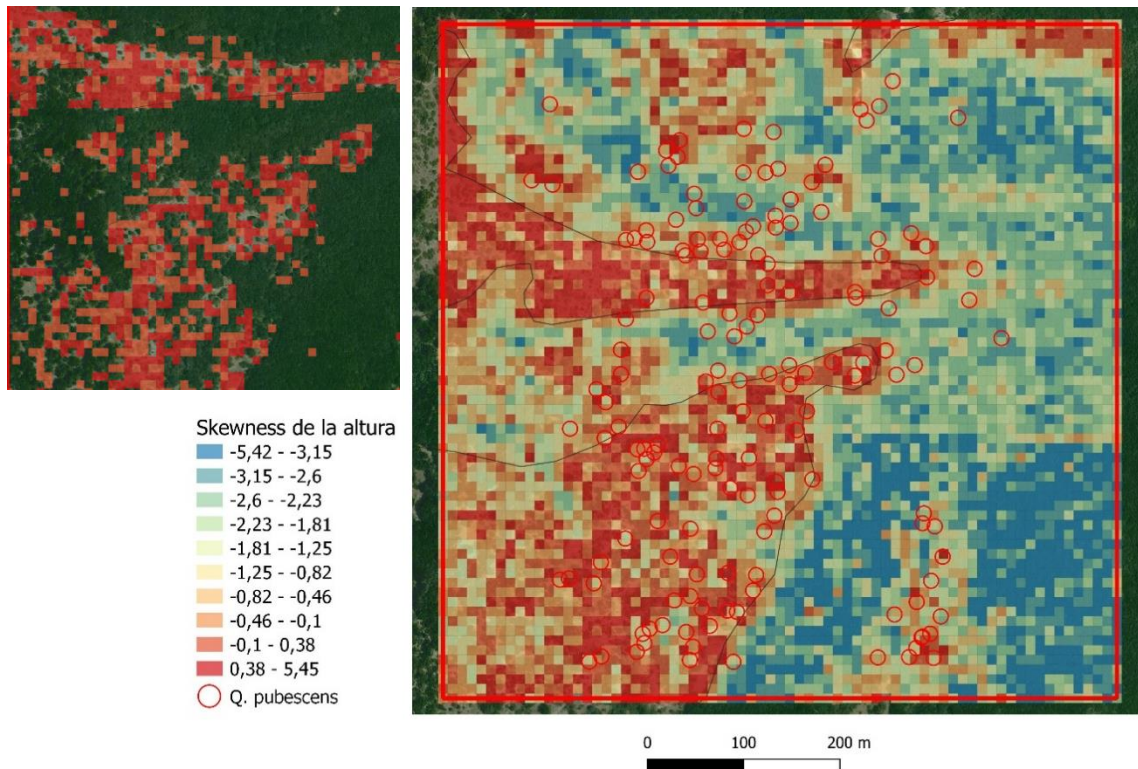


Figura 26. A la derecha, representación de la asimetría en las alturas para la zona de estudio. La clasificación de los valores sigue una distribución cuantil. A la izquierda, alturas con una distribución sesgada hacia la derecha (valores positivos).

Se puede percibir una diferencia en la distribución de la asimetría de las alturas. Al este, donde la altura dominante es superior a los 14m (Figura 23) los valores son negativos, y por el contrario, al oeste, donde predominan los claros, los valores son más positivos.

Fracción de Cobertura Cubierta (FCC):

Hectárea

Por lo general, los valores para la FCC son altos; sin embargo, existen zonas con una FCC inferior al 20%. El 75% del terreno tiene al menos una FCC superior al 72,22% y un 25% tiene una FCC superior al 97,2%.

100m²

En los dos casos, la tendencia que toma la distribución de los valores es similar. No obstante, a esta escala, la distribución de valores con una FCC de entre 85% y 95% se diferencia mejor (Figura 27). La mitad del área de estudio tiene una FCC igual o mayor al 89,7%, que podría considerarse una fracción alta. Sin embargo, los ejemplares más longevos, se sitúan en zonas donde la FCC es inferior al 85% (colores del azul al amarillo, Figura 28).

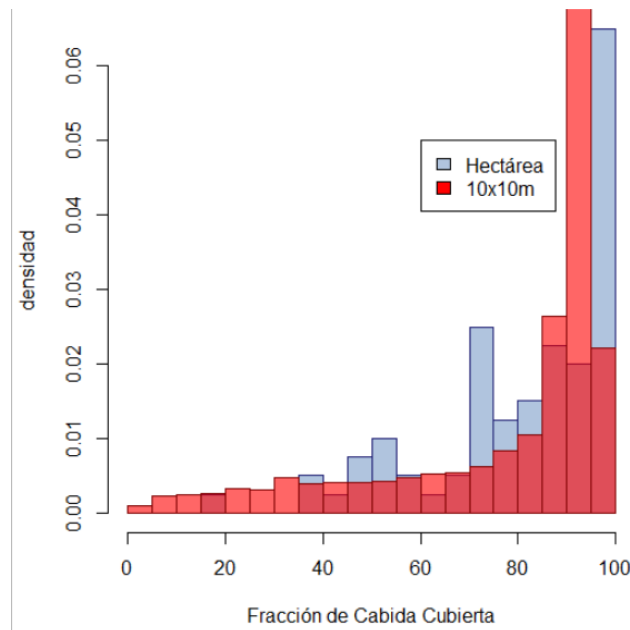


Figura 27. Histograma de la comparación en las distribuciones de los valores de la Fracción de Cobertura Cubierta (FCC).

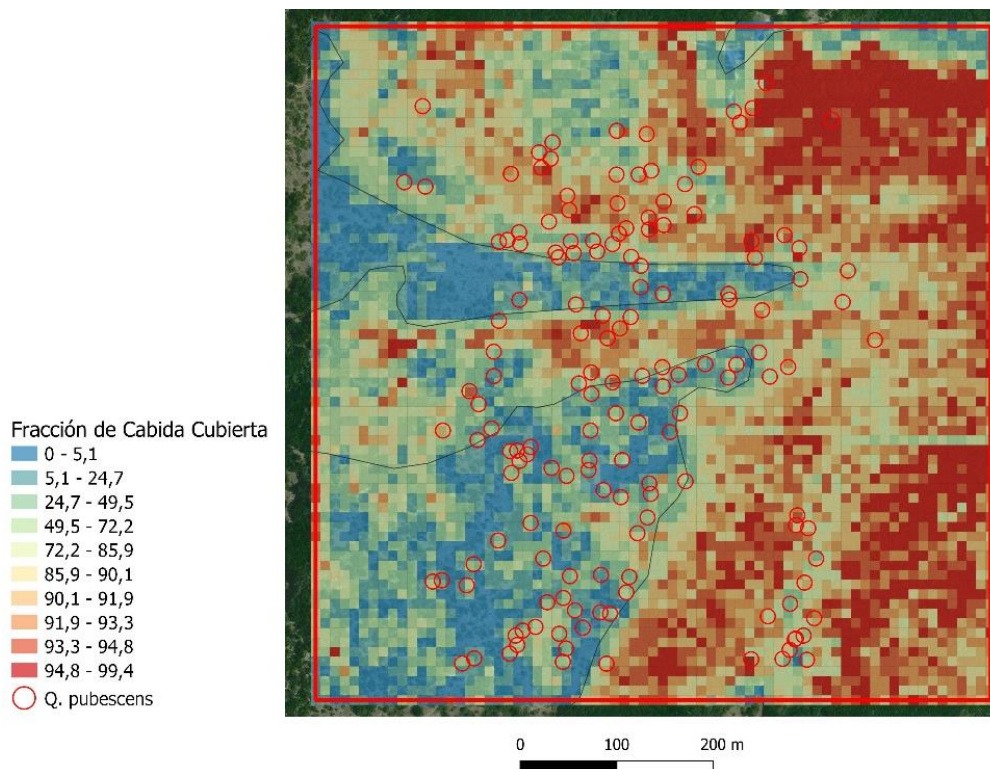


Figura 28. Representación de la Fracción de Cobertura Cubierta para la zona de estudio. La clasificación de los valores sigue una distribución cuantil.

Coeficiente de Variación (CV) de la altura

Hectárea

En relación con la variabilidad de las alturas, el valor mínimo del CV es de 0,14 y el máximo de 0,64, un rango similar al obtenido en el caso de los árboles maduros (entre 0,15 y 0,64). El valor medio del CV por hectárea es de 0,37.

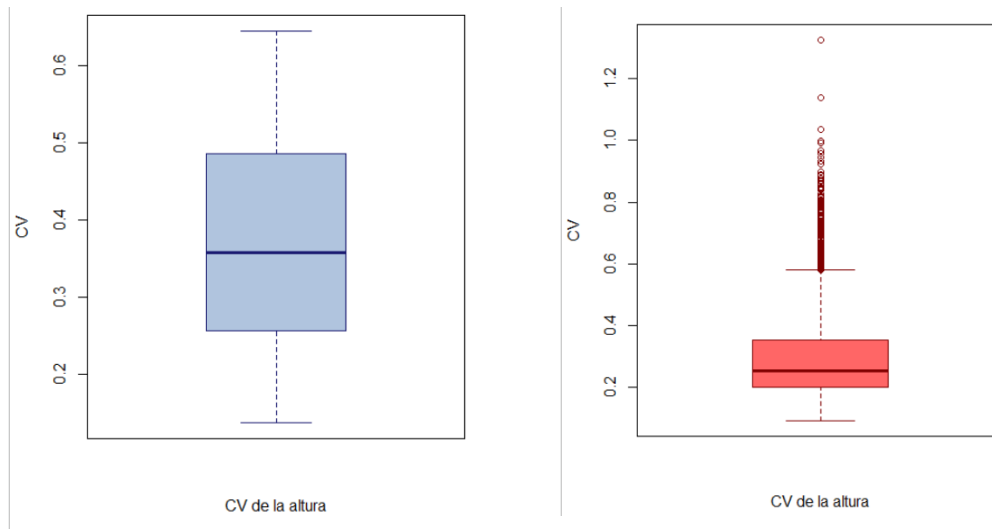


Figura 29. Diferencia del Coeficiente de Variabilidad de las alturas. A la izquierda, por hectáreas, a la derecha, a 10x10m.

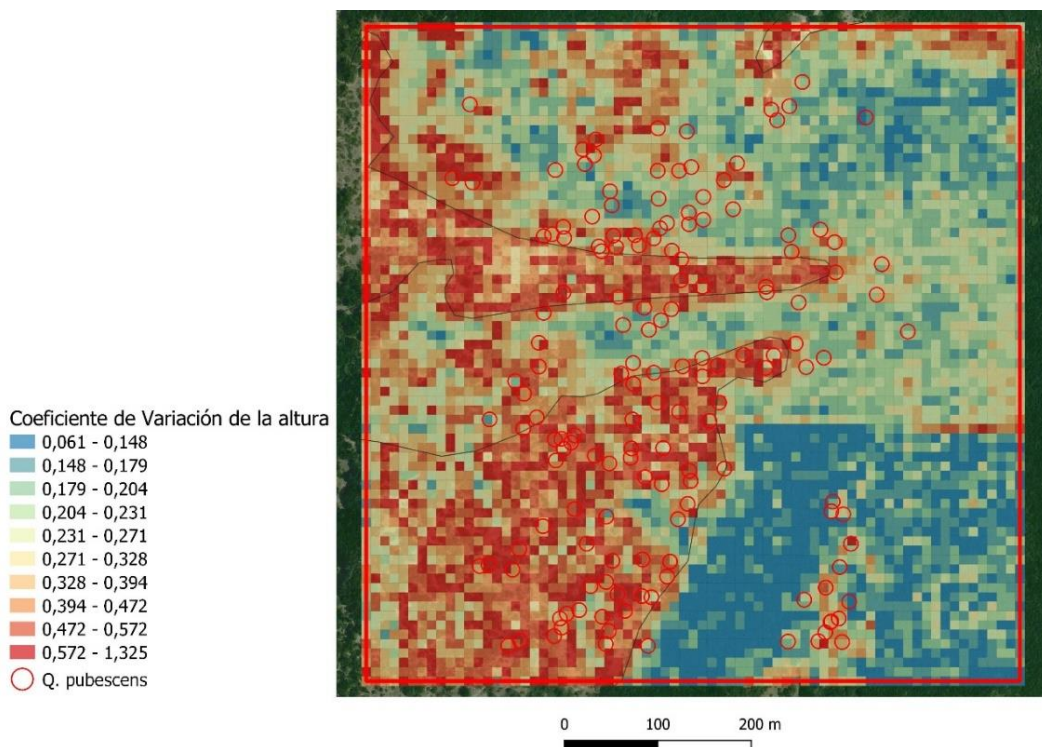


Figura 30. Representación del Coeficiente de Variación (CV) en el área de estudio. La clasificación de los valores sigue una distribución de rupturas naturales. A la izquierda, las zonas con CV superior al 0,23. Los valores por debajo no están representados.

100m²

A una resolución más fina, los valores de CV no siguen una distribución normal; además, existen valores muy por encima de la media y mediana (Figura 29). Los valores de CV y que se relacionan con la variabilidad horizontal, son más altos en la zona oeste y en algunas zonas más al norte del área. Es en esta zona donde podemos observar que se encuentran los árboles maduros (Figura 30).

4. Discusión

El objetivo principal del trabajo ha sido determinar qué métricas LiDAR pueden utilizarse para caracterizar un BAVE, utilizando como objeto de estudio un bosque comunal de roble pubescente, de unas 200 hectáreas y con casi 400 árboles monumentales diseminados, y que se encuentra en fase de regeneración hacia la madurez (Figura 2). Sin embargo, se ha analizado únicamente un área de 49 hectáreas, que ha sufrido un cambio en el paisaje por el abandono y retroceso de las actividades silvopastoriles (GAN-NIK, 2020). Por esas razones, los árboles más jóvenes, que se concentran al este del área de estudio, han podido desarrollarse en unas condiciones ambientales y con un grado de competencia diferente (Sarasa, 2021).

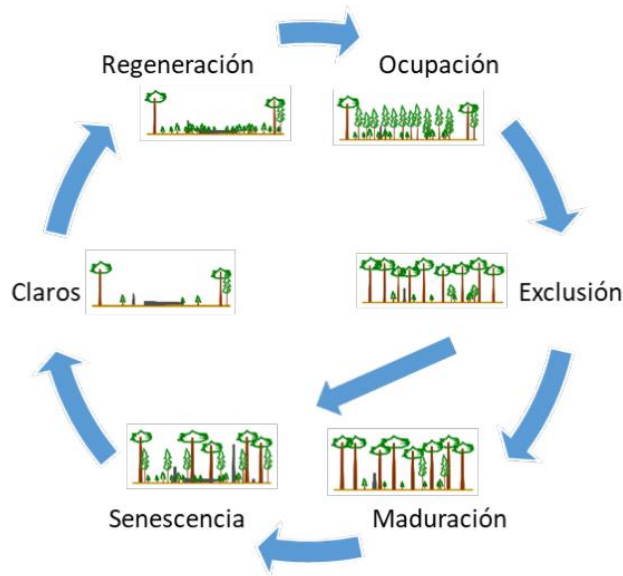


Figura 31. Esquema de las fases en el desarrollo temporal de un rodal, y aceleración o exclusión de ciertas fases por la gestión forestal descrito por (Begehold, Rzanny y Flade (2015) (LIFE RedBosques, 2018).

Así pues, en la masa forestal existen zonas en diferentes fases por la intervención humana en el pasado (Figura 31). Se espera, por lo tanto, observar cierta diferencia o grado de heterogeneidad en la estructura vertical y horizontal a lo largo del BAVE.

4.1 Cadena de procesado: la importancia de las unidades de medida y escala

Se ha definido una cadena de proceso con el fin de obtener un modelo de segmentación que permita extraer parámetros y medidas a nivel de árbol con el fin de servir de referencia. Este paso no persigue definir unos valores estandarizados, si no definir qué parámetros del CHM y del TSM se han de considerar para desarrollar un modelo que se ajuste al terreno estudiado. Es conveniente, además, realizar una salida a campo que permita obtener parámetros morfológicos como el rango de alturas y el diámetro de la copa con el fin de definir el tamaño de los contornos para el modelo de segmentación.

La escala también puede considerarse un factor condicionante que se ha de ajustar a la extensión del terreno y a las necesidades y limitaciones de cada estudio.

A partir del análisis a nivel de árbol se obtuvieron un rango de valores que se aproximaban en algunas métricas a las observadas a nivel de masa. Esta similitud en el rango se da gracias a la que la unidad de escala de 10x10m es más parecida a los 113,1 m² que ocupa el contorno del árbol. Otra de las ventajas de trabajar a una escala más fina, es que los valores extremos y valores con una menor frecuencia quedan registrados, por lo que se obtiene más información de la variabilidad espacial del área que el análisis por hectáreas.

Para reproducir la metodología, se ha de considerar, además, si la densidad de puntos y la escala del área de terreno permite trabajar a una escala más o menos pequeña, ya que un estudio a mayor escala puede suponer un coste computacional considerable. Trabajar a un nivel de hectárea puede ser ventajoso, ya que se procesan los datos de una manera más rápida, se trabaja con un menor grado de variabilidad y se pueden realizar comparaciones con estudios realizados a esa misma escala (que suele ser más común).

Tanto el modelo de segmentación como el análisis de masa realizado han permitido obtener las métricas para caracterizar un BAVE. A nivel de árbol, el modelo de segmentación además posibilitó la obtención de la altura del árbol directamente del LiDAR (con una diferencia de error del MSE de 2,13m aproximadamente). Para determinar la precisión o validación del resto de resultados, como la densidad de pies por hectárea que se propone, se necesitaría realizar una validación con otros estudios, consultar el inventario forestal o validarlo con los datos de campo.

4.2 Métricas de diversidad vertical:

En este apartado, se discutirán los resultados de las métricas obtenidas con los criterios BAVE que se quieren representar. En la Tabla 3 del anexo I, se recogen los valores máximos, mínimos y estadísticos centrales de las métricas que se comentarán a continuación.

Estratos verticales

La estratificación es un parámetro importante en el estudio de los rodales, ya que aporta información sobre el funcionamiento del bosque, además la pluriestratificación se considera un criterio BAVE y se relaciona con bosque maduro y diverso (EUROPARC-España, 2020b).

En el inventario de arbolado maduro realizado en campo, se concluyó que al menos un 30% de los robles tenían entre un 50 y 75% del tronco cubierto por un estrato arbóreo y arbustivo, y que en un 77% del total de árboles, esa cobertura no superaba los 6 metros (Sarasa, 2021). Este dato indicaría la existencia de un estrato arbustivo por debajo del dosel principal para las zonas visitadas.

Al analizar la proporción de retornos LiDAR por franja de alturas, se observó que, en el caso de los ejemplares maduros, existía una proporción mayor de retornos para las alturas por debajo de los 8 metros (estrato arbóreo). En el caso de ejemplares más jóvenes, los retornos procedentes a la parte superior de la copa son de casi 80%, mientras que, en el caso de los árboles maduros, sólo de 70% (Figura 16). Esto refuerza la idea de que las copas de los árboles maduros se encuentran a una altura más baja, además, se ha observado que los árboles más viejos que ocupan el dosel superior permiten una mayor entrada a la luz a niveles más bajos del dosel (EUROPARC-España, 2020). Sin embargo, no se puede afirmar que la razón del aumento en los retornos para alturas más bajas sea por que poseen copas más 'abiertas' y por lo tanto, filtren menos los retornos.

En todo caso, al contar con un 11% y 14% de segundos retornos a nivel de árbol (Figura 15) y un porcentaje significativo en estratos inferiores (Tabla 10) indicaría que existe cierta 'penetrabilidad' del LiDAR. Este resultado permite plantear en un futuro un análisis más exhaustivo para identificar y clasificar los retornos por estratos con el fin de caracterizar las alturas y el número de estratos a nivel de árbol o masa forestal directamente del LiDAR.

Altura dominante.

Un bosque con un estrato vertical heterogéneo o irregular, es un dosel conformado por árboles de diferentes edades, especies y tamaños (Europarc-España, 2020b). La altura dominante (H_0) se menciona en varios estudios y manuales como criterio de evaluación estructural (Europarc-España, 2020) junto con el coeficiente de variación como aproximación para predecir la edad de las masas forestales (García, 2020), y ha permitido verificar que la altura dominante obtenida mediante LiDAR para la zona de estudio corresponde al rango de alturas para la especie (Figura 13 y Figura 23), que se sitúa entre los 15 y 20 metros (Caudullo & de Rigo, 2016). No obstante, existen zonas dentro del área de estudio con una altura dominante por debajo de 9,1m (Figura 23), lo que indicaría que, para la zona, los árboles no han alcanzado su altura máxima o no hay presencia del taxón.

Cabe comentar, que el estudio no busca diferenciar las especies mediante datos LiDAR, ni se ha desarrollado una ecuación para relacionar los diámetros y las alturas de los árboles medidos en campo para extraer el DAP (diámetro a la altura del pecho). Es por eso por lo que se ha recurrido al análisis de la diferencia de las alturas, la medición de la altura dominante y la extracción de alturas de los árboles para determinar la diversidad en las alturas verticales.

La forma de la distribución de las alturas de la copa y el dosel

El análisis de la forma de distribución de las alturas de la copa o la asimetría se puede plantear por el elevado de puntos que se obtiene únicamente dentro del contorno del árbol (Figura 32).

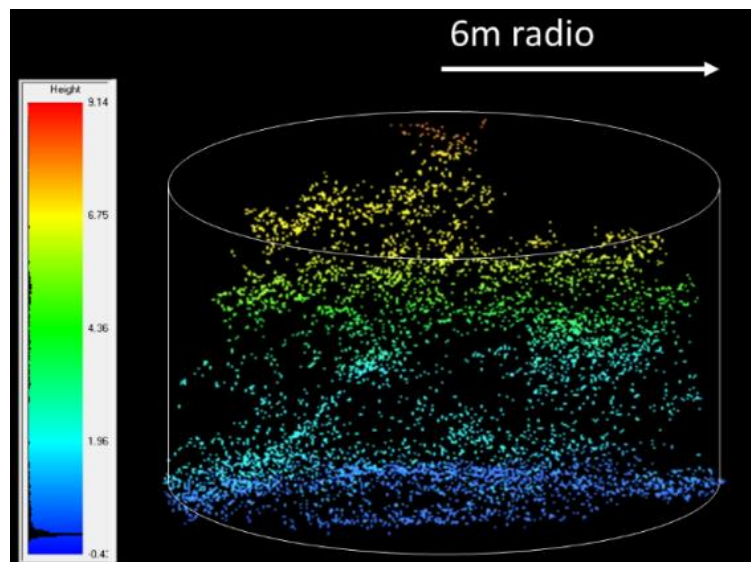


Figura 32. Nube de puntos correspondiente al árbol con código 495.

A nivel de árbol, la asimetría de la altura ha permitido constatar que la mayoría de los retornos en el caso de los árboles jóvenes proceden de la parte superior a la copa, ya que los valores son negativos. En el caso de los árboles maduros, la distribución de la asimetría ha obtenido mayor variabilidad. Por lo que esta variable, por si sola, no permitiría describir la forma de la copa y mucho menos diferenciar un árbol maduro de uno joven.

Los resultados de la asimetría a nivel de malla, por otro lado, han permitido identificar zonas de claros, al tratarse de áreas con una extensión suficiente y por debajo de la media de las alturas, donde el valor de la asimetría es positivo. En la zona de bosque más densa, predominan los valores negativos (Figura 26). Sin embargo, existen también valores positivos que indicarían una bajada de las alturas (la altura está por debajo de la media); estas zonas se corresponden a zonas de claros dentro del bosque adhesado. Esta diferencia entre los valores positivos y negativos, indica que la zona analizada no es completamente homogénea en cuanto a la distribución de las alturas.

4.3 Métricas de diversidad estructural horizontal:

Fracción de Cobertura Cubierta

Gracias al inventario, se conoce el número de árboles monumentales existentes en el rodal y su fracción de cobertura cubierta (FCC), además de la FCC de las zonas donde se ubican. Diferenciar las zonas de FCC de los árboles jóvenes y del arbolado compuesto por árboles residuales, permite realizar una aproximación a la fase de desarrollo de un rodal. Hay que considerar que un bosque maduro puede ser un bosque compuesto, a modo de mosaico, por rodales o bosquetes en diferentes fases y formar en conjunto una estructura heterogénea (Europarc-España, 2015).

En la fase de maduración, el bosque es diverso, tanto por la diversificación horizontal como vertical, y los árboles han alcanzado la altura máxima ($H_o > 85\% H_{max}$) considerada para la especie y el máximo en el ancho de copa (Europarc-España, 2020; LIFE RedBosques, 2018). Es por eso por lo que para este tipo de rodal los resultados de la FCC deberían de ser superiores al 30% en el caso del arbolado adulto y que la altura dominante en más del 85% de la zona sea cercana a la máxima para la altura de la especie.

En análisis a nivel de masa dio como resultado que el área de estudio estructuralmente heterogéneo: por un lado, existe un rodal con una FCC inferior al 50%, propio para el paisaje adhesado, situado al oeste del área de estudio. En el este, por el contrario, la media de la FCC es superior al 85% y la altura dominante es superior a los 12m (Figura 23 y Figura 17). El bosque adhesado, que se caracteriza por la baja densidad de árboles y una mayor presencia del estrato arbustivo, además de tener una FCC menor a la observada al este, tiene una altura dominante también inferior. No obstante, por el trabajo realizado en campo, sabemos que se trata de un bosque con ejemplares maduros, senescentes y árboles muertos en pie, por lo que los valores de la FCC y la altura dominante de esta zona no se podría tomar como referencia para un bosque maduro que no fuera adhesado.

Se puede concluir que la FCC junto con la altura dominante puede dar información sobre la dinámica realizar una aproximación teórica y esquemática del estado del ciclo silvogenético del rodal. En este caso, se considera que se trata de un bosque con una estructura horizontal diversa y en transición, ya que se pueden diferenciar dos rodales con diferentes características (FCC y H_o) y una zona de transición entre las dos.

En cuanto al análisis de la FCC a nivel de árbol, permitió estudiar y cuantificar la diferencia relativa existente entre los árboles maduros y jóvenes (Figura 14) respecto al contorno. Sin embargo, la falta de referencias bibliográficas en relación al estudio de la FCC a nivel de árbol y la limitación del área del contorno, no permite concluir que una FCC inferior en árboles maduros indique una copa con menor cobertura, ya que se tiene conocimiento de que los árboles maduros suelen tener más desarrollada la parte inferior de la copa.

Rugosidad y continuidad del perfil horizontal (dosel)

Se define la rugosidad como la diferencia de las alturas en el dosel y en la copa de los árboles. Las zonas con valores de CV más altos deberían de corresponder a zonas con árboles de diferentes alturas (tamaños y edades) y claros en el dosel. Los valores bajos, por el contrario, indicarían homogeneidad a lo largo del dosel (árboles de la misma altura, con un dosel continuo y uniforme). También, hay que considerar que las zonas de claros, suelos desnudos o zonas donde la FCC es inferior al 30%, pueden dar valores altos de CV, como se ha observado en el área de estudio (Figura 29) al tratarse de zonas donde el LiDAR penetra mejor (Figura 15).

Para evitar considerar estas zonas como rugosas y heterogéneas, se analizó por separado las zonas con una FCC superior al 85% y la zona de claros. La zona de bosque más densa (con una FCC alta) obtuvo valores de CV más bajos que el paisaje adhesionado, lo que se traduce a que existe menos rugosidad en el dosel y una mayor continuidad que la zona de bosque donde se encuentran los árboles maduros.

Por otro lado, las copas maduras muestran valores de rugosidad más altos en comparación a los ejemplares maduros. Se podría pensar, como se ha comentado unos párrafos más arriba, que el LiDAR haya penetrado mejor en estas copas, por lo que el resultado es que se muestra una mayor rugosidad en la copa, lo cual lo vuelve característico (Figura 16 y Figura 14).

Relacionado con la continuidad del dosel, otro indicador de la madurez de un bosque, son los “gaps” (claros) o aperturas que se generan en el dosel a causa de la mortalidad de árboles senescentes, y que permiten los procesos de regeneración (Europarc-España, 2020), por lo que cuantificar e identificar la presencia de estos gaps puede ser un trabajo interesante. Sin embargo, se ha visto que para que el LiDAR detecte esta apertura a una escala de 10x10m, deben tener una extensión superior a 100m² (mortalidad de varios pies en una misma zona, u otras causas naturales o artificiales). En estas zonas, donde la diferencia entre la copa de un árbol y el suelo es alta, el valor de la varianza puede ser de entre 15 y 20m².

Por el contrario, en la zona más adhesionada, predominan valores de varianza inferiores a los 4m², (Figura 24) ya que, a excepción de los árboles maduros, no existen elementos de gran altura. Este parámetro, por lo tanto, nos permitiría, por un lado, determinar en una zona de bosque densa los claros de cierta extensión, y por otro, zonas abiertas no vegetadas.

Curiosamente, en las zonas donde se observan los árboles maduros dispersos y aislados, los valores de varianza son muy altos. En pocas palabras, la varianza podría explicar el contraste de las alturas y aportar información a la continuidad del dosel.

Densidad de árboles y ejemplares excepcionales

Otro indicador de la madurez o de un estado de sucesión más avanzado es la presencia de árboles excepcionales o monumentales (GAN-NIK,2020; Europarc-España, 2020a). Según un estudio realizado por Percel y colaboradores (2018) la densidad de árboles maduros está ligada a la densidad de microhábitats que ocupan especies raras, por lo que conservar estos árboles ayudaría a conservar especies de escarabajos saproxílicos.

A pesar de que el modelo de segmentación de árboles permite obtener una aproximación de pies por hectárea, no se ha desarrollado una metodología que permita detectar únicamente los árboles monumentales, ni se han verificado los resultados del modelo TSM en campo. Sin embargo, de las métricas evaluadas, el CV de la altura puede ser una métrica candidata para ser explorada como variable explicativa para desarrollar un modelo de clasificación que permita identificar los árboles monumentales. Gracias al conteo de árboles monumentales realizado en campo (GAN-NIK, 2020) se puede obtener una aproximación de la proporción que suponen estos árboles respecto a la masa forestal.

Se observó que a partir del número de árboles generado del TSM, los árboles maduros suponen un 12% en la zona del bosque con FCC inferior al 70%, y un 5% en el caso del rodal en fase de regeneración (FCC de media de 85%).

5. Conclusión

El objetivo general del trabajo presente fue desarrollar una metodología basada en la extracción de métricas mediante teledetección LiDAR que permitiera identificar una zona potencialmente BAVE. Para ello, se analizaron a diferentes escalas las métricas forestales relacionadas con los criterios más característicos de una zona BAVE, y, por otro lado, se propuso una cadena de procesado para la obtención de métricas a nivel de árbol.

La obtención del modelo de segmentación del dosel (TSM) permitió la identificación de las copas de los árboles sobre la masa forestal, lo que permitió estimar la altura para cada pie detectado. Al trabajar con la unidad de árbol, se abrió la posibilidad de analizar las diferencias morfológicas de la copa a partir del estudio de las diferencias de alturas en los retornos de las copas, como, por ejemplo, el CV de las alturas o la FCC, que resultaron ser significativamente diferentes entre los dos tipos de árboles analizados.

En relación con el estudio de la masa forestal, determinar una escala adecuada para el análisis del terreno puede ser fundamental, ya que para un análisis de caracterización como el propuesto, resulta más adecuado la utilización de una escala más fina. En cambio, si se requiere trabajar a una escala del territorio más global, es más conveniente utilizar una unidad de hectárea, con el correspondiente hándicap que supone la pérdida de información. En este caso, procesar los datos LiDAR con una densidad de puntos alta (superior a 10 puntos/m²) y una unidad de celda de 0,01 hectáreas, ha permitido observar, mediante las diferentes métricas estudiadas, una variación en la configuración general del bosque. Con el respaldo de la información obtenida del inventario realizado en la zona (GAN-NIK, 2020), se puede afirmar que el área de estudio se trata de una zona heterogénea, por un lado, por la variabilidad en los valores de la fracción de cabida cubierta y en la altura dominante, así como en el resto de las métricas analizadas con relación a las alturas. Además, como se puede observar en los mapas del Anexo I, la diferencia de la proporción de retornos por estratos también incide en la idea de la diversidad estructural horizontal y vertical que caracteriza el bosque, que se encuentra en evolución y desarrollo de diferentes fases del ciclo silvogenético.

No obstante, a las métricas analizadas habría que añadir una serie de filtros o pasos previos de selección para prevenir la caracterización de una zona rugosa como suelo desnudo, un bosque mixto o intervenido, u otro tipo de superficie con una alta variabilidad en las alturas como una zona estructuralmente diversa o heterogénea de interés BAVE. Se podría proponer, por tanto, combinar la metodología propuesta con otras herramientas que permitan discriminar árboles por especie, filtrar las zonas por el porcentaje de FCC o utilizar la superposición de otras fuentes de información geográfica, como inventarios forestales y zonas de hábitats de interés. Además, resultaría conveniente realizar una segunda caracterización de un BAVE potencial para comparar y validar los resultados obtenidos en el presente trabajo, aplicar mejoras en la cadena de procesado, desarrollar una ecuación que permita estimar a nivel de árbol el DAP, para así dar un paso más hacia la propuesta de un índice BAVE compuesto y una estandarización del rango de valores de las métricas analizadas.

Por último, y en relación a las futuras líneas de trabajo, se incide en la idea de que la información obtenida mediante LiDAR es limitada, y que ésta se debería de considerar como una herramienta complementaria a los datos obtenidos en campo y a otra información geográfica, como, por ejemplo, el tipo de hábitats, inventarios (fauna, flora, forestales, bosques singulares...), imágenes satelitales u otro tipo de información relacionada con los criterios BAVE mencionados en la introducción. Por lo tanto, la metodología basada en la identificación mediante teledetección LiDAR pretende acelerar y servir de apoyo en el proceso de selección de zonas potencialmente BAVEs, y no tiene por fin sustituir la realización de muestreos en campo, ni tampoco evitar las posibles visitas a las zonas para la realización de validación de los datos.

6. Bibliografía

- Álvaro Hernández Jiménez. (18 de octubre de 2017). *Los bosques maduros: características y valor de conservación*[presentación].Life Red Bosques. Jornada de Biodiversitat dels boscos madurs. Roquetes,España. <https://bit.ly/2WX1cM0>
- ARCGIS Desktop. (s.f.) *Usar LiDAR en ARCGis*. Recuperado el 5 de septiembre de 2021 de <https://bit.ly/3BR8csB>
- Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Queinnec, M., Luther, J. E., Bolton, D. K., White, J. C., Wulder, M. A., van Lier, O. R., & Hermosilla, T. (2021). Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. *Remote Sensing of Environment*, (260). 112477. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112477>
- EUROPARC-España. (2020b). *Red de Rodales de Referencia* [Manual técnico]. Serie de manuales EUROPARC-España Ed. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid. Disponible en <https://bit.ly/3kZ7nY3>
- EUROPARC-España (2015). El papel de los bosques maduros en la conservación de la biodiversidad. Grupo de Conservación de EUROPARC-España. Disponible en <https://bit.ly/3A1kEFC>
- FAO. (2004). *Inventario forestal nacional. Manual de campo*. (Documento de trabajo 94/S). Programa de Evaluación de los Recursos Forestales, Departamento de Montes. <http://www.fao.org/3/ae578s/ae578s.pdf>
- García, A. (2020). Estimación del estado de conservación de robledales de la red Natura 2000 a partir de datos Lidar de fotón único [Trabajo de fin de máster]. Universidad de Zaragoza.
- GEIE FORESPIR. (s.f.). *CONNECTFOR, Caracterización y preservación de los espacios forestales de Alto Valor Ecológico (AVE) y de su conectividad ecológica*. Recuperado el 5 de septiembre de 2021, de <https://www.foespir.com/conectfor> <https://bit.ly/3tklo6y>
- Gestión Ambiental de Navarra S.A./Nafarroako Ingurumen Kudeaketa S.A (GAN-NIK). (2020). *Identificación y caracterización arbolado antiguo monumental en un bosque comunal y propuesta de gestión y seguimiento* (ConcejoBeasoain-Eguíllor).[Informe no público]. Departamento de Biodiversidad de GAN-NIK
- Gobierno de Navarra. (2020). *CONNECTFOR-Formulario de candidatura 2º convocatoria de proyectos* [manuscrito inédito]. Departamento de Biodiversidad de la Gestión Ambiental de Navarra S.A(GAN-NIK)
- Gobierno de Navarra.(s.f.):Leeme.txt.[nota técnica]. Recuperado el 5 de septiembre de 2021
- GREEN. (s.f.). El proyecto GREEN [Página web del proyecto]. Recuperado el 28 de julio de 2021, de <https://www.green-biodiv.eu/proyecto>
- Harvey-Brown, Y.(2017).*Quercus pubescens. The IUCN Red List of Threatened Species*.Recuperado el 5 de septiembre del 2021. <https://www.iucnredlist.org/species/194223/80567733>
- hazi.(s.f.). *CONNECTFOR – Caracterización y preservación de espacios forestales de alto valor ecológico y de su conectividad ecológica*. Recuperado el 5 de septiembre de 2021, de <https://bit.ly/3DZ8ksa>

- IGN. (s.f.). *Tecnología LiDAR.PNOA*. Recuperado el 5 de septiembre de 2021 de <https://pnoa.ign.es/caracteristicas-generales>
- Infraestructura de Datos de Navarra (IDENA)(2019). Modelo Digital del Terreno (MDT) procedente de Lidar. Resolución 2 metros. [Mapa]Recuperado el 5 de septiembre de 2021, de <https://bit.ly/3zV4IFd>
- Infraestructura de Datos de Navarra (IDENA). (2021). Servicios:Web Map Service (WMS).[Conjunto de datos]. Recuperado de <https://idena.navarra.es/portal/servicios>. <https://idena.navarra.es/ogc/wfs?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=WMS>
- Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA).(2019). Mapa de cultivos y aprovechamientos de Navarra (2019), [Mapa]. Recuperado el 5 de septiembre de 2021, de <https://bit.ly/3tk7eSP>
- Instituto Geográfico Nacional,IGN.(s.f.).LiDAR 2º cobertura [conjunto de datos] . Recuperado el 5 de septiembre del 2021 de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>
- IUCN. (2021a). Taking the Bonn Challenge to Rio. [Nota Informativa] Recuperado el 5 de septiembre de 2021 de <https://bit.ly/3l36MEV>
- IUCN. (2021b).*Forest and climate change*. Recuperado el 5 de septiembre de 2021 de <https://www.iucn.org/es/node/28717> (a)
- Joanne C. White, Nicholas C. Coops, Michael A. Wulder, Mikko Vastaranta,Thomas Hilker & Piotr Tompalski (2016). Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42:5, 619-641, <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>
- LIFE RedBosques.(2018). *Manual de campo para la identificación de rodales de referencia. Fase II: Identificación mediante parcelas* [Manual de campo]. Fundación González Bernáldez, Madrid. Proyecto LIFE Redcapacita_2015. Deliverable B3.2. 53 pp.
- Leica Geosystems AG.(s.f.). Leica SPL100 Single Photon LiDAR Sensor. Recuperado el 5 de septiembre de 2021 de <https://bit.ly/3zMuBXr>
- Li, X., Liu, C., Wang, Z., Xie, X., Li, D., & Xu, L. (2020). Airborne LiDAR: state-of-the-art of system design, technology and application. *Measurement Science and Technology*, 32(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc867>
- Martínez, S. L., Carlos, J., Manrique, O., Rodríguez-cuenca, B., & González, E. (2015). Procesado y distribución de nubes de puntos en el proyecto PNOA-LiDAR. 2015(1),1–4. Disponible en <https://bit.ly/3h7vtil>
- Mcgaughey, R. J. (2021). *FUSION / LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization (4.20)*. United States Department of Agriculture. Disponible en <https://bit.ly/3yPnZGo>
- MEDFORVAL. (s.f.).*MEDFORVAL,High ecological value Mediterranean forest network*. Recuperado el 28 de julio de 2021, de <http://medforval.aifm.org/en/high-ecological-value>
- Nelson, R. (2013). How did we get here? An early history of forestry lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(1). <https://doi.org/10.5589/m13-011>
- Percel, G., Parmain, G., Laroche, F., & Bouget, C. (2018). The larger, the better? Effects of delayed diameter-limit cutting on old-growth attributes and saproxylic beetle diversity in

- temperate oak forests. *European Journal of Forest Research*, 137(2), 237–249.
<https://doi.org/10.1007/s10342-018-1103-6>
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003). Estimating plot-level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1–3), 71–95. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00121-7)
- Sánchez Alberola, J., Oliver, P., Estornell, J., & Dopazo, C. (2018). Estimación De Variables Forestales De *Pinus Sylvestris* L. En El Contexto De Un Inventario Forestal Aplicando Tecnología Lidar Aeroportada. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 79–99. <https://doi.org/10.21138/gf.509>
- Sarasa, A. (2021). *Informe sobre el estado y valor ecológico de los robles en el bosque comunal del concejo de Beasoáin-Egillor* [Trabajo de fin de grado]. Universidad del País Vasco (UPV-EHU).
- Segú, J. (2018). Predicción de variables dasométricas del Inventario Forestal Nacional mediante datos LIDAR con técnicas de minería de datos [Trabajo de fin de grado]. Universidad Pública de Navarra (UPNA).
- Serrada, R., & San Miguel Ayanz, A. (2008). Selvicultura en dehesa. *Compendio de Selvicultura Aplicada en España*. 861–876. Disponible en <https://bit.ly/3ha15DN>
- Tracasa Instrumental SL. (2017). ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PNOA ADAPTADAS A NAVARRA PARA VUELO LiDAR 2017[Especificaciones técnicas] (1–8). Disponible en <https://bit.ly/2WZ2INQ>
- Tugay Demiraslan. (2019). Estimation of BHD using tree variables derived from aerial LiDAR for Ford Forest, Baraga, Michigan[Tesis del máster]. Michigan Technological University. <https://digitalcommons.mtu.edu/etdr/721>
- White, J. C., Woods, M., Krahn, T., Pappasodoro, C., Bélanger, D., Onafrychuk, C., & Sinclair, I. (2021). Evaluating the capacity of single photon lidar for terrain characterization under a range of forest conditions. *Remote Sensing of Environment*, 252 (July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112169>
- WWF. (2021). *Bosques con Alto Valor de Conservación: El Concepto en teoría y práctica*. www.hcvnetwork.org Disponible en <https://bit.ly/3jOgR9i>
- Álvaro Huarte Sanz, (20-30 de Mayo, 2019). *Clasificación de la Cobertura LiDAR 2017 de Navarra con Inteligencia Artificial y herramientas Open-source* [presentación] Universitat de Girona. Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció (UdG SITGE). Jornadas SIG libre 2019, Girona, España.
- EUROPARC-España. (2020a). *Bosques maduros mediterráneos: características y criterios de gestión en áreas protegidas*. Manual 14 Serie de manuales EUROPARC-España . Disponible en <https://bit.ly/3BLmfjr>



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

*Estimación y análisis de parámetros indicativos de un
Bosque de Alto Valor Ecológico (BAVE) de Quercus
pubescens mediante datos LiDAR*

ANEXO I

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
UNIBERTSITATE MASTERRA INFORMAZIO GEOGRAFIKOKO SISTEMETAN ETA TELEDETEKZIOAN

Esquema de los algoritmos y parámetros utilizados para la obtención de las métricas

Tabla 1 Esquema de la metodología propuesta para la obtención de las métricas a nivel de malla. Los comandos repetidos se pueden omitir si se usan en líneas previas.

Esquema del batch para la obtención de las métricas a nivel de malla										
Información para el filtrado										
C:\LASTools\bin\lasinfo	-i	directorio fichero .las	-histo intensity			-o	direccion salida txt informativo			
Filtrado de la nube										
C:\LASTools\bin\las2las	-i	directorio fichero .las	-drop_intensity_below			-odir	extensión del nombre (.las) filtrado			
Obtención del MDT										
c:\FUSION\GroundFilter	/ignore overlap	/class	/extent	directorio archivo salida	tamaño celda	directorio archivo(s) de entrada				
c:\FUSION\GridSurfaceCreate		/class	/gridxy	directorio archivo salida	tamaño celda	xyunits zunits coordsys zone horizdatum vertdatum	directorio archivo(s) de entrada			
Obtención de las métrica de la malla										
c:\FUSION\GridMetrics	/ignore overlap	/class	/gridxy	/outlier	/minht /above	dirección MDT	heightbreak	tamaño celda	dirección de archivo de salida	dirección de archivo de entrada (.las)

Tabla 2. Esquema de la metodología propuesta para la obtención de las métricas a nivel de árbol. Los comandos repetidos se pueden omitir si se utilizan en líneas previas.

Esquema del batch para la obtención de las métricas a nivel de árbol										
Información para el filtrado										
C:\LASTools\bin\lasinfo	-i	directorio fichero .las	-histo intensity			-o	directorio salida txt informativo			
Filtrado de la nube										
C:\LASTools\bin\las2las	-i	directorio fichero .las	-drop_intensity_below			-odir	extensión del nombre (.las) filtrado			
Obtención del MDT										
c:\FUSION\GroundFilter	/ignore overlap	/class	/extent	directorio archivo salida	tamaño celda	directorio archivo(s) de entrada				
c:\FUSION\GridSurfaceCreate		/class	/gridxy	directorio archivo salida	tamaño celda	xyunits zunits coordsys zone horizdatum vertdatum	directorio archivo(s) de entrada			
Normalización de las alturas										
c:\FUSION\ClipData	/shape	/ground	directorio fichero mdt	/zmin	/zmax	/height	directorio archivo(s) de entrada	directorio archivo salida	extensión del área de recorte (coordenadas limitantes)	
Recorte por los polígonos										
c:\LASTOOLS\bin\lasclip	-i	directorio fichero .las	-poly	directorio ficheros (sph)	-odir	directorio archivo de salida	-o	extensión del nombre (.las)	-v	
Obtención de las métricas de cada árbol										
c:\FUSION\CloudMetrics	/new	/pa	/id	/minht	/outlier	/strata	directorio ficheros .las	directorio fichero (csv) salida		

Métricas consideradas de interés para la caracterización de un BAVE y obtenidas a partir de los algoritmos CloudMetrics y GridMetrics

Tabla 3. Lista de las métricas de elevación más importantes extraídas del análisis en FUSION

Métricas obtenidas en CloudMetrics y GridMetrics	
Elev maximum	Altura máxima
Elev mean	Altura media
Elev median	Altura mediana (percentil 50)
Elev mode	Moda de la altura
Elev stddev	Desviación estándar de la altura
Elev variance	Varianza de la altura
Elev CV	Coficiente de variación de la altura
Return.X.count.above.	Recuento de retornos por número de retorno (soporta hasta 9 retornos discretos) sobre la altura determinada
Elev Skewness	Asimetría de las alturas
Elev Kurtosis	Curtosis o apuntamiento de las alturas
Elev.P(1,5,...95,99)	Valores de percentil (percentiles de 1,5,...95,99)
Canopy Relief Ratio	Ratio de compensación del dosel
Return.1.count.above	Total de primeros retornos por encima de la altura determinada
Total.return.count.above	Total de todos los retornos por encima de la altura determinada
All.returns.above.mean	Todos primeros retornos por encima de la altura media
Percentage.first.returns.above.mean	Porcentaje de todos los retornos por encima de la altura determinada
Percentage.first.returns.above	Porcentaje primeros retornos sobre la altura determinada (FCC).

*NOTA: La altura determinada es el *heightbreak* (#) utilizado al computar el comando

Resumen de los resultados obtenidos de las métricas consideradas de interés para la caracterización de un BAVE y obtenidas a partir de los algoritmos CloudMetrics y GridMetrics

Tabla 4. Resultado de las métricas utilizadas en el análisis obtenidas de FUSION (CloudMetrics & GridMetrics)

<u>métricas</u>	<u>Escala</u>	<u>Unidad de medida</u>	<u>Resultados</u>				
			<u>Min</u>	<u>Median</u>	<u>Mean</u>	<u>Max</u>	<u>sd</u>
Altura máxima	Árbol	<u>Joven</u>	7,20	14,19	14,15	21,52	3,03
		<u>Maduro</u>	6,96	12,31	12,34	17,11	2,04
Altura media	Árbol	<u>Joven</u>	4,45	10,96	10,59	17,22	2,07
		<u>Maduro</u>	3,35	8,20	8,12	13,45	3,06
	Malla	<u>Hectárea</u>	2,88	8,67	9,10	15,80	3,07
		<u>0,01 hectárea</u>	1,57	9,56	9,51	19,85	3,40
Varianza de la altura	Árbol	<u>Joven</u>	1,44	4,62	5,25	21,31	3,12
		<u>Maduro</u>	2,32	6,12	6,53	20,15	2,86
	Malla	<u>Hectárea</u>	2,70	9,13	9,57	19,32	3,76
		<u>0,01 hectárea</u>	0,91	5,46	6,67	49,46	4,40
Skewness de la altura	Árbol	<u>Joven</u>	-5,09	-2,15	-2,16	-0,02	1,03
		<u>Maduro</u>	-2,60	-1,14	-1,12	1,21	0,66
	Malla	<u>Hectárea</u>	-1,92	-0,55	-0,60	0,61	0,64
		<u>0,01 hectárea</u>	-4,69	-1,68	-1,56	2,72	1,11
Fracción de Cobertura	Árbol	<u>Joven</u>	26,55	82,26	79,17	85,59	12,95
		<u>Maduro</u>	9,81	75,68	69,22	81,08	19,72
	Malla	<u>Hectárea</u>	15,20	72,22	87,02	81,27	99,74
		<u>0,01 hectárea</u>	0,50	89,68	77,53	99,38	23,77
Coeficiente de variación de la altura	Árbol	<u>Joven</u>	0,09	0,22	0,23	0,58	0,08
		<u>Maduro</u>	0,15	0,32	0,33	0,64	0,10
	Malla	<u>Hectárea</u>	0,14	0,36	0,37	0,65	0,14
		<u>0,01 hectárea</u>	0,09	0,25	0,29	1,33	0,14

Representación de la proporción de retornos de la zona de estudio por estratos

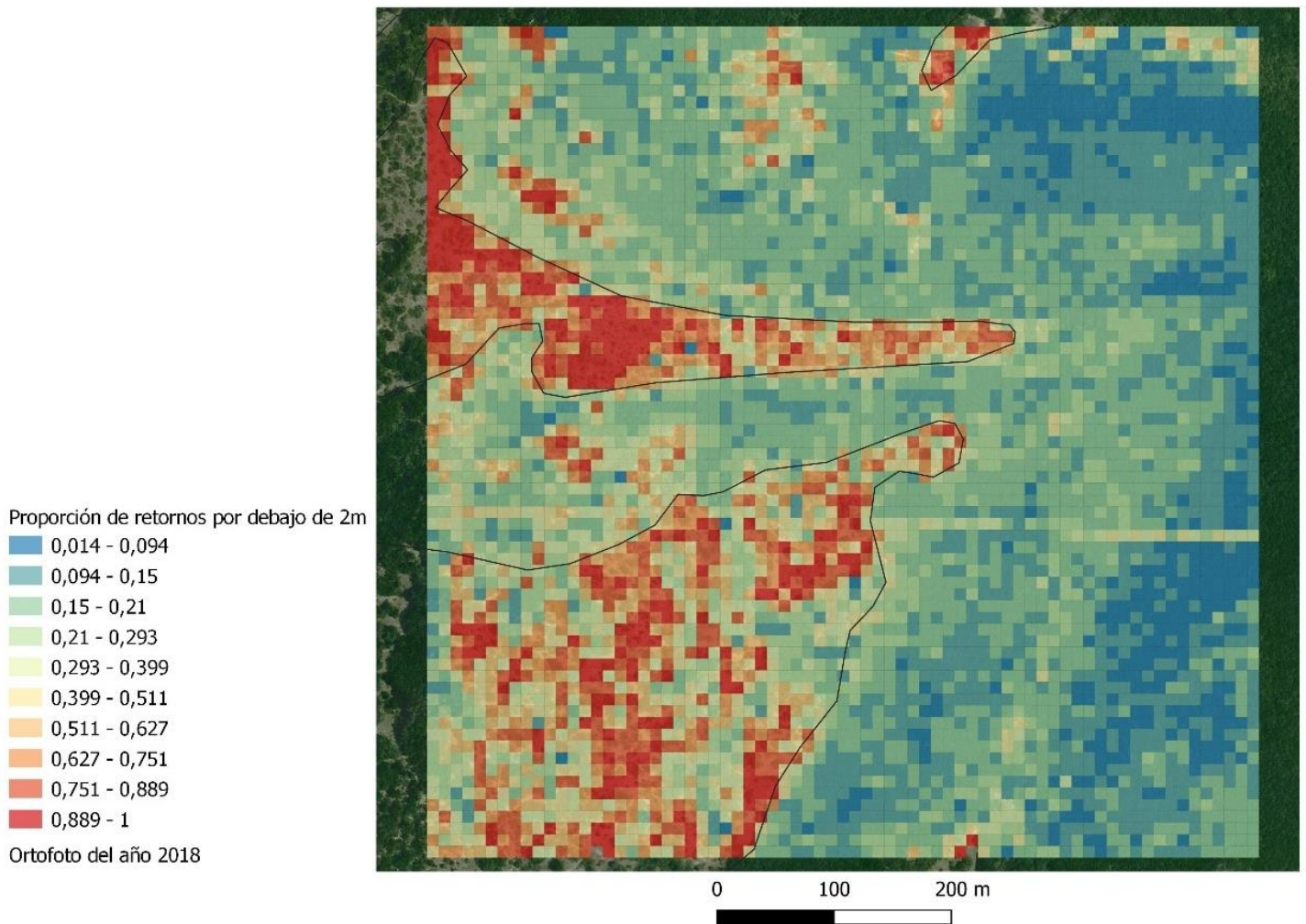
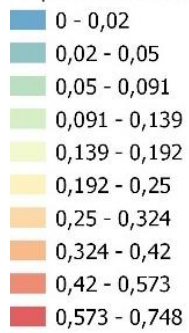


Figura 1. Representación de la proporción de retornos en la zona de estudio por debajo de los 2m. Las líneas negras separan la clasificación realizada por la ocupación del suelo (IDENA, 2019).

Proporción de retornos entre 2-5 m



Ortofoto del año 2018

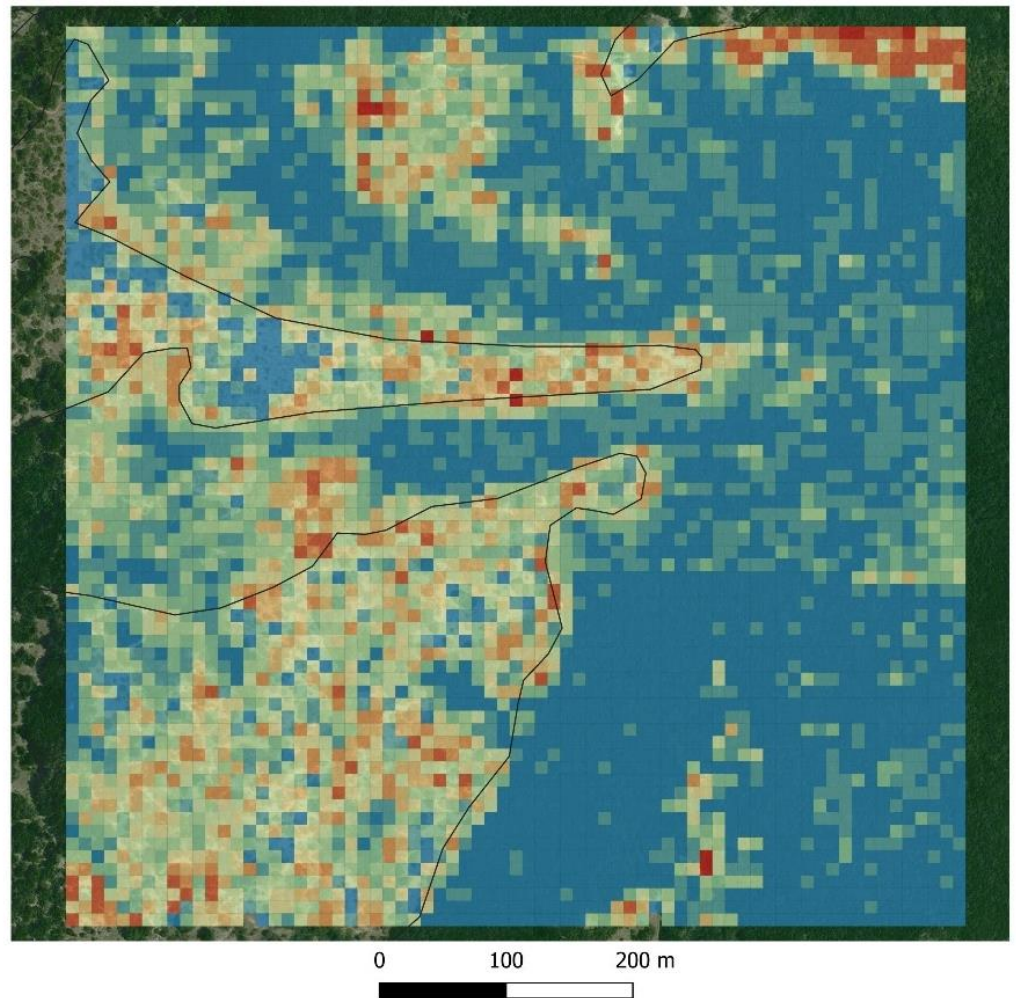


Figura 2. Representación de la proporción de retornos entre 2-5m para la zona de estudio. Las líneas negras separan la clasificación realizada por la ocupación del suelo (IDENA, 2019).

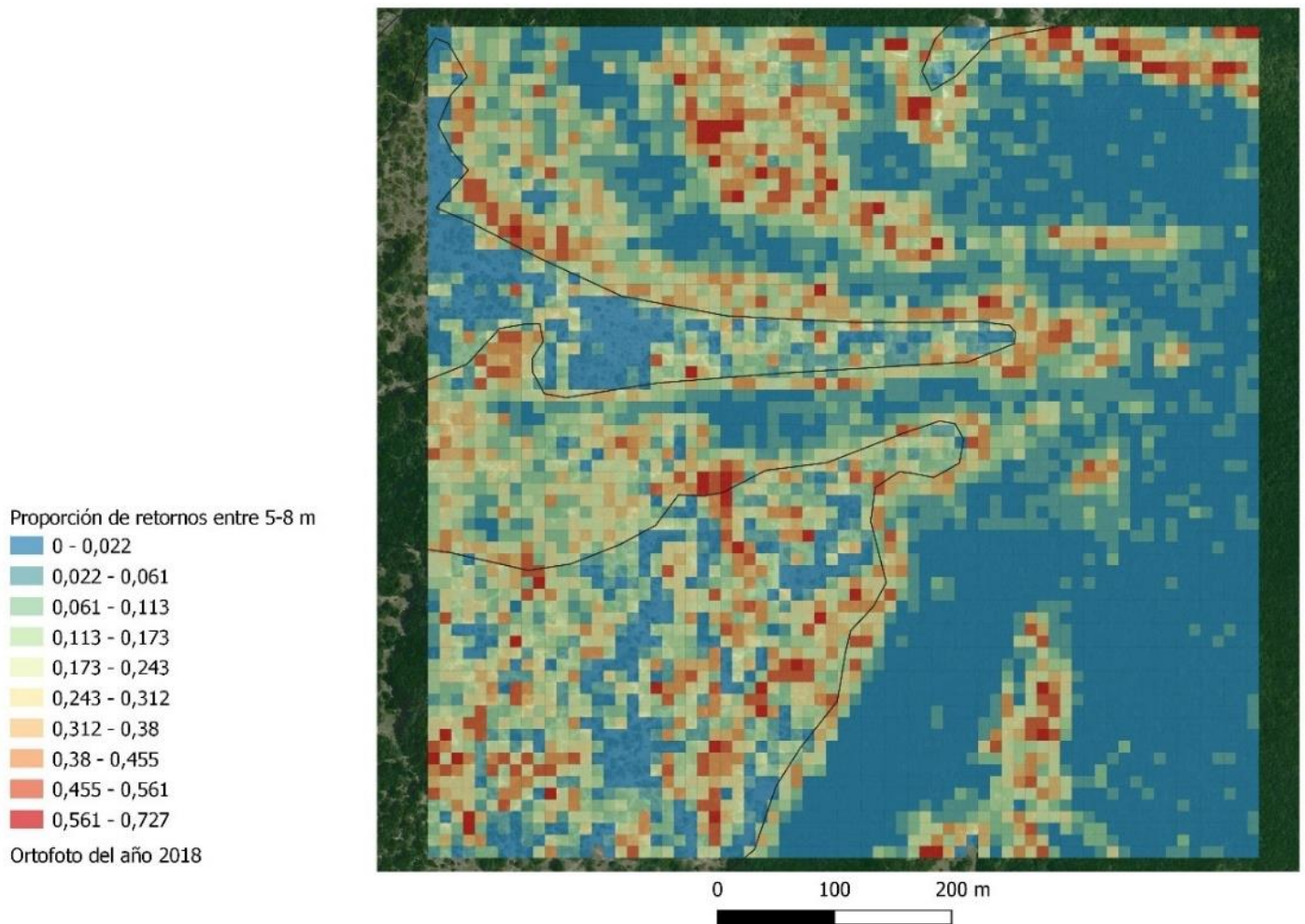
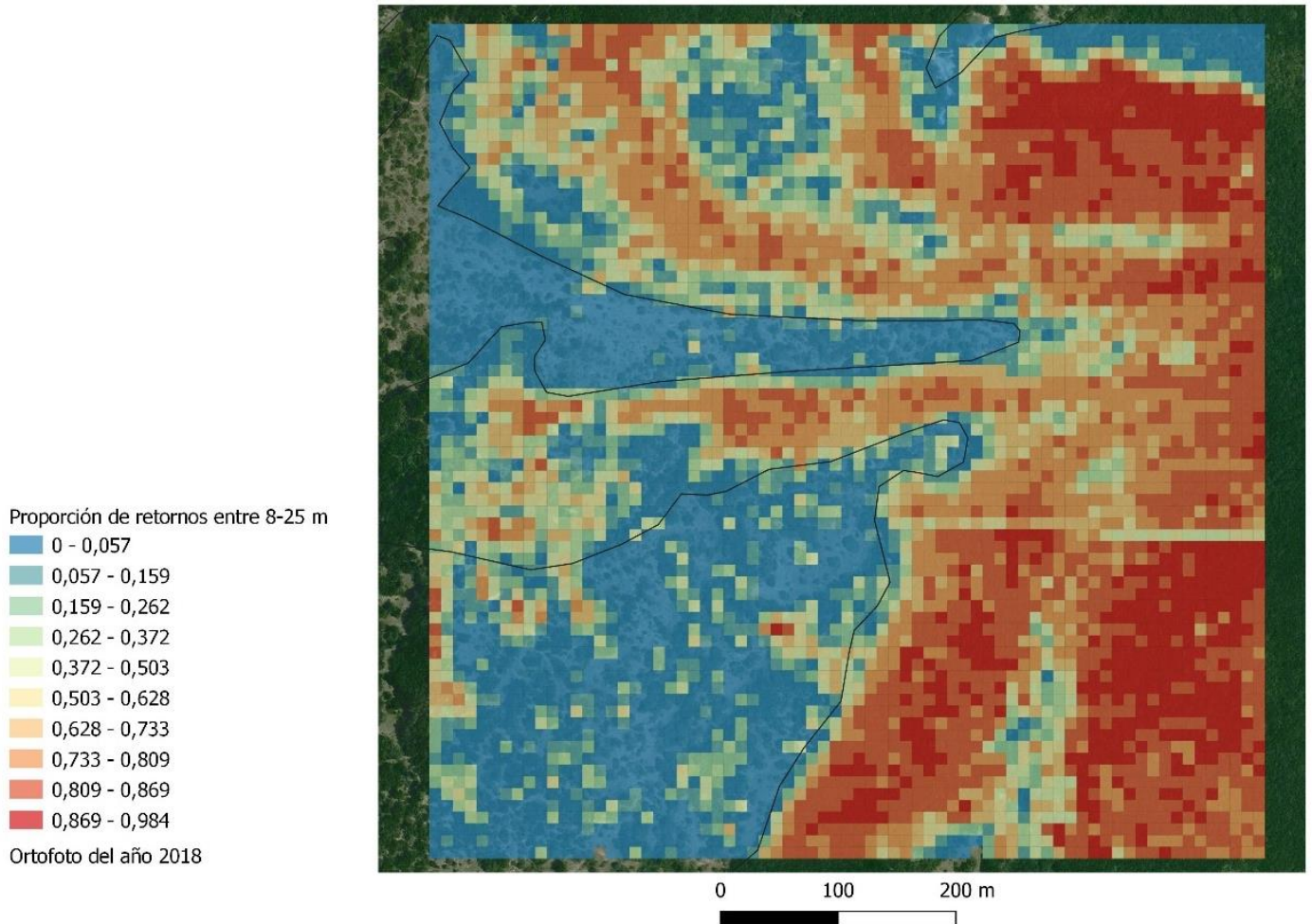


Figura 3. Representación de la proporción de retornos entre 5-8m para la zona de estudio. Las líneas negras separan la clasificación realizada por la ocupación del suelo (IDENA, 2019).

Figura 4. Representación de la proporción de retornos en la zona de estudio por encima de los 8m. Las líneas negras separan la clasificación realizada por la ocupación del suelo (IDENA, 2019).



Listado de acrónimos

AGL: Sobre el nivel del suelo

AVE: Alto valor ecológico

BAVE: Bosque de alto valor ecológico

CHM: Modelo de dosel

CONNECTFOR: Caracterización y preservación de los bosques de alto valor ecológico (BAVE) y su conectividad ecológica

CRL: Ratio de compensación del dosel

CSV: Archivo de texto separado por comas

DAP: Diámetro a la altura del pecho

FCC: Fracción de Cobertura Cubierta

GML: Geiger-mode LiDAR

Ho: Altura dominante

MDT: Modelo digital del terreno

MEDFORVAL: High ecological value Mediterranean forests network

P95 y P90: Percentiles de 90 y 95

RMSE: Error cuadrático medio

Sistema INS: Sistema de navegación inercial

Sistemas GNSS: Sistema global de navegación por satélite

SPL: Lidar de fotón único

TSM: Modelo de segmentación de árbol (dosel)

WMS: Web Map Service

Bibliografía del anexo

Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra (IDENA) (2019). Mapa de cultivos y aprovechamientos de Navarra (2019) [Mapa]. Obtenido el 25 de junio de 2021 desde <https://bit.ly/3tk7eSP>