



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

APLICACIÓN DE DATOS LIDAR AL COMBATE EN BOSQUE

Ignacio Pros Jiménez

Director académico: Antonio Luis Montealegre Gracia

Director militar: José Antonio Lopera Martín

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2021



Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer la posibilidad de desarrollar el presente proyecto al Batallón de Infantería Protegida 'Toledo' II/3, a todos sus componentes en general y en especial a la 3ª Compañía "Pantera", por facilitarme los medios necesarios para la realización de las prácticas en el campo de maniobras.

En segundo lugar, agradecer a todos los cuadros de mando de la compañía y en particular al Capitán D. José Antonio Lopera Martín y al teniente D. Diego Cuesta Hernández, su implicación y entrega facilitándome la información y material necesarios para la adecuada orientación del proyecto.

Finalmente, agradecer al Doctor D. Antonio Luis Montealegre Gracia, director académico de este trabajo, su constante seguimiento y asesoramiento durante el desarrollo del mismo. Sus consejos, indicaciones y correcciones han sido imprescindibles para la correcta realización del proyecto.



RESUMEN

Debido a la complejidad de las operaciones militares, el planeamiento y la conducción de las mismas debe realizarse meticulosamente y apoyándose en todos los medios disponibles. El terreno en el que se realicen dichas operaciones es uno de los factores clave para el desarrollo de las mismas, puesto que delimita dónde y cómo se llevarán a cabo. Por ello, para su correcto estudio es necesario el empleo de mapas cartográficos, fotografías aéreas o modelos digitales del terreno, que proporcionen una visión, lo más cercana posible, a la realidad en la que las unidades se encontrarán a la hora de llevar a cabo las operaciones sobre el terreno.

En el combate en bosque, la necesidad de conocer las características del terreno, así como la frondosidad y distribución de la vegetación es de vital importancia. Para el correcto planeamiento y conducción de operaciones en terreno boscoso no es suficiente el uso de fotos aéreas o mapas topográficos, es necesaria una herramienta que permita a las unidades conocer la transitabilidad y la visibilidad en este tipo de áreas. Es por ello que surge la necesidad de dotar a las unidades del Ejército de Tierra de herramientas como datos LiDAR que permitan complementar la visión y el análisis del terreno.

Mediante el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio y desarrollo de datos LiDAR que permitan conocer la distribución y frondosidad de la vegetación de una zona determinada, ofreciendo la posibilidad de estudiar la visibilidad y transitabilidad del terreno. De este modo se favorece la toma de decisiones en acciones como adoptar un adecuado despliegue, establecer puestos de observación apropiados, o localizar el lugar idóneo para un asentamiento. En este caso la zona de estudio ha sido el campo de maniobras y tiro del Acuartelamiento Cabo Noval (Siero, Asturias) donde se realizaron las prácticas externas.

El desarrollo del proyecto se ha efectuado con el apoyo de programas como FUSION, LiDAR Converter o Carta Digital, entre otros. Con el empleo de estos programas se han transformado los datos LiDAR obtenidos inicialmente en capas que muestran el porcentaje de cubrimiento del suelo por la vegetación, así como las distintas situaciones que se pueden encontrar en la zona en base a un criterio estructural que se ha determinado. El resultado final del proyecto es una única capa ráster en la que se muestra la combinación de los tres tipos de estratos de acuerdo a su porcentaje de cubrimiento.

El resultado obtenido del proyecto se ha considerado como satisfactorio, ya que se ha conseguido cumplir con el objetivo principal marcado inicialmente, que era implementar el uso de datos LiDAR al combate en bosque. El resultado de una capa ráster que da a conocer la transitabilidad y visibilidad de una zona concreta, es un avance para el correcto desarrollo de operaciones en terreno boscoso.

Palabras clave

LiDAR, SIG, cubrimiento vegetal, transitabilidad, visibilidad.



ABSTRACT

Due to the complexity of military operations, the planning and conduct of such operations must be meticulously carried out, relying on all available means. The terrain in which these operations are carried out is one of the key factors for their development, since it delimits where and how they will be carried out. Therefore, for a correct study it is necessary to use cartographic maps, aerial photographs or digital terrain models that provide a vision, as close as possible, to the reality in which the units will find themselves when carrying out the operations on the ground.

In forest combat, the need to know the characteristics of the terrain, as well as the lushness and distribution of the vegetation is of vital importance. For the correct planning and conduct of operations in wooded terrain, the use of aerial photos or topographic maps is not enough; it is necessary to have a tool that allows the units to know the trafficability and visibility in this type of areas. That is why the need arises to provide the Army units with tools such as LiDAR data to complement the vision and analysis of the terrain.

The present work has been carried out a study and development of LiDAR data that allow to know the distribution and lushness of the vegetation of a given area, offering the possibility of studying the visibility and trafficability of the terrain. In this way, decision making is favored in actions such as adopting an adequate deployment, establishing appropriate observation posts, or locating the ideal place for a settlement. In this case, the study area was the maneuver and firing range of the Cabo Noval barracks (Siero, Asturias) where the external practices were carried out.

The development of the project has been carried out with the support of programs such as FUSION, LiDAR converter or Carta Digital, among others. With the use of these programs the LiDAR data initially obtained have been transformed into layers that show the percentage of ground cover by vegetation, as well as the different situations that can be found in the area based on a structural criterion that has been determined. The final result of the project is a single raster layer showing the combination of the three types of strata according to their percentage of cover.

The result obtained from the project has been considered as satisfactory, since it has achieved the objectives initially set, which were to implement the use of LiDAR data in forest combat. The result of a raster layer that shows the trafficability and visibility of a specific area, is an advance for the correct development of operations in forest terrain.

KEYWORDS

LiDAR, GIS, vegetation coverage, transitability, visibility,



INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
Palabras clave.....	4
ABSTRACT.....	5
KEYWORDS.....	5
INDICE DE FIGURAS.....	3
INDICE DE TABLAS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	6
2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	7
2.2. METODOLOGÍA.....	7
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	8
3.1. LOS BOSQUES Y LOS CONFLICTOS ARMADOS.....	8
3.2. EL COMBATE EN BOSQUE: FACTORES CONDICIONANTES Y TÁCTICAS, TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS.....	11
3.3. LAS TECNOLOGÍAS DE TELEDETECCIÓN AL SERVICIO DEL COMBATE EN BOSQUE: EL LiDAR AEROPORTADO.....	15
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	17
4.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	17
4.2. DATOS LiDAR-PNOA Y PRE-TRATAMIENTOS DE LAS NUBES DE PUNTOS	21
4.3. GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE SUPERFICIES.....	23
4.4. CÁLCULO DE LAS MÉTRICAS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ALTURAS DE LOS RETORNOS LÁSER.....	27
4.5. ANÁLISIS SIG PARA OBTENER UNA CARTOGRAFÍA DE LOS ESTRATOS Y DE LA DENSIDAD VEGETAL.....	30



4.6. IMPLEMENTACIÓN EN APLICACIONES TÁCTICAS	37
5. CONCLUSIONES.....	37
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución mundial de bosques que muestra los diez países con la mayor superficie forestal (millones de hectáreas y porcentaje de bosques del mundo). Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).	8
Figura 2 Superficie forestal mundial por zona climática. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).	9
Figura 3 Bosques por zona ecológica mundial. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).	9
Figura 4 Índice de densidad de superficie forestal en 2015. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).	10
Figura 5 Maniobras de la BRILAT en combate en bosque. Fuente: Fuerza Terrestre.	12
Figura 6 Patrones de escaneo. Fuente: GEOCOM.	16
Figura 7 Clasificación de puntos. Fuente Plan Nacional de Ortografía Aérea.	17
Figura 8 Ubicación Acuartelamiento Cabo Noval. Elaboración propia.	18
Figura 9 Localización del área de estudio. El recuadro de color rojo indica la extensión del archivo de datos LiDAR-PNOA (2 x 2 km). Fuente: Descargas CNIG. Servicio WMS IGN Ortofotos PNOA máxima actualidad. Sistema de referencia: ETRS89 UTM H30.	18
Figura 10 Paisaje forestal de la zona de estudio. Fuente: Google maps street view.	19
Figura 11 Paisaje vegetal de la zona central de Asturias (Subsector Ovetense) Fuente: Díaz y Fernández (1994).	20
Figura 12 Coberturas LiDAR-PNOA publicadas. Fuente: (PNOA LiDAR, 2009).	21
Figura 13 Entrada de fichero LAZ en el programa LiDAR Converter. Elaboración propia.	23
Figura 14 Salida de fichero LAS en el programa LiDAR Converter. Elaboración propia.	23
Figura 15 Obtención de nMDS. Elaboración propia.	25
Figura 16 Visualización MDE con sombreado. Elaboración propia.	26
Figura 17 Visualización nMDS. Elaboración propia.	27
Figura 18 Métricas de densidad .dtm. Elaboración propia	29
Figura 19 Métricas de densidad .asc. Elaboración propia.	29
Figura 20 Densidad de 0 a 0,5 m. Elaboración propia	29
Figura 21 Densidad de 0,5 a 3 m. Elaboración propia	30
Figura 22 Densidad de 3 a 60 m. Elaboración propia	30
Figura 23 Consulta matricial Clasificación. Elaboración propia	32
Figura 24 Herbáceo. Elaboración propia.	32
Figura 25 Arbustivo. Elaboración propia.	33
Figura 26 Arbolado. Elaboración propia.	33
Figura 27 Consulta matricial para combinar las capas ráster. Elaboración propia.	34
Figura 28 Capa ráster de frondosidad de la vegetación. Elaboración propia.	34
Figura 29 Selección de área en Frugoviewer. Elaboración propia.	36
Figura 30 Visualización 3D. Elaboración propia.	36
Figura 31 Visualización 2D. Elaboración propia.	36
Figura 32 Implementación capa ráster en Carta Digital. Elaboración propia.	37



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Limitaciones individuales, de movimiento y de mando y control en zonas boscosas. Fuente: BIP 'Toledo' II/3.	15
Tabla 2 Tipos de bosque según frondosidad y capacidades que permiten. Fuente: BIP 'Toledo' II/3.	15
Tabla 3 Usos del suelo de la zona de estudio según el Mapa Forestal de España. Fuente: MITECO	19
Tabla 4 Leyenda paisaje vegetal de la zona central de Asturias. Fuente: Díaz y Fernández (1994).	21
Tabla 5 Especificaciones Técnicas para la realización del vuelo LiDAR. Fuente: IGN	22
Tabla 6 Código MDS. Elaboración propia.	24
Tabla 7 Código MDE. Elaboración propia.	25
Tabla 8 Código nMDS. Elaboración propia.	26
Tabla 9 Clasificación por estratos según Ibarra y Yetano (1989).	28
Tabla 10 Clasificación por estratos de la zona de estudio. Elaboración propia.	28
Tabla 11 Código métricas de densidad. Elaboración propia.	29
Tabla 12 Porcentaje de cubrimiento. Fuente: Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos de Montpellier (1979).	31
Tabla 13 Porcentaje de cubrimiento simplificado. Elaboración propia.	31
Tabla 14 Reclasificación de las capas de los estratos en función del cubrimiento vegetal. Elaboración propia.	31
Tabla 15 Categorización y descripción de la capa ráster de frondosidad de la vegetación. Elaboración propia.	35



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AML	-	Ametralladora ligera
ATAK	-	<i>Android Team Awareness Kit</i>
BRILAT	-	Brigada de Infantería Ligera Aerotransportable
CAS	-	Apoyo Aéreo Cercano / <i>Close Air Support</i>
CC	-	Carros de combate
CIS	-	Sistemas de Información y Telecomunicaciones
CNIG	-	Centro Nacional de Información Geográfica
CUMAS	-	Cuadros de mando
FCC	-	Fracción de Cabida Cubierta
FOV	-	Campo de visión transversal
ISTAR	-	Inteligencia, Vigilancia, Adquisición de Blancos y Reconocimiento
LiDAR	-	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	-	Modelo digital de elevaciones
MDS	-	Modelo digital de superficie
MDT	-	Modelo digital del terreno
PEXT	-	Prácticas externas
PNOA	-	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
RPAS	-	Sistema de aeronaves pilotadas por control
SOC	-	Superponible de obstáculos combinados
TTPs	-	Tácticas técnicas y procedimientos
UHF	-	<i>Ultra high frequency</i>
URP	-	Unidad de Referencia para la Preparación
USDA	-	<i>United States Department of Agriculture</i>
VHF	-	<i>Very high frequency</i>



1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha llevado a cabo durante el período de las prácticas externas de seis semanas, estando encuadrado en la 3ª Compañía “Pantera”, perteneciente al Batallón de Infantería Protegida “Toledo” del Regimiento “Príncipe” nº3 de la Brigada “Galicia” VII, con sede en el Acuartelamiento Cabo Noval (Siero, Asturias).

Las zonas boscosas ocupan alrededor de cuatro millones de hectáreas, lo que supone cerca de un treinta por ciento de la superficie emergida del planeta. Su carácter hostil y las condiciones meteorológicas extremas, hacen del bosque todo un desafío para la actuación de las fuerzas militares. En consecuencia, las operaciones que se realicen en este entorno especialmente exigente, requerirán de una preparación específica y de un profundo conocimiento del medio.

Cabe destacar que a lo largo de la historia el bosque ha sido un escenario clave para el combate. Las características específicas y peculiares de este tipo de terrenos han dado lugar a que el desarrollo de los conflictos en bosques no siempre se haya decantado a favor del más fuerte, sino del que mejor se ha adaptado (Ministerio de Defensa, 2019). Sin embargo, resulta curioso que la instrucción en este tipo de escenarios haya ido dejándose de lado, hasta que recientemente, y gracias a los nuevos escenarios de combate como Letonia, la BRILAT ha puesto un gran énfasis en el adiestramiento y preparación para el combate en bosque, llegando a ser Unidad de Referencia para la Preparación (URP) de Combate en Bosque.

Debido a que las áreas forestales dificultan la transitabilidad o movilidad y reducen la capacidad de observación, se produce un condicionamiento de las acciones tácticas, por lo que es imprescindible conocer el terreno y el entorno en donde se van a realizar las operaciones. Es por ello que resulta fundamental disponer de sistemas que proporcionen la información necesaria para tener una visión amplia del entorno con la mayor precisión posible. Debido a la ubicación del Regimiento Príncipe 3, así como a los nuevos escenarios en terreno boscoso a los que tiene que hacer frente el Ejército de Tierra, se ha creído necesaria la implementación de datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) para facilitar el combate en bosque.

El LiDAR es un tipo de sistema activo de teledetección que cuenta con un escáner que emite pulsos de luz láser para obtener una muestra densa de coordenadas 3D del terreno. Si a esto se suma el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible caracterizar el terreno forestal y obtener productos cartográficos útiles para la planificación previa y el desarrollo de las operaciones militares.

El presente trabajo de fin de grado se estructura en cuatro secciones que se describen a continuación brevemente:

- **Objetivos y metodología:** se enunciará el objetivo principal del proyecto, así como los objetivos parciales.
- **Antecedentes y marco teórico:** se introducirá el punto de partida del proyecto, y se explicarán los diferentes tipos de bosques que se pueden encontrar en el combate. Asimismo, se expondrá el funcionamiento y la utilidad de los sistemas LiDAR.
- **Desarrollo: análisis y resultados:** se explicará el modo en el que se han procesado los datos LiDAR para obtener una capa ráster sobre la densidad forestal de un área piloto en el CMT de Cabo Noval (Asturias).
- **Conclusiones:** se realizará una valoración final sobre la utilidad del producto obtenido para su implementación con los medios disponibles en la Unidad de destino de las PEXT.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA



2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El **objetivo principal** de este trabajo es aplicar los datos de sistemas LiDAR aerotransportados de baja densidad de puntos al combate en bosque mediante su procesamiento con herramientas SIG, para disponer de un producto cartográfico útil sobre la densidad forestal. De este modo, se pretende dotar a las unidades del Ejército de Tierra de herramientas que faciliten la conducción de las operaciones, así como su planeamiento.

Para el cumplimiento de este objetivo es necesaria la consecución de una serie de **objetivos parciales** que se exponen a continuación:

- Objetivo 1: Analizar las particularidades del combate en bosque con las tácticas, técnicas y procedimientos (TTPs) actuales para identificar las necesidades de la Unidad.
- Objetivo 2: Procesar y generar capas de información ráster a partir de nubes de puntos LiDAR para su implementación en un SIG y en aplicaciones cartográficas que permitan conocer la transitabilidad y la visibilidad en las zonas de operaciones.
- Objetivo 3: Valorar la implementación de la tecnología LiDAR y de sus productos derivados para el combate en bosque.

Para la realización del presente proyecto se han llevado a cabo los siguientes trabajos durante la realización de las PEXT:

- Obtención de información relativa al uso y funcionamiento de los sistemas LiDAR.
- Obtención de información relativa a las TTPs del combate en bosque.
- Realización de encuestas a los CUMAS de la Unidad sobre el uso y eficacia de la aplicación ATAK y el SIG Carta Digital para el combate en bosque.
- Procesamiento de datos LiDAR mediante el *software* FUSION 4.20.
- Comprobación sobre el terreno de las capas ráster generadas con los datos LiDAR.
- Implementación y uso de las capas ráster en el SIG Carta Digital y en la aplicación ATAK.

En relación con el **alcance del proyecto**, se va a centrar únicamente en un área piloto del Acuartelamiento Cabo Noval, pudiéndose extrapolar la metodología aplicada a otras zonas del territorio español. Los datos LiDAR con los que se va a trabajar en el proyecto han sido obtenidos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), por lo que no se va a tratar el empleo de drones para la adquisición de los datos LiDAR, ni a realizar un estudio de la implementación de estos aparatos en las unidades del Ejército de Tierra. Cabe señalar que cada vez son más los países que cuentan con una cobertura nacional de datos LiDAR, de manera que se pueden obtener productos cartográficos con antelación y de forma gratuita para el desarrollo de las operaciones.

2.2. METODOLOGÍA

La metodología planteada para la consecución del objetivo principal se articula en **tres fases**, que están íntimamente ligadas con los objetivos parciales planteados:

- Fase 1: Para caracterizar el combate en bosque y analizar las diferentes TTPs, se realizará una revisión bibliográfica, así como encuestas a diferentes CUMAS sobre el uso eficaz de aplicaciones informáticas empleadas para el mando y control.
- Fase 2: Para obtener los productos derivados de las nubes de puntos LiDAR se utilizará software específico (FUSION 4.20).
- Fase 3: La implementación de los productos derivados se llevará a cabo mediante la



aplicación ATAK y el Sistema de Información Geográfica (SIG) Carta Digital.

3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1. LOS BOSQUES Y LOS CONFLICTOS ARMADOS

Desde el punto de vista militar se deben estudiar los tipos de bosques en función de las ventajas e inconvenientes que aporta al movimiento y al desarrollo de la maniobra, a las misiones que permiten desarrollar y en qué condiciones se pueden llevar a cabo.

Según la Agencia de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea (FRA), los bosques ocupan en la actualidad el 30,8% de la superficie terrestre mundial. La superficie forestal total es de 4060 millones de hectáreas. Debido a las diferencias tanto climáticas como geográficas, los bosques no están distribuidos de manera equitativa en todo el mundo. Más de la mitad de los bosques del mundo se encuentran en solo cinco países (Rusia, Brasil, Canadá, Estados Unidos y China), y dos tercios (el 66%) de los bosques están situados en 10 países (Ver *Figura 1*) (FAO, 2020).

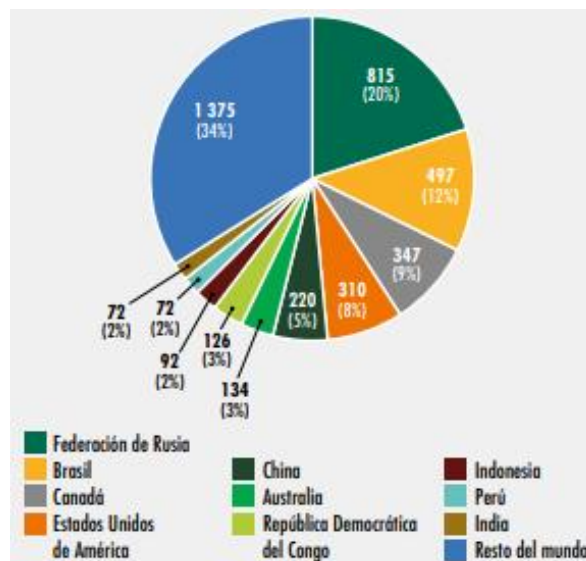


Figura 1 Distribución mundial de bosques que muestra los diez países con la mayor superficie forestal (millones de hectáreas y porcentaje de bosques del mundo). Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).

La clasificación de los bosques es compleja, ya que pueden usarse gran variedad de criterios para diferenciarlos. La distribución mundial de los bosques mencionada anteriormente, se puede clasificar en función de la zona climática en la que se encuentren. En el mundo existen cinco zonas climáticas importantes: boreal, polar, templada, subtropical y tropical. La mayor parte del bosque (el 45%) se encuentra en los trópicos, seguidos por las zonas boreales, templadas y subtropicales (Ver *Figura 2*). Estas zonas se dividen a su vez en zonas ecológicas mundiales terrestres, de la cuales veinte contienen alguna cubierta forestal (Ver *Figura 3*) (FAO, 2020).

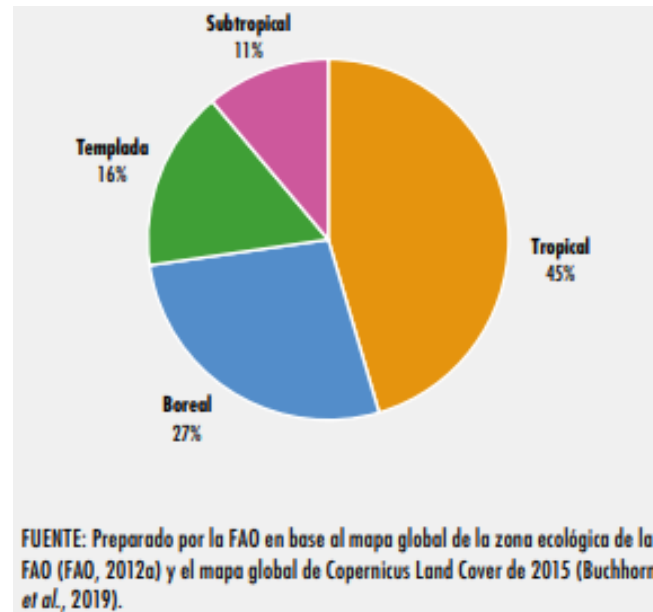


Figura 2 Superficie forestal mundial por zona climática. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).

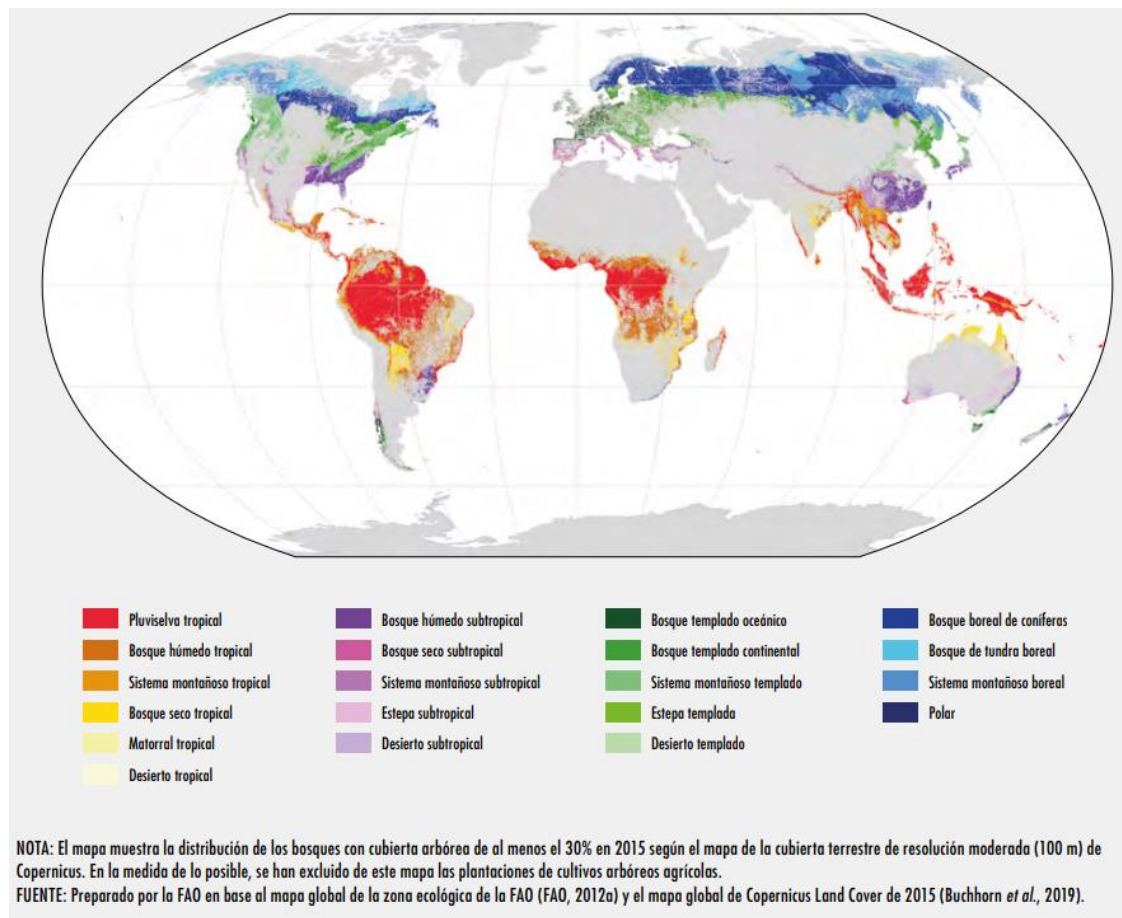


Figura 3 Bosques por zona ecológica mundial. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).

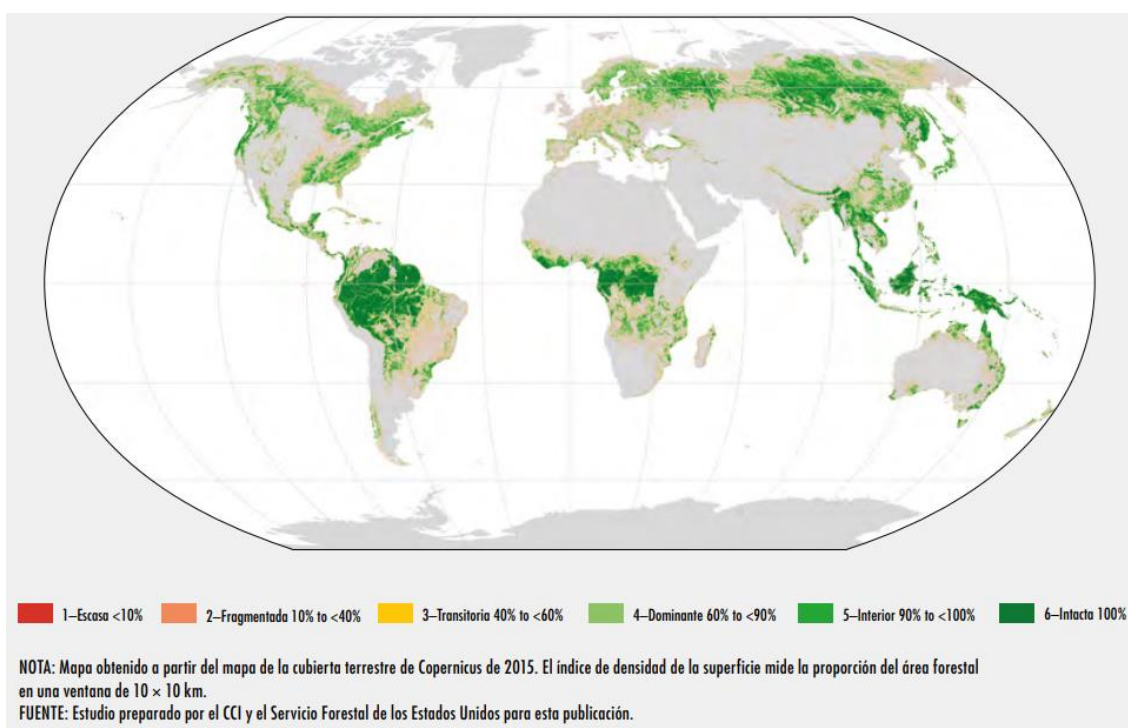


Figura 4 Índice de densidad de superficie forestal en 2015. Fuente: Informe del Estado de los Bosques 2020 de la FAO (2020).

Por otra parte, se pueden diferenciar los distintos tipos de bosques según su densidad de superficie forestal, distinguiendo entre escasa, fragmentada, transitoria, dominante, interior o intacta (Ver *Figura 4*). Casi la mitad de la superficie forestal mundial (49%) corresponde a una de las dos clases más altas de densidad de superficie forestal (intacta e interior), y en el extremo opuesto del espectro de densidad, el 9% de los bosques del mundo se encuentra en las clases escasa y fragmentada (FAO, 2020).

El bosque queda definido por su tamaño, forma, existencia de vías de comunicación (caminos, senderos, cortafuegos...) y claros, y se ve influido por la época del año, situación topográfica, orografía de la zona, climatología, etc. La vegetación puede variar en su tipología, espesura, tamaño, existencia a diferentes niveles o no, condicionando los procedimientos de combate.

En la historia de los conflictos bélicos existen varios ejemplos de cómo el bosque anula la ventaja tecnológica y puede favorecer al contendiente menos numeroso, con menor capacidad de maniobra, de enlace y de apoyo de fuegos. La Primera Guerra Mundial (1914-1918) es conocida como una guerra de trincheras, pero tuvo también un componente boscoso muy importante. Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), el bosque fue nuevamente un terreno decisivo en Europa; destacando la batalla del Bosque de Hürtgen, entre fuerzas alemanas y tropas estadounidenses (Ministerio de Defensa, 2019).

Desde 1990, alrededor de una quinta parte de los bosques tropicales del mundo han estado ubicados en las zonas de conflictos armados en más de treinta países. Países como la República Democrática del Congo, Colombia, Myanmar y la India, son los que más contribuyen a la superposición entre los bosques y las zonas de conflicto armado. Los bosques en países como Brasil, Indonesia, México están plagados de luchas entre comunidades y protestas populares, pero de acuerdo con la mayoría de las definiciones, no se clasifican como conflictos armados (Jong, 2008).

Más recientemente, un ejemplo de terreno boscoso en el que fuerzas y cuerpos de



seguridad deben empeñarse en combate es en Latinoamérica, donde luchan contra las bandas de crimen organizado que operan en la zona. En el caso del Ejército Español, actualmente está comprometido con la misión Presencia Avanzada Reforzada-Letonia, cuyo objetivo es el de garantizar la estabilidad de la seguridad euroatlántica, mantener una Europa en paz, unida y libre, así como prevenir conflictos mediante medidas de defensa y disuasión creíbles. Nuevamente, el bosque sigue siendo uno de los escenarios en los que se desarrollan diversos conflictos en todo el mundo.

En la publicación de Ayuda en Acción (Pérez-Olivares, 2021) se muestran diez guerras y conflictos aún activos en la actualidad, de los cuales caben destacar por la presencia de masas boscosas, Venezuela, República Centroafricana, Mozambique y Camerún.

3.2. EL COMBATE EN BOSQUE: FACTORES CONDICIONANTES Y TÁCTICAS, TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS

La doctrina del Ejército de Tierra de España (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2015) emplea el término bosques para describir *“extensiones de terreno que estén total o parcialmente cubiertas por árboles y vegetación, y donde el movimiento de vehículos este en gran medida limitado a las vías de comunicación, claros y cortafuegos”*. En el contexto internacional se suele acudir a la terminología OTAN (Milley, 2009), que define FIWAF (*Fighting in Woods and Forests*) como *“el combate en un terreno que consiste mayoritariamente en un tipo de bosque en que el obstáculo es de naturaleza tal que las operaciones embarcadas son prácticamente imposibles. La práctica habitual es el despliegue de unidades de infantería ligera que principalmente conducen combate cercano”*.

La influencia de las áreas forestales en el combate dependerá de su tamaño, clase, condiciones del suelo y ubicación geográfica, referida a latitud y altitud. Esto constituye el entorno idóneo para que pequeños grupos lleven a cabo acciones contra fuerzas superiores. Es por ello, que será necesario un adecuado conocimiento de dicho entorno, una adaptación de los procedimientos y de las tácticas técnicas, y una meticulosa instrucción que permita maniobrar y combatir en este ambiente.

Las características singulares del entorno boscoso, especialmente las referidas al terreno y la climatología, condicionan el desarrollo de las acciones tácticas, tanto ofensivas como defensivas, que por lo tanto deben adaptarse con el fin de, por un lado, aprovechar las ventajas que proporciona este tipo de entorno y, por otro, mitigar los efectos negativos que producen sobre el planeamiento y la ejecución de las operaciones. Las zonas de gran densidad de vegetación presentan factores que, en mayor o menor medida, influyen en el combate que se pueda desarrollar en su interior. Algunos de estos factores son los siguientes:

- Campos de tiro y observación reducidos al mínimo.
- Presencia de gran cantidad de obstáculos naturales.
- Facilidad para la ocultación.
- Dificultad para la orientación.
- Alto grado de humedad.

Generalmente, la conservación del terreno boscoso tiene una escasa influencia en el resultado final de las operaciones, ya que en raras ocasiones tiene un valor militar, ganando mayor relevancia la capacidad de maniobra y la ocultación de las tropas. Por ello, el empleo de unidades móviles y flexibles, especialmente ligeras, es el más adecuado para este tipo de terreno. Con carácter general, se constituirán agrupamientos tácticos en base a unidades ligeras o con capacidad de combatir a pie potenciadas con elementos de ingenieros, apoyos de fuego, logísticos, aeronaves y unidades pesadas. Dependiendo de la misión será necesario el empleo



de intérpretes, equipos de inteligencia o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) (Ministerio de Defensa, 2019).

Uno de los aspectos fundamentales en las acciones tácticas ofensivas es la movilidad, siendo frecuente el empleo de la maniobra envolvente¹ buscando las zonas descubiertas del despliegue enemigo, producidas por la concentración de fuerzas para mitigar las dificultades de mando y control.

Los medios más resolutivos son las armas portátiles de corto alcance debido a los reducidos campos de tiro que proporciona el terreno boscoso. Es necesario emplear una combinación adecuada de alcances y armas para lograr los efectos deseados. Cabe señalar que la cobertura que ofrece la vegetación dificulta las labores de identificación de objetivos y los apoyos de fuego, llegando a ser peligroso su empleo para las tropas propias debido a las cortas distancias de enfrentamiento, lo que favorece que el combate de encuentro sea el predominante. Es por ello que la superioridad aérea carece de la importancia que posee en otro tipo de terreno. Así mismo, dicha vegetación facilita en gran medida la ocultación de las fuerzas propias, por lo que será de gran importancia mantener la sorpresa para obtener ventaja sobre el enemigo (Ver *Figura 5*).



Figura 5 Maniobras de la BRILAT en combate en bosque. Fuente: Fuerza Terrestre (2021).

En relación con lo mencionado anteriormente, la mayor ventaja táctica que aporta la noche es la ocultación. No obstante, no tiene la misma importancia en el interior del bosque que en otros tipos de terreno, ya que en éste también es proporcionada por la vegetación durante el arco diurno. Por otro lado, la existencia de gran cantidad de obstáculos naturales dificulta, más aún, la movilidad durante la noche y, la cobertura de la vegetación impide el acceso de la luz residual, siendo en muchos casos inútil el empleo de intensificadores de luz.

Las acciones defensivas se ven favorecidas por la vegetación, lo que supone un aumento en la ocultación de posiciones y rutas logísticas. La finalidad de la maniobra defensiva en el bosque estará relacionada con la conservación de zonas clave del terreno, prestando especial atención a las que dominen las comunicaciones, impidiendo así que el atacante las ocupe, controle o emplee, durante un tiempo determinado.

La defensa móvil será la forma habitual de defensa y se orientará, principalmente, a la destrucción del enemigo para ganar tiempo y economizar medios, con la finalidad de recuperar

¹ La maniobra envolvente es una forma de maniobra ofensiva dirigida a objetivos débiles situados en los flancos o a retaguardia de la posición enemiga, para evitar las posiciones (pozos y ramales) principales y más fuertes.



la iniciativa. Esta maniobra comienza en el exterior de la zona boscosa, canalizando al enemigo, y continua en el interior llevando a cabo emboscadas que deben plantearse en toda la profundidad de la zona. Las acciones deben ser limitadas en tiempo y espacio evitando las unidades ejecutantes quedar aisladas del resto.

La comunicación se verá dificultada por el fraccionamiento de las unidades. La vegetación limitará el alcance y cobertura de los medios CIS y el grado de humedad y temperatura limitaran su funcionalidad (Ministerio de Defensa, 2013).

El combatiente deberá portar una elevada carga logística debido al elevado consumo de municiones y explosivos que impondrá la intensidad de los combates, y la dificultad de un apoyo logístico eficaz.

Las Unidades deberán contar con las capacidades necesarias en los siguientes aspectos (Ministerio de Defensa, 2018):

- Inteligencia: Las necesidades de información son mayores que en terreno abierto, por lo que se requieren medios de obtención de todo tipo. El empleo de medios ISTAR estará muy condicionado por el terreno y la meteorología.
- Mando: La descentralización de unidades para la ejecución de la misión requiere del empleo de sistemas CIS avanzados, así como una rigurosa gestión y disciplina de los mismos. Destaca en este entorno el mando orientado a la misión (libertad de acción en los niveles más bajos siguiendo el propósito del jefe).
- Apoyos de fuego: Debido a la dificultad de observación y a la necesidad de batir los objetivos de oportunidad es necesario integrar en la unidad apoyada, hasta nivel sección, los medios productores de fuego y asegurar el enlace entre ambas unidades. Es obligado un estudio de la munición a emplear y una adecuada activación de las espoletas para conseguir los efectos deseados, así como reconsiderar las distancias de empleo de las municiones y la distancia de seguridad de las tropas propias. El terreno boscoso hará difícil el empleo de las armas de tiro curvo en sus máximos alcances, obligando a que los asentamientos se encuentren lo más adelantados posible.
- Apoyo logístico: Será obligado realizar un planeamiento logístico detallado y una ejecución descentralizada para conseguir un alto grado de autosuficiencia, por tanto, serán necesarios procedimientos y medios adaptados a la situación y el empleo de medidas de seguridad para garantizar el apoyo.
- Protección: Será necesario disponer de capacidad contra la amenaza de trampas explosivas.
- Movilidad vertical: Este tipo de terreno requiere capacidades para emplear técnicas y equipos específicos de ascenso, descenso y franqueamiento de obstáculos. En caso de contar con apoyo de helicópteros, debido a las limitaciones de zonas de toma, será necesario contar con procedimientos de desembarque en vuelo estacionario.

El elevado grado de incertidumbre y riesgo que proporcionan las zonas boscosas exigirá a las Unidades un planeamiento riguroso, detallado e integral. Tanto el planeamiento como las unidades y medios específicos a emplear dependerán en gran medida de la finalidad perseguida con la operación, que podrá estar orientada a la localización, destrucción o neutralización de un posible enemigo. Es por ello, que el planeamiento requerirá la mayor cantidad de información en cuanto a:

- Clase de bosque, orografía de la zona y dimensiones.
- Fuerzas enemigas. Localización y entidad, así como tratar de obtener sus procedimientos de actuación, ya que, debido a la dificultad de observación, de efectuar reconocimientos, de mantener el enlace y la orientación, fuerzas enemigas de escasa entidad pueden



combatir con éxito.

- Finalidad e interés del bosque para el enemigo.
- Amenazas más probables que encontrarán las unidades propias (trampas, emboscadas, hostigamientos, etc.).
- Vías de comunicación, rutas, cortafuegos, etc. que permitan el abastecimiento logístico.
- Poblaciones en la zona y su afinidad a las fuerzas enemigas.

El terreno boscoso, por sus peculiaridades, ejerce una gran influencia sobre el individuo, limitándolo en aspectos físicos y psíquicos, que afectan a la capacidad de combate de su unidad. Entre algunas de las limitaciones con las que se enfrentará un combatiente y su unidad en una zona boscosa cabe destacar: limitaciones individuales, limitaciones de movimiento y limitaciones de mando y control (Ministerio de Defensa, 2019) (Ver *Tabla 1*).

Tipo de limitación	Descripción
Individual	<p>A) Desgaste físico: la reducción de la entrada de luz y la presencia de vegetación hacen que la humedad relativa del ambiente boscoso sea superior a la de los espacios abiertos, lo que produce en el combatiente una deshidratación inconsciente. Además, la presencia masiva de obstáculos naturales (ramas, raíces, ondulaciones del terreno, etc.) y la propia orografía hacen difícil mantener la dirección de avance, siendo necesario marchar abriendo senda o buscar otra ruta, por lo que el movimiento en terreno boscoso supone un consumo energético superior que en uno abierto.</p> <p>B) Desgaste psicológico: la escasez de luz y la falta de referencias lejanas, como consecuencia de una vegetación abundante, provoca en el combatiente la sensación de desorientación, que por la noche se ve incrementada. A su vez, la sensación de inseguridad producida por la escasa visibilidad y por los continuos ruidos producidos por la vegetación, viento o animales, que pueden confundirse con movimiento hostil, generan un desgaste psicológico difícil de sobrellevar durante un tiempo prolongado.</p> <p>Estas limitaciones individuales influyen en el rendimiento de la Unidad, de ahí, por ejemplo, la importancia de relevar al personal que abre camino en los movimientos tácticos.</p>
De movimiento	<p>En el interior del bosque, tanto en ofensiva como en defensiva, los intervalos y distancias se acortan para permitir el enlace visual. El combate en zona boscosa busca el dominio de las escasas vías de comunicación existentes y sus puntos de paso obligado. Los bosques en sí no suelen tener valor militar sirviendo, principalmente, como obstáculo para la progresión enemiga o donde apoyar la defensa. El bosque favorecerá siempre el movimiento de las unidades a pie, que podrán desplazarse por cualquier tipo de terreno, frente a las unidades motorizadas, mecanizadas o acorazadas que verán limitados sus movimientos a caminos y cortafuegos.</p>
De mando y control	<p>Uno de los principales problemas para el mando en el combate en terreno boscoso es el alto grado de incertidumbre sobre el enemigo y el terreno, muy superior al de un combate en terreno abierto. La limitada observación, la dificultad en el avance, la degradación del enlace radio, la vulnerabilidad a trampas y emboscadas obligan a una descentralización del mando y a duplicar los sistemas de enlace.</p> <p>El empleo de medios de radio VHF o UHF, que trabajan enlazando punto a punto (enlace visual), se ve dificultado con la existencia de grandes masas arbóreas, topografía local y condiciones meteorológicas que reducen considerablemente su alcance. La optimización del enlace de estos medios se consigue con el empleo adecuado de antenas elevadas y de circunstancias, tipo dipolo. Las radios PR-4G o Spearnet² son muy válidas para el enlace entre unidades que se encuentre próximas, a pesar de que la vegetación y la orografía impidan el enlace visual entre ellas; por lo que para asegurar</p>

² Radio-teléfono empleado por las Unidades del Ejército de Tierra, con una autonomía de doce horas y un alcance de tres mil metros.



Tipo de limitación	Descripción
	el enlace será preciso el empleo de relés.

Tabla 1 Limitaciones individuales, de movimiento y de mando y control en zonas boscosas. Fuente: BIP 'Toledo' II/3 (s.f).

Una vez identificadas las limitaciones que presenta el combate en bosque para el individuo, es necesario conocer las capacidades que permite este tipo de terreno en función de la distancia entre árboles. De este modo, se detalla en la *Tabla 2* los medios que se pueden emplear para desplazarse y su velocidad de movimiento, el armamento efectivo a emplear y la posibilidad de ocultación que ofrece cada uno de los distintos tipos de bosques.

Clasificación de la frondosidad	Movimiento	Utilización de armamento	Posibilidad de ocultación	Velocidad de día (km/h)	Velocidad de noche (km/h)
1 Distancia entre árboles > 10 m	Vehículos pesados y/o carros de combate	Todas las armas colectivas y fusil de precisión	Difícil ocultación frente elementos terrestres y aéreos	4	2
2 Distancia entre árboles > 5 m	Vehículos ligeros	Morteros, ametralladoras ligeras y fusil de precisión	Difícil ocultación frente elementos terrestres	4	2
3 Distancia entre árboles > 3 m	Motos y armas colectivas	ametralladoras ligeras y fusil	Difícil ocultación unidades tipo compañía	3	1,5
4 Distancia entre árboles > 2 m	Sólo fusileros a pie	Tiro a corta distancia con fusil	Favorece la ocultación	1,5 – 2	1 – 0,5
5 Distancia entre árboles < 2 m y arbustos abundantes	Movimiento impedido	Tiro a muy corta distancia con fusil y pistola	Favorece la ocultación	1	0,5

Tabla 2 Tipos de bosque según frondosidad y capacidades que permiten. Fuente: BIP 'Toledo' II/3 (s.f).

3.3. LAS TECNOLOGÍAS DE TELEDETECCIÓN AL SERVICIO DEL COMBATE EN BOSQUE: EL LIDAR AEROPORTADO

El Ejército de Tierra realiza y coopera con diferentes universidades y estudios, con el fin de potenciar e implementar los avances tecnológicos para el combate. Ejemplo de ello es la colaboración que mantiene la BRILAT con la Escuela de Ingeniería Forestal de Pontevedra, de la Universidad de Vigo, de la que destaca que es una ingeniería líder en el ámbito nacional



respecto al estudio de masas boscosas. Tal y como se expone en el diario Faro de Vigo (García, 2019):

El apoyo de la Escuela va desde charlas de introducción a la silvicultura, a muestras de maquinaria individual y colectiva para realizar trabajos en zonas de bosque y, sobre todo, en la introducción de los efectivos de la BRILAT en las nuevas tecnologías para el planeamiento prácticas con cartografía avanzada LiDAR. Este trabajo conjunto está descubriendo las posibilidades tácticas para el combate en bosque de la ya citada tecnología.

El LiDAR una tecnología de medición activa. La mayoría de sistemas LiDAR funcionan según la técnica “tiempo de vuelo” y necesariamente incorporan un transceptor (transmisor y receptor) óptico. Este dispositivo es el encargado de emitir un pulso infrarrojo (invisible al ojo humano) mediante un láser y de recibir el pulso reflejado provocado por los objetos y superficies que se vaya encontrando en su camino.

El escáner láser trabaja con dos movimientos: el de la trayectoria de la plataforma (longitudinal) y el del espejo que refleja la luz que llega desde el láser (transversal) (*PNOA LiDAR*, 2009) (ver *Figura 6*). Con ellos, es capaz de obtener una nube de puntos del terreno que permite conocer su geografía de manera detallada.

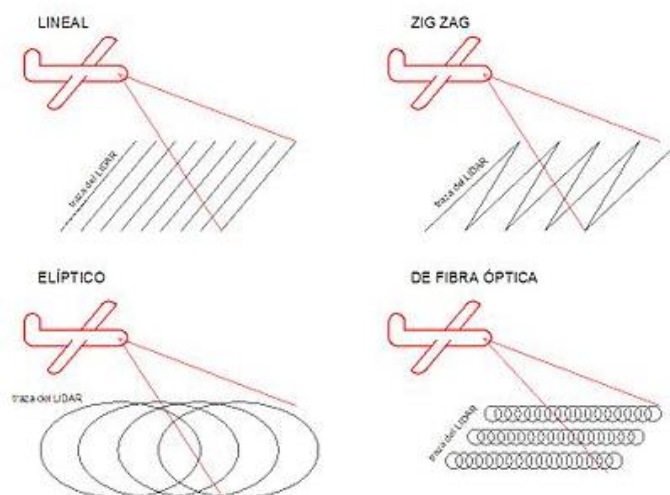


Figura 6 Patrones de escaneo. Fuente: GEOCOM (2019).

La electrónica asociada, mediante una serie de relojes internos con precisiones muy elevadas y resoluciones de décimas de nanosegundo, calcula el tiempo de retraso entre la emisión y la recepción de la reflexión, eco o retorno. Puesto que la velocidad de la luz es conocida, es posible calcular la distancia lineal a la que se encuentran esos objetos y además ofrecer precisiones del orden de milímetros en los sistemas más sofisticados (Ruzickova, Ruzicka y Bitta, 2020).

La nube de puntos 3D que se obtiene mediante el sistema LiDAR se procesa para eliminar valores atípicos y artefactos. Los puntos se pueden clasificar en varias categorías que incluyen desde el suelo o terreno desnudo, a la parte superior de la vegetación y el agua (ver *Figura 7*). Las distintas clases se identifican mediante códigos numéricos de enteros en el formato de archivo LAS. Estos códigos de clasificación los definió la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), en español Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección, para todos los formatos LAS (Ruzickova, Ruzicka y Bitta, 2020).

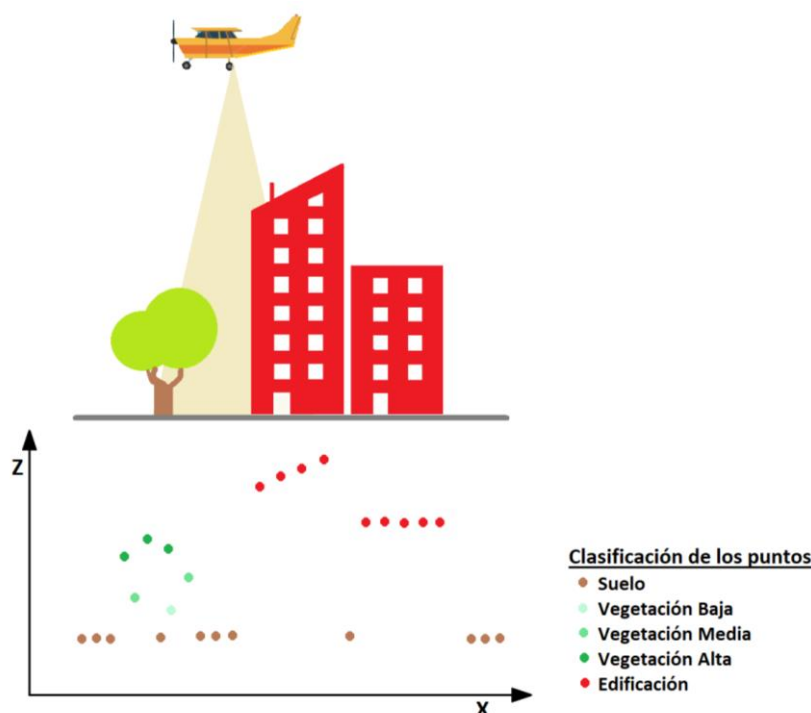


Figura 7 Clasificación de puntos. Fuente Plan Nacional de Ortografía Aérea (2020).

Aunque es posible integrar esta tecnología en vehículos terrestres, desde un punto de vista de eficiencia cualquier plataforma aerotransportada (aviones, helicópteros, drones) resulta mucho más apropiada para mapear tridimensionalmente grandes áreas geográficas.

Ya sea para producir mapas tridimensionales o para ayudar en la toma de decisiones, el uso de modelos digitales de superficie (MDS) y de elevaciones (MDE) de alta resolución espacial derivados de los datos LiDAR proporciona un valor añadido real, facilitando el despliegue de medios tácticos en el terreno, así como la definición de planes de acción. Asimismo, la integración de estos productos en SIG permite realizar análisis muy variados, como estudios de visibilidad, detallado geométrico (altura de las paredes, número de pisos, aperturas, etc.), detección de actividad bajo cubierta vegetal o red de camuflaje, accesibilidad (a pie o en vehículos) y pendientes, determinación de zonas potenciales de aterrizaje para aeronaves, o detección de obstáculos (Ministerio de Defensa, 2014).

Tanto las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado como las Fuerzas Armadas en sus misiones en territorio nacional e internacional, se enfrentan a situaciones en las que el reconocimiento previo detallado del terreno les proporcionaría información vital para el correcto desarrollo de las mismas.

4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto se ha desarrollado en una zona piloto del campo de maniobras del Acuartelamiento Cabo Noval en Siero (Asturias) (ver Figuras 8 y 9), perteneciente al Regimiento de Infantería 'Príncipe' nº3. Se ha seleccionado específicamente una zona que permitiese observar tanto terreno boscoso como zonas sin vegetación, con el fin de recoger la variabilidad y diversidad que habitualmente se puede encontrar en un escenario forestal.

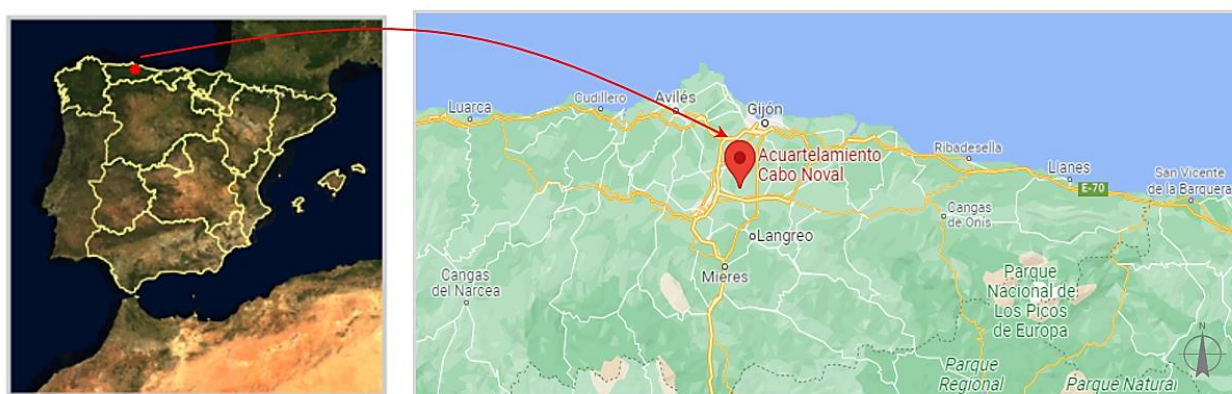


Figura 8 Ubicación Acuartelamiento Cabo Noval. Elaboración propia.

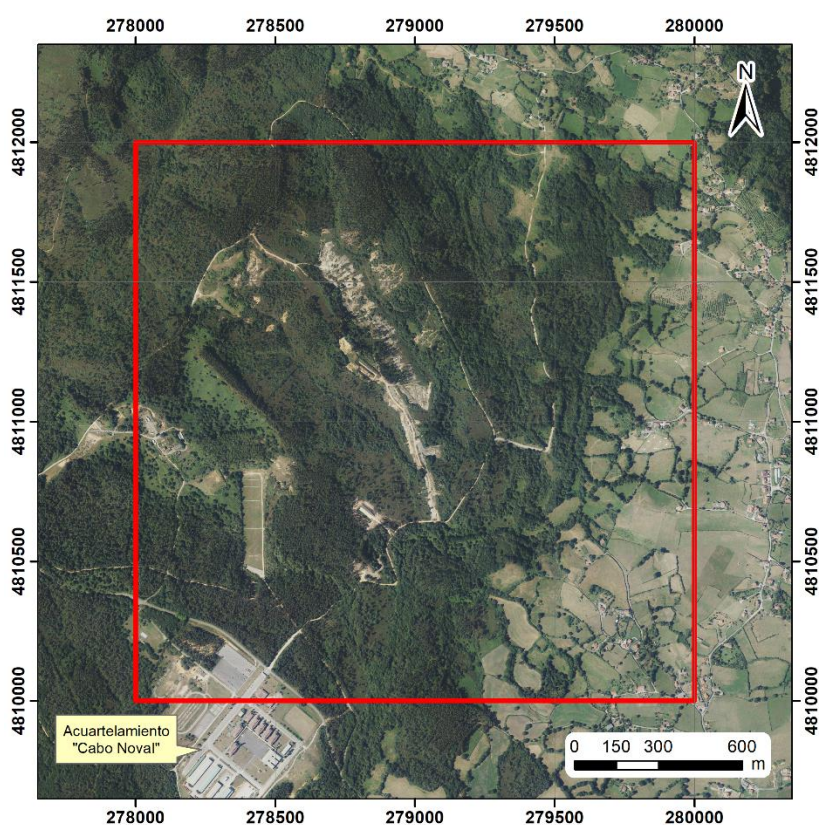


Figura 9 Localización del área de estudio. El recuadro de color rojo indica la extensión del archivo de datos LiDAR-PNOA (2 x 2 km). Fuente: Descargas CNIG. Servicio WMS IGN Ortofotos PNOA máxima actualidad. Sistema de referencia: ETRS89 UTM H30.

En la zona del Acuartelamiento Cabo Noval el clima que predomina es el oceánico templado y húmedo con una temperatura media anual de 12°C y unas precipitaciones predominantes durante el invierno, con 159 mm de media anual.

El relieve asturiano está condicionado en gran medida por la Cordillera Cantábrica cuyo eje principal discurre paralelo a la costa, coincidiendo con el límite meridional de la región. Asturias, por sus condiciones climáticas actuales y las características de su cubierta vegetal, forma parte de la Región Eurosiberiana y, en concreto, de la Superprovincia Atlántica (ver Figura 10). Se considera clima eurosiberiano uno de los tipos de clima extratropical en el que, coincidiendo con la época cálida, el verano, no existe periodo de aridez o éste es inferior a dos meses (Díaz y Fernández, 1994).



Figura 10 Paisaje forestal de la zona de estudio. Fuente: Google maps street view (s.f).

Según los datos del Mapa Forestal de España (MITECO, 2019), aproximadamente el 62 % (248 ha) de la zona de estudio está cubierta por formaciones arboladas de distinto tipo, tal como se puede apreciar en la *Tabla 3*.

Uso del suelo	Superficie (ha)
Artificial	43,8
Cultivos	108,2
Eucaliptales de plantación	208,9
Monte con arbolado ralo de plantación	1,9
Monte arbolado de frondosas alóctonas con autóctonas	14,8
Monte con arbolado ralo de Pinus pinaster	22,3
TOTAL	400,0

Tabla 3 Usos del suelo de la zona de estudio según el Mapa Forestal de España. Fuente: MITECO (2019)

Para saber el tipo de vegetación presente en una zona determinada es necesario conocer el tipo de clima y según Díaz y Fernández (1994, p.66):

Todos los territorios atlántico-medioeuropeos en cuyo clima se manifiesta la acción temperante del océano Atlántico se integran en una unidad fitogeográfica denominada Superprovincia Atlántica. El rasgo climático básico de esta unidad es precisamente la oceanidad; es decir, que ni los inviernos son muy rigurosos ni los veranos muy cálidos y, por tanto, la amplitud térmica anual es reducida. Esas peculiaridades climáticas de los territorios de la Superprovincia Atlántica, se manifiestan en ciertos rasgos de su cubierta vegetal, tanto en lo que se refiere a las plantas que los pueblan (flora) como a las comunidades vegetales en que se integran (vegetación).

Como se puede ver en la *Figura 11* y *Tabla 4*, la zona de estudio seleccionada se

sitúa entre 178 y 298 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), por lo que se enmarcaría en el piso termocolino, donde se encuentran formaciones de carbayedas colinas éutrofas y oligótrofes, alisedas, encinares, complejos de vegetación litoral, eucaliptos, prebosques, escobares y brezales-tojales, y prados, cultivos y frutales ligados a zonas habitadas (Díaz y Fernández, 1994).

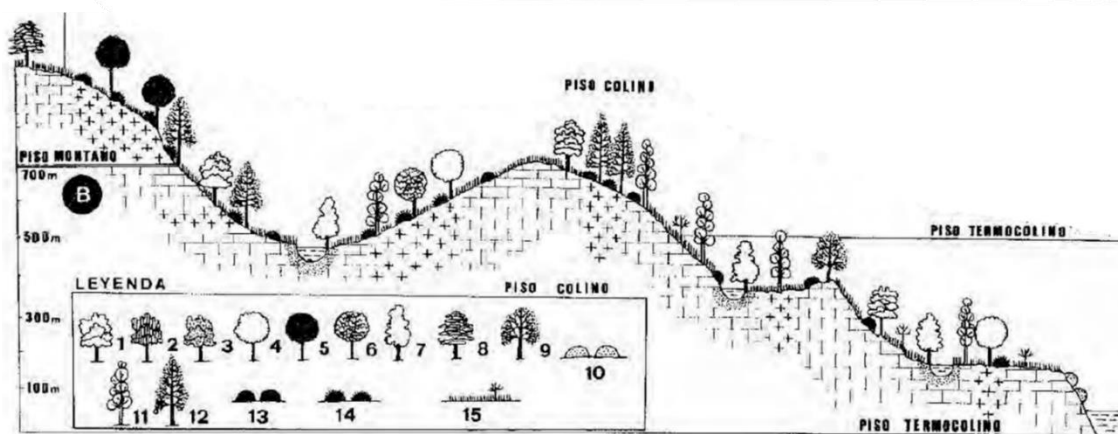


Figura 11 Paisaje vegetal de la zona central de Asturias (Subsector Ovetense) Fuente: Díaz y Fernández (1994).

Identificador	Descripción
1	Carbayedas colinas éutrofas
2	Carbayedas colinas éutrofas con rebollos
3	Carbayedas colinas éutrofas con hayas
4	Carbayedas colinas oligótrofes
5	Carbayedas montanas oligótrofes, en ocasiones con hayas
6	Rebollares oligótrofes
7	Alisedas centro-orientales
8	Hayedos montanos
9	Encinares
10	Complejos de vegetación litoral
11	Cultivos de eucaliptos
12	Cultivos de pinos
13	Prebosques, sebes y aulagares
14	Prebosques, escobares y brezales-tojales
15	Prados, cultivos y frutales

Tabla 4 Leyenda paisaje vegetal de la zona central de Asturias. Fuente: Díaz y Fernández (1994).

4.2. DATOS LiDAR-PNOA Y PRE-TRATAMIENTOS DE LAS NUBES DE PUNTOS

España dispone de datos LiDAR para todo el territorio nacional. La captura de datos se ha llevado a cabo dentro del proyecto PNOA-LiDAR, que surgió en el año 2008 por la necesidad de disponer de modelos digitales del terreno de alta resolución espacial (5 m) para poder estudiar mejor las zonas con riesgo de inundación. Con este proyecto, el territorio español ha sido escaneado con sensores LiDAR aerotransportados, obteniéndose nubes de puntos con coordenadas X, Y, Z y atributos como clasificación o color (*PNOA LiDAR*, 2009).

La primera cobertura se llevó a cabo entre los años 2009 y 2015, que es la fase en la que se encuentra la zona de estudio del proyecto, mientras que la segunda comenzó en el año 2015 y todavía sigue realizándose (Ver *Figura 12*).

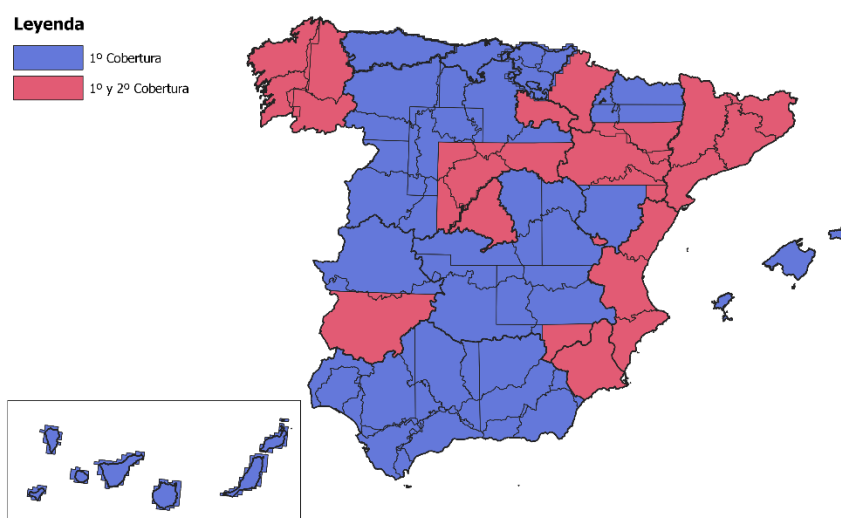


Figura 12 Coberturas LiDAR-PNOA publicadas. Fuente: (*PNOA LiDAR*, 2009).

Los datos se distribuyen de manera gratuita a cualquier usuario a través del centro de descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) en ficheros digitales de 2x2 km de extensión en formato LAZ. En el caso de la zona de estudio, los datos fueron capturados entre mayo y octubre de 2012. Presentan una densidad nominal de puntos de 0,5 puntos/m², y una precisión en planimetría de 0,3 m y en altimetría de 0,2 m. El sensor utilizado para la toma de información es un RIEGL LMS-Q680i, con capacidad de registrar hasta 4 retornos por pulso láser emitido. En la *Tabla 5* se indican las especificaciones técnicas del vuelo LiDAR para la Comunidad Autónoma de Asturias (*PNOA LiDAR*, 2009).

Parámetro	Especificaciones
Sensor LiDAR	RIEGL LMS-Q680i
Campo de visión transversal (FOV)	El máximo FOV permitido será de 50º efectivos
Frecuencia de escaneado	Frecuencia de escaneado mínima de 70 Hz, debiendo alcanzar un mínimo de 40 Hz con un FOV de 50º
Frecuencia de pulso	Mínima de 45 kHz, asumiendo un FOV de 50º y un máximo alcance de hasta 3000 metros.



Parámetro	Especificaciones
Resolución espacial	El vuelo se planifica a una velocidad adecuada para garantizar un mínimo distanciamiento entre líneas de barrido (amplitud de barrido, o máximo espaciado entre puntos en la dirección de vuelo), que permita obtener de manera homogénea por todo su ámbito la densidad promedio exigida de 0,5 puntos del primer retorno por metro cuadrado sin considerar puntos de solape entre pasadas. En ningún caso se admite una densidad inferior a 0,40 puntos/m ² .
Resolución radiométrica de intensidades múltiples	Rango dinámico de al menos 8 bits
Capacidad de detectar múltiples retornos para un mismo pulso	Deberá ser capaz de detectar y registrar hasta 4 retornos para cada pulso con una discriminación en distancia vertical de al menos 4 m.

Tabla 5 Especificaciones Técnicas para la realización del vuelo LiDAR. Fuente: IGN (s.f)

Cabe señalar, que para poder trabajar con los datos LiDAR es necesario descomprimir los archivos LAZ a LAS, quitando los puntos de ruido (clase 7) y solape (clase 12), que son clases que no interesa retener en las nubes de puntos por los errores que pueden introducir en los productos derivados. Para ello se ha utilizado la herramienta LiDAR Converter, desarrollada por el Gobierno de Navarra (Dirección General de Obras Públicas Sección de Cartografía, 2019). LiDAR Converter es una aplicación con múltiples funciones, entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Conversor de archivos LAZ a archivos LAS. (Ver Figuras 13 y 14)
- Filtrado de clases.
- Cambio de sistema de referencia.
- Filtrado los datos por una zona de coordenadas conocidas.
- Cambio de cota a partir de un modelo de geoide dado.
- Cambio de atributos de los puntos.

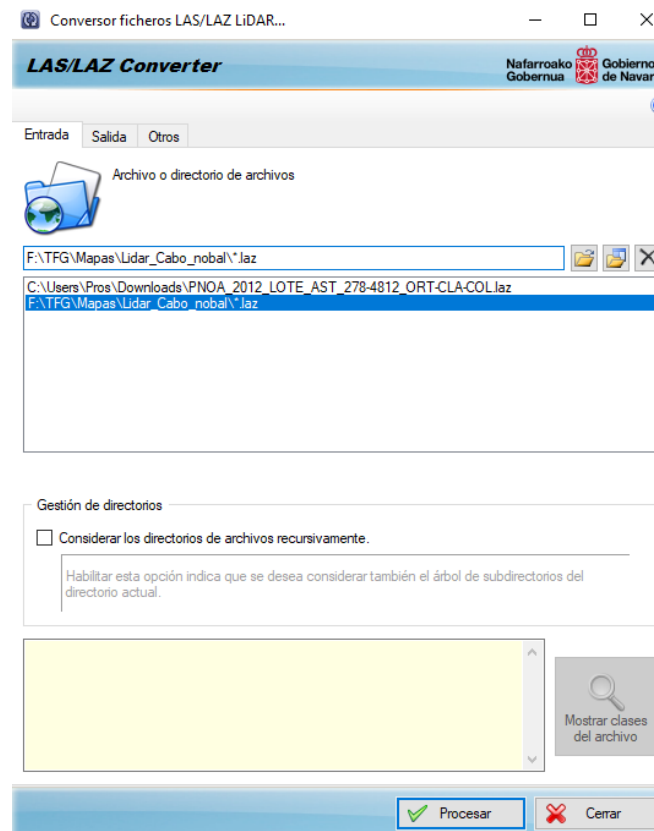


Figura 13 Entrada de fichero LAZ en el programa LiDAR Converter. Elaboración propia.

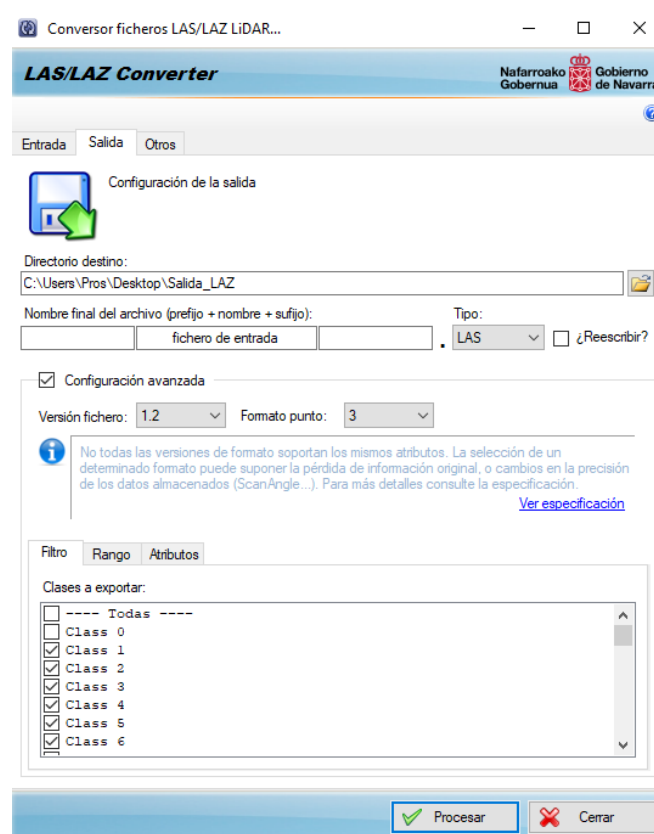


Figura 14 Salida de fichero LAS en el programa LiDAR Converter. Elaboración propia.

4.3. GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE SUPERFICIES



Se ha empleado el software FUSION (Alonso, 2016) para obtener un MDS, que es una capa ráster que representa el terreno y todo lo que hay sobre él (construcciones, vegetación, etc.), donde los valores de los píxeles muestran la altura (coordenada Z) en metros sobre el nivel del mar.

FUSION es un software desarrollado por el *United States Department of Agriculture (USDA)*, para comprender, explorar y analizar los datos LIDAR. La interfaz de FUSION consiste en una ventana de visualización gráfica 2D que soporta varios datos y formatos y una ventana de control. Por otro lado, LDV (*LiDAR Data Viewer*) proporciona un entorno de visualización 3D y la posibilidad de realizar medidas sobre el conjunto de datos espaciales. La lista de comandos permite análisis específicos y diferentes procesos (McGaughey, 2008).

En FUSION los datos están clasificados en seis categorías: imágenes, datos LiDAR en bruto, puntos de interés, árboles, puntos calientes, y modelos de superficies. LDV ofrece varias funciones y permite realizar mediciones dentro de la nube de datos. Tanto FUSION como LDV tienen sus propios controles de teclado y de ratón. Para el caso de FUSION es necesario que esté cargada una imagen. La utilidad de la línea de comandos es fundamental para el procesamiento de las nubes de puntos, como el filtrado de puntos, la conversión de datos, la obtención de variables o la evaluación de la calidad para grandes lotes de datos LiDAR. Estas líneas se suelen ejecutar desde el símbolo del sistema o mediante uso de archivos por lotes (archivos de extensión BAT) (Alonso, 2016).

El MDS de la zona de estudio se ha calculado mediante la herramienta *CanopyModel* de FUSION. Como se puede ver en la siguiente *Tabla 6* que muestra la línea de código y la descripción de los parámetros, se ha obtenido una capa ráster en formato .dtm con una resolución espacial de 1 m. La herramienta asigna a cada píxel el valor de elevación del retorno más alto.

Línea de código para crear MDS

```
C:\FUSION\Canopymodel.exe
C:\Practica_LIDAR\Asturias\Resultados\CanopySurface.dtm 1 M M 1 30 0 0
C:\Practica_LIDAR\Asturias\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las
```

Donde:

C:\FUSION\Canopymodel.exe → es la ruta del ejecutable.

C:\Practica_LIDAR\Asturias\Resultados\CanopySurface.dtm → es la ruta del modelo de superficie del dosel de salida en formato .dtm.

1 → es el tamaño del píxel del modelo, en este caso 1 m.

M → unidades de las coordenadas X e Y expresadas en metros.

M → unidades de la elevación expresadas en metros.

1 → sistema de coordenadas del modelo que denota UTM.

30 → zona 30.

0 → Datum horizontal desconocido.

0 → Datum vertical desconocido.

C:\Practica_LIDAR\Asturias\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las → es la ruta del archivo .las de entrada.

Tabla 6 Código MDS. Elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, la capa ráster resultante está en formato .dtm. Para poder trabajar con estos archivos en el programa de Carta Digital se necesitará transformarlos a ASCII (.asc) mediante el software FUSION. Así mismo, cabe la posibilidad de transformar dicha capa ráster a otro tipo de formatos, tales como kml, GeoTIFF, en función del programa con el que se necesite trabajar.

Otra alternativa es generar un MDS con las alturas normalizadas (nMDS), es decir, cuyos píxeles representen la altura real de los elementos situados sobre el terreno. El nMDS se calcula como la diferencia entre MDS-MDE (Figura 15), y para ello se necesita disponer de un MDE que represente la topografía:



Figura 15 Obtención de nMDS. Elaboración propia.

Para la obtención del MDE se ha empleado el software FUSION mediante el siguiente código que se muestra en la Tabla 7.

Línea de código para crear MDE

```
C:\FUSION\GridSurfaceCreate.exe /class:2
C:\Users\Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm 1 M M 1 30 0 0
C:\Users\Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las
```

Donde:

C:\FUSION\GridSurfaceCreate.exe → es la ruta del ejecutable.

/class:2 → es el código que denota los puntos clasificados como “suelo” (clase 2).

C:\Users\Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm → es la ruta del archivo .dtm de salida que refiere al MDE.

1 → tamaño de celda utilizada para crear el MDE.

M → unidades de las coordenadas X e Y expresadas en metros.

M → unidades de la elevación expresada en metros.

1 → sistema de coordenadas del MDE que denota UTM.

30 → zona 30.

0 → Datum horizontal desconocido.

0 → Datum vertical desconocido.

C:\Users\Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las → es el archivo .las que se emplea

Tabla 7 Código MDE. Elaboración propia.

Para la visualización del MDE se ha empleado Carta Digital siendo este el resultado (Figura 16):

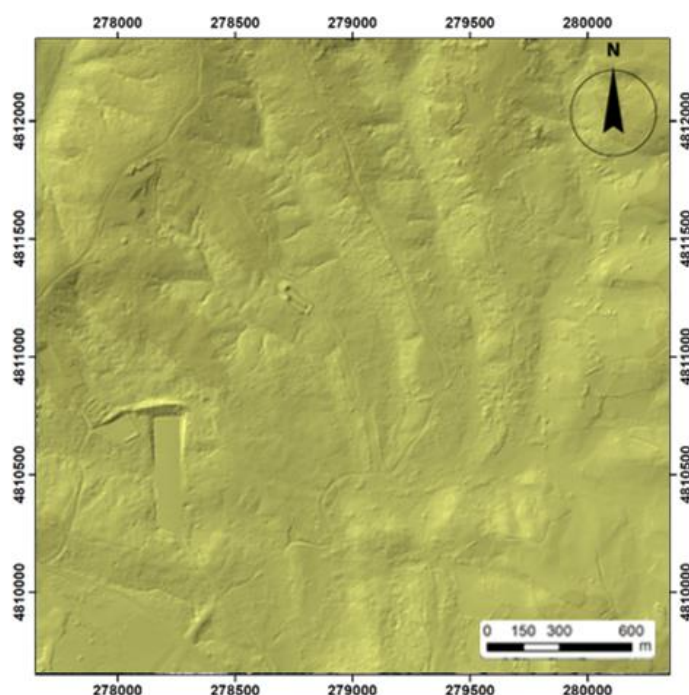


Figura 16 Visualización MDE con sombreado. Elaboración propia.

Una vez obtenido el MDE se procede a generar el nMDS con FUSION mediante el código que se muestra en la *Tabla 8*.

Línea de código para crear nMDS

```
C:\FUSION\Canopymodel.exe /ground:C:\Users \Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm
C:\Users \Desktop\RESULTADOS\nMDS.dtm 1 M M 1 30 0 0
C:\Users \Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las
```

Donde:

C:\FUSION\Canopymodel.exe/ground: → es la ruta del ejecutable.

C:\Users \Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm → es la ruta del MDE.

C:\Users\Desktop\RESULTADOS\nMDS.dtm → es la ruta del modelo de superficies normalizadas en formato .dtm de salida.

1 → es el tamaño del píxel del modelo, en este caso 1 m.

M → unidades de las coordenadas X e Y expresadas en metros.

M → unidades de la elevación expresada en metros.

1 → sistema de coordenadas del modelo que denota UTM.

30 → zona 30.

0 → Datum horizontal desconocido.

0 → Datum vertical desconocido.

C:\Users\amont\Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las
→ es la ruta del archivo .las de entrada.

Tabla 8 Código nMDS. Elaboración propia.

Para la visualización del nMDS se ha empleado Carta Digital (Centro Geográfico del Ejército de Tierra, 2008) siendo este el resultado el que se muestra en la *Figura 17*. Como se puede observar, se encuentran algunos enclaves de masas forestales que superan los 30 m de altura.

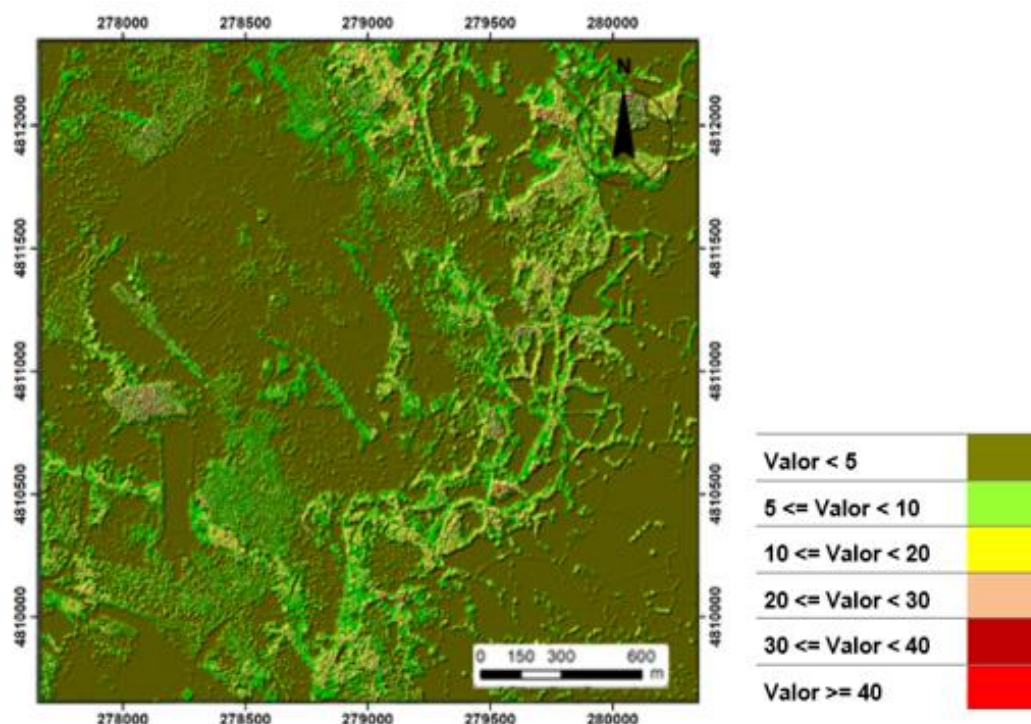


Figura 17 Visualización nMDS. Elaboración propia.

4.4. CÁLCULO DE LAS MÉTRICAS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ALTURAS DE LOS RETORNOS LÁSER

Todas las comunidades vegetales tienen una estructura más o menos compleja que puede dividirse en dos partes:

- 1) Estructura vertical, que es la distribución de las especies en capas o estratos en función de su altura.
- 2) Estructura horizontal, que es la distribución de las especies en el espacio (independientemente de su altura).

Existen diferentes métricas o variables que permiten caracterizar vertical y horizontalmente el dosel vegetal. Respecto a la estructura horizontal, mediante el software FUSION se puede calcular la Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) que informa sobre el porcentaje de cubrimiento del suelo por la vegetación. Así, un 100% de FCC se traduce en que el suelo está cubierto totalmente por las hojas y ramas de la vegetación, mientras que un 0% de FCC indica que el suelo está desnudo y nada lo oculta. En relación con la estructura vertical, se puede analizar el modo en que se distribuye la vegetación en altura, para conocer, por ejemplo, si puede haber arbolado con sotobosque, matorrales altos o bajos, o un continuo vegetal desde el suelo hasta las copas arbóreas (Díaz, 2019).

Mediante FUSION existe la posibilidad de estratificar la nube de puntos en base a algún criterio estructural, como por ejemplo el que establecen (Ibarra y Yetano, 1989) y que se muestra en la *Tabla 9*.

Estrato	Altura (m)
5 – Estrato arbóreo	> 7



Estrato	Altura (m)
4 – Estrato arborescente	3 – 7
3 – Estrato arbustivo	1 – 3
2 – Estrato subarbustivo	0,5 – 1
1 – Estrato herbáceo	0 – 0,5
0 – Hojarasca	0

Tabla 9 Clasificación por estratos según Ibarra y Yetano (1989).

En base a la clasificación anteriormente mostrada, se ha realizado una simplificación de los estratos diferenciando tres grandes clases en función de la movilidad que cada uno permite y de la visión que facilita o impide en cada caso. (Ver *Tabla 10*)

Estrato	Altura (m)
3 – Arbolado	3 – 60
2 – Arbustivo	0,5 – 3
1 – Suelo/Herbáceo	0 – 0,5

Tabla 10 Clasificación por estratos de la zona de estudio. Elaboración propia.

Una vez diferenciados los distintos tipos de estratos con los que se va a trabajar, se procede a generar las métricas de densidad de retornos con FUSION mediante el código que se muestra en la *Tabla 11*.

Línea de código para crear métricas de densidad de retornos láser

```
C:\FUSION\DensityMetrics.exe /class:2,3,4,5 /slices:0.5,3,60
C:\Users\PROS\Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm 5 0
C:\Users\PROS\Desktop\RESULTADOS\DensityMetrics.csv
C:\Users\PROS\Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las
```

Donde:

C:\FUSION\DensityMetrics.exe → es la ruta del ejecutable.

/class:2,3,4,5 → son las clases de puntos que se van a emplear (2-suelo, 3-vegetación baja, 4-vegetación media, y 5-vegetación alta).

/slices:0.5,3,60 → son los rangos de altura, es decir, los estratos de vegetación que se han definido en la Tabla X (suelo/herbáceo de 0 a 0,5 m; arbustivo de 0,5 a 3 m; y arbóreo de 3 a 60 m).

C:\Users\PROS\Desktop\RESULTADOS\MDE.dtm → es la ruta del MDE empleado para normalizar las alturas de los retornos láser.

5 → resolución espacial de las estadísticas de densidad (5 m).

0 → para que no se compute un espesor de estrato constante.



Línea de código para crear métricas de densidad de retornos láser

C:\Users\PROS\Desktop\RESULTADOS\DensityMetrics.csv → es la ruta del archivo .csv de salida que contendrá las estadísticas de densidad.

C:\Users\PROS\Desktop\LAS\PNOA_2012_LOTE_AST_278-4812_ORT-CLA-COL.las → es la ruta del archivo .las de entrada.

Tabla 11 Código métricas de densidad. Elaboración propia.

Tras haber sido creadas las métricas de densidad, se procede a convertir los archivos .dtm (ver Figura 18) a .asc (ver Figura 19) con FUSION. Los píxeles de las capas ráster representan la proporción de retornos dentro del estrato respecto del total para cada píxel. De los archivos generados se han seleccionado únicamente los estratos 1 (de 0 a 0,5 m), 2 (de 0,5 a 3 m) y 3 (de 3 a 60 m) de acuerdo a la clasificación mostrada previamente (ver Figuras 20, 21 y 22).

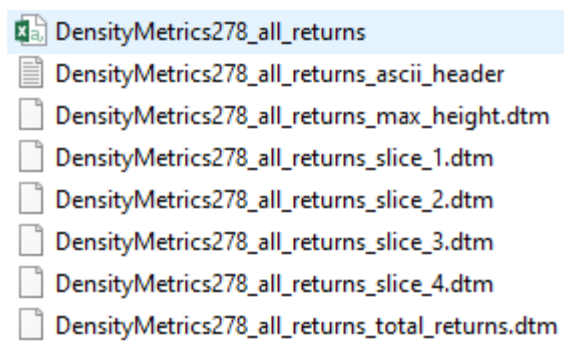


Figura 18 Métricas de densidad .dtm. Elaboración propia

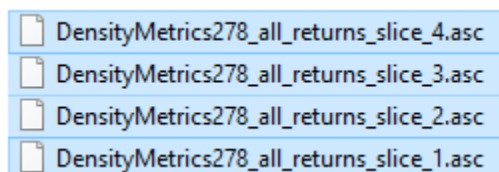


Figura 19 Métricas de densidad .asc. Elaboración propia.



Figura 20 Densidad de 0 a 0,5 m. Elaboración propia

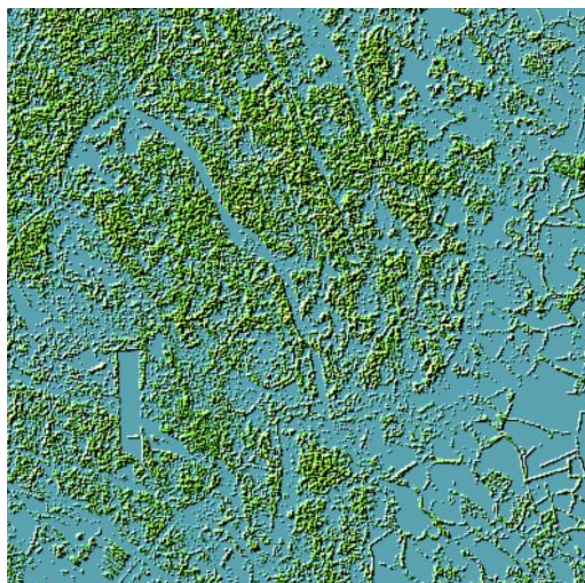


Figura 21 Densidad de 0,5 a 3 m. Elaboración propia

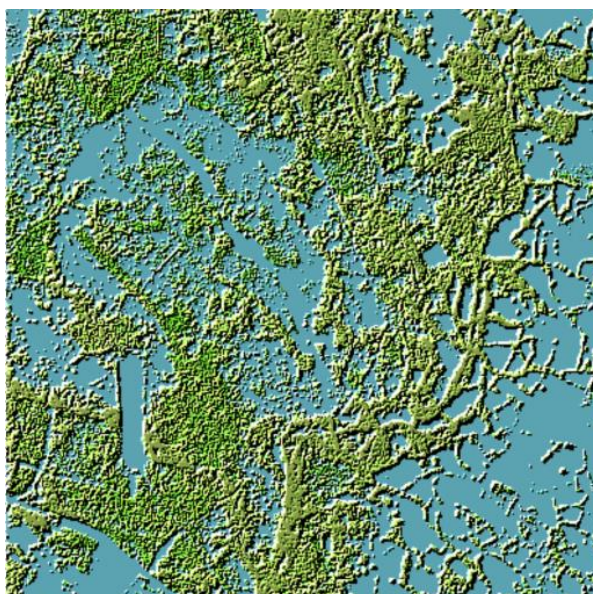


Figura 22 Densidad de 3 a 60 m. Elaboración propia

4.5. ANÁLISIS SIG PARA OBTENER UNA CARTOGRAFÍA DE LOS ESTRATOS Y DE LA DENSIDAD VEGETAL

A partir de las capas de densidad generadas anteriormente, es necesario categorizar el porcentaje de cubrimiento de cada uno de los estratos, ya que no será lo mismo un terreno en el que haya un 10% de cubrimiento de arbolado, en el que presumiblemente la visibilidad será prácticamente completa y no presentará ningún problema en la movilidad, que un terreno en el que el cubrimiento de arbolado sea del 90%, donde la visibilidad será esencialmente nula y se reducirá considerablemente la movilidad de las tropas.

En consecuencia, se ha tomado como punto de partida una escala de valores en base a la cual se ha realizado una simplificación de los porcentajes de cubrimiento. Como se muestra en la *Tabla 12*, el Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos de Montpellier (1979) establece siete niveles de recubrimiento que permiten la comparación y que se basan en el porcentaje de superficie de terreno recubierta.



Porcentaje de cubrimiento vegetal	Valoración
90 – 100 %	Cerrado
75 – 90 %	Poco abierto
50 – 75 %	Semiabierto
25 – 50 %	Abierto
10 – 25 %	Muy abierto
0 – 10 %	Extremadamente abierto
0 %	Totalmente abierto

Tabla 12 Porcentaje de cubrimiento. Fuente: Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos de Montpellier (1979).

A partir de la anterior Tabla 13 se ha realizado, al igual que con la clasificación por estratos, una simplificación diferenciando tres grandes clases en función del porcentaje de cubrimiento.

Clase	Porcentaje de cubrimiento vegetal	Valoración
3	75 – 100 %	Cerrado
2	50 – 75 %	Semicerrado
1	0 – 50 %	Abierto

Tabla 13 Porcentaje de cubrimiento simplificado. Elaboración propia.

Para la reclasificación de las capas ráster de densidad en función del porcentaje de cubrimiento (abierto, semicerrado y cerrado), se ha empleado el SIG Carta Digital. Mediante la herramienta *Clasificación de Consultas matriciales* (ver Figura 23) se han obtenido tres nuevas capas ráster, una por cada estrato (ver Figuras 24, 25 y 26) con una recodificación de los valores de sus píxeles para la posterior combinación de las tres capas, tal como se muestra en la Tabla 14.

Estrato					Leyenda de colores de visualización
	Arbolado	Arbustivo	Herbáceo	Porcentaje de cubrimiento vegetal	
Código de píxel	100	10	1	0 – 0,5 %	
	200	20	2	50 – 75 %	
	300	30	3	75 – 100 %	

Tabla 14 Reclasificación de las capas de los estratos en función del cubrimiento vegetal. Elaboración propia.



Clasificación

Modelo del Terreno:

Conjunto de datos:

DensityMetrics_all_returns_slice_1.asc/UTM30N-ETRS89

Clase de entidad (tabla):

DensityMetrics_all_returns_slice_1.asc

Valores a recalificar

Rangos	Valores de salida
valor < 0	0
0 <= valor < 0	1
0 <= valor < 75	2
valor >= 75	3

Añadir

Eliminar

Importar...

Exportar...

☐ Tratar nulos

Cambiar valores nulos por: 0

Escala:

Filtro Espacial

Nombre de la consulta: HERBACEO

Descripción de la consulta:

Aceptar Cancelar

Figura 23 Consulta matricial Clasificación. Elaboración propia

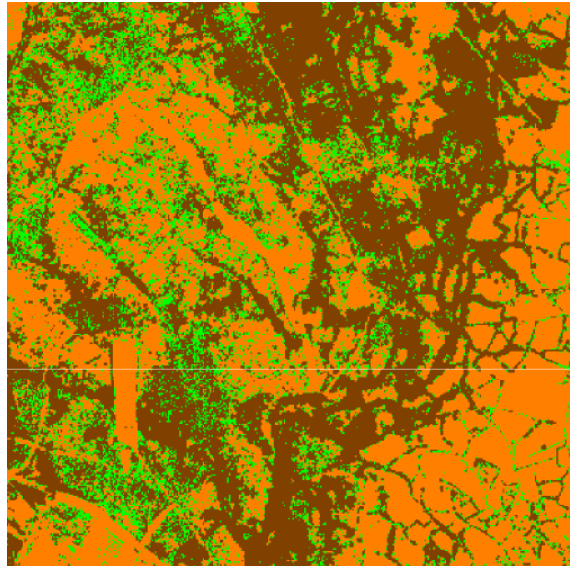


Figura 24 Herbáceo. Elaboración propia.

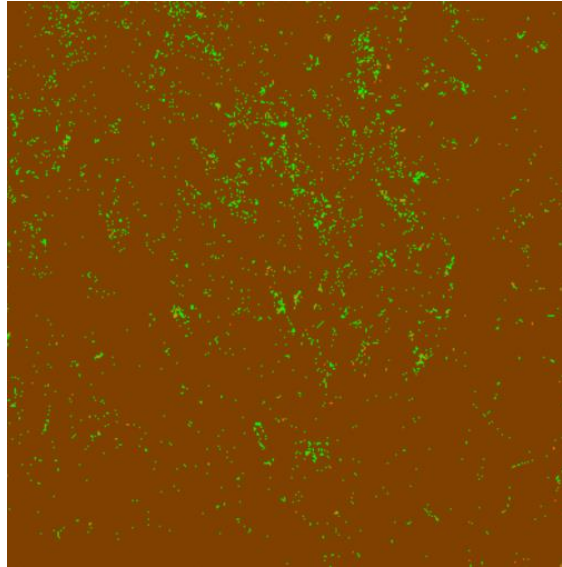


Figura 25 Arbustivo. Elaboración propia.

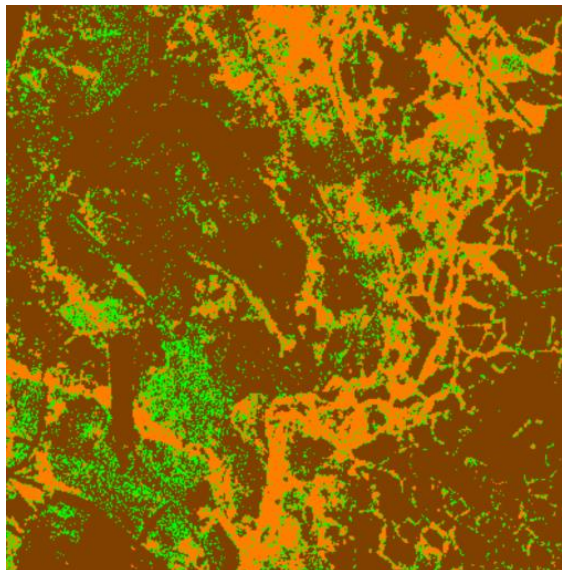


Figura 26 Arbolado. Elaboración propia.

Para alcanzar el objetivo final deseado, es decir, una única capa que muestre la combinación de los tres tipos de estratos de acuerdo a su porcentaje de cubrimiento, es necesario combinar (sumar) las capas ráster reclasificadas. Para ello, se ha empleado la herramienta de Carta Digital *Álgebra matricial* de *Consultas matriciales* (ver *Figura 27*).

Álgebra matricial

Entradas matriciales...

Entrada	Descripción
E1	Herbáceo_REC
E2	Arbustivo_REC
E3	Arbolado_REC

Añadir...
Borrar
Subir
Bajar

Operación:
E1 + ... + En [+ Constante]

☐ Constante: 0 Filtro espacial...

Nombre de la consulta:
FRONDOSIDAD

Descripción de la consulta:

Aceptar Cancelar

Figura 27 Consulta matricial para combinar las capas ráster. Elaboración propia.

La capa resultante muestra siete combinaciones posibles en el área de estudio (ver Figura 28). Como se observa en la Tabla 15, se ha llevado a cabo una categorización en función del porcentaje de cada una de las capas ráster para diferenciar las zonas que faciliten la transitabilidad de personal de combate a pie, de las zonas que la dificulten y que a su vez sean áreas en las que la visibilidad sea reducida. De este modo, se pretende facilitar la elección del terreno a emplear en función de la acción táctica que se vaya a realizar.

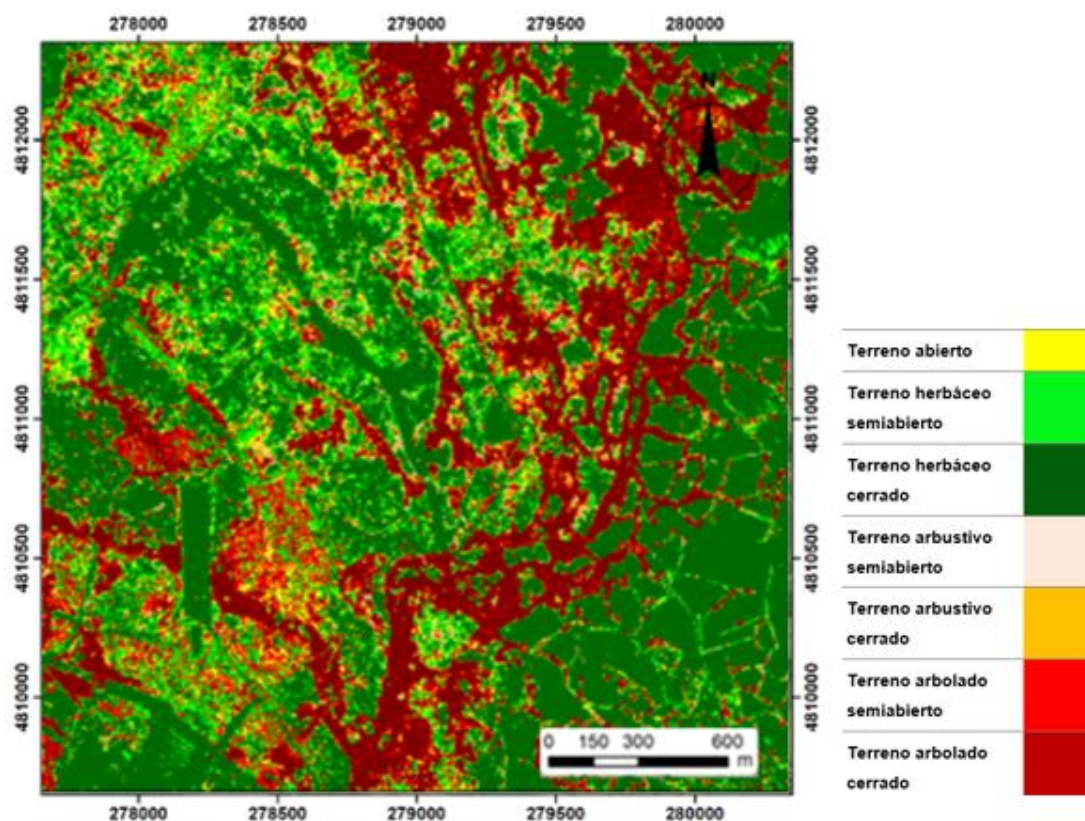


Figura 28 Capa ráster de frondosidad de la vegetación. Elaboración propia.



Clasificación	Descripción
Terreno abierto	arbolado<=50%, arbustivo<=50%, herbáceo<=50%
Terreno herbáceo semiabierto	arbolado<=50%, arbustivo<=50%, herbáceo 50-75%
Terreno herbáceo cerrado	arbolado<=50%, arbustivo<=50%, herbáceo >75%
Terreno arbustivo semiabierto	arbolado<=50%, arbustivo 50-75%, herbáceo<=50%
Terreno arbustivo cerrado	arbolado<=50%, arbustivo>75%, herbáceo<=50%
Terreno arbolado semiabierto	arbolado 50-75%, arbustivo<=50%, herbáceo<=50%
Terreno arbolado cerrado	arbolado>75%, arbustivo<=50%, herbáceo<=50%

Tabla 15 Categorización y descripción de la capa ráster de frondosidad de la vegetación. Elaboración propia.

Mediante la *Figura 29* se evidencian las zonas donde la frondosidad es mayor y menor según el estrato. De este modo, si se quisiese realizar una infiltración en terreno enemigo fuera de las vistas del mismo, se procuraría usar las zonas del terreno de color rojo. A su vez, en caso de que se quisiese realizar un avance con vehículos, o adoptar un despliegue amplio de una unidad se emplearían las zonas del terreno de color verde.

Por otra parte, cabe destacar la utilidad de la capa ráster obtenida para la toma de decisión en el empleo de medios. De esta manera, en un terreno abierto será posible el uso de vehículos e incluso carros de combate, mientras que en un terreno arbustivo cerrado el movimiento quedará limitado a personal a pie.

Para corroborar la utilidad de la capa ráster obtenida, además de haberse comprobado sobre el terreno los resultados, se ha usado la herramienta de Frugoviewer. Este programa es capaz de leer datos ráster y vectoriales, además de las propias nubes de puntos LiDAR. También permite crear nuevas áreas o puntos de interés, así como crear mapas de contornos. De entre las diferentes funciones de la aplicación de Frugoviewer caben destacar:

- Incorpora archivos .las, ASCII, archivos GeoTIFF de 32 bits y archivos .LAZ en la versión 3.0.
- Visualiza datos de modelos de elevación y terreno en vistas ortográficas estándar, perspectiva 3D y vistas de sección transversal o perfil.
- Muestra la hora del GPS si la información está disponible.
- Colorea los puntos por elevación usando valores de azul a rojo, tono tierra o intensidad.
- Superpone imágenes y vectores en sus datasets de elevación y terreno 3D.
- Examina las nubes de puntos LiDAR por clasificación, línea de vuelo o número de retorno.



- Genera superposiciones de contorno a partir de los datos de origen.

Mediante esta herramienta se ha seleccionado una fracción de la zona de estudio (rectángulo de color azul) con el fin de visualizar en 3D la frondosidad de la vegetación del área en cuestión (ver *Figura 29*).

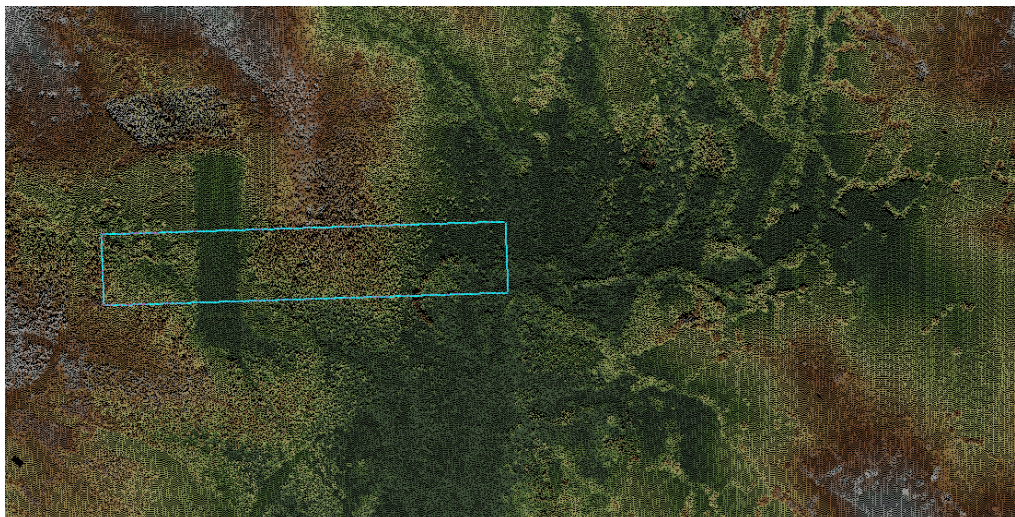


Figura 29 Selección de área en Frugoviewer. Elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, el programa Frugoviewer proporciona una visión 3D (ver *Figuras 30 y 31*) que, además de mostrar el perfil de elevación, permite visualizar la presencia o no de vegetación y de su frondosidad relativa.

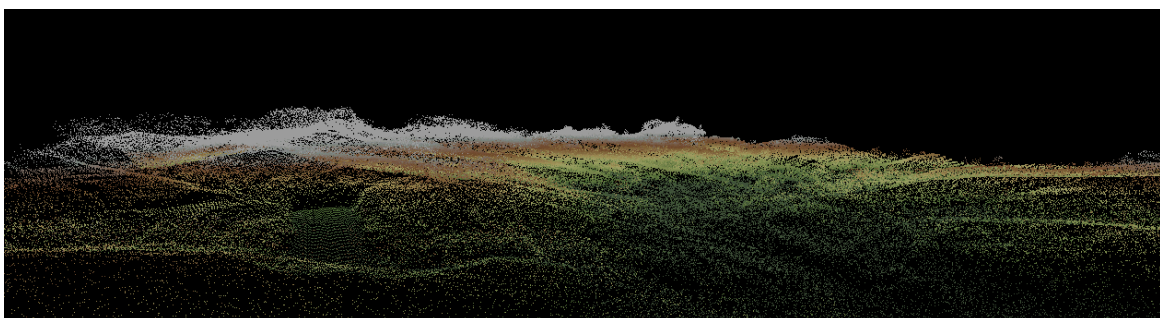


Figura 30 Visualización 3D. Elaboración propia.

En la *Figura 31* se diferencian dos zonas claras, en verde la zona boscosa y su frondosidad relativa, y en morado el suelo. Queda evidenciado por tanto, que la zona del campo de tiro del campo de maniobras no presenta prácticamente vegetación, lo que permite afirmar que es correcto el desarrollo de los datos LiDAR referentes a la disposición de la frondosidad y presencia de vegetación en el terreno estudiado.

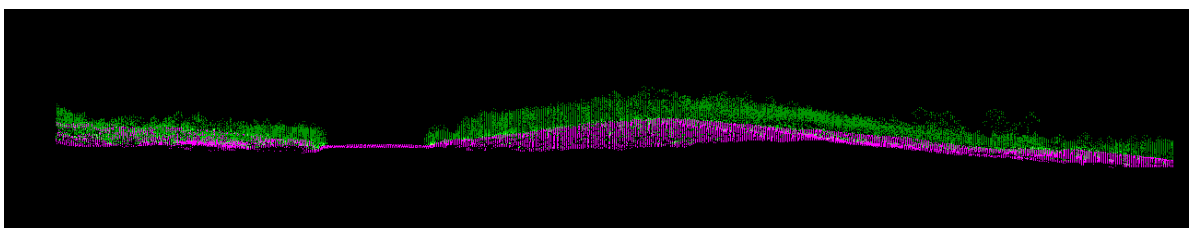


Figura 31 Visualización 2D. Elaboración propia.



4.6. IMPLEMENTACIÓN EN APLICACIONES TÁCTICAS

Una vez obtenida la capa ráster de frondosidad, se ha procedido al estudio de su implementación en dos aplicaciones cartográficas de uso militar táctico, como son Carta Digital Android y ATAK (*Android Team Awareness Kit*), para facilitar el mando y control de las operaciones en terreno boscoso. Dicha implementación se ha llevado a cabo mediante la georreferenciación de la capa ráster resultante respecto a los mapas cartográficos empleados para la realización de temas tácticos en ejercicios de instrucción (Ver *Figura 32*).

Carta Digital para Android es una aplicación de visualización de cartografía que permite acceder tanto a datos online como a datos almacenados en el dispositivo móvil. Es capaz de ubicar la posición del usuario mediante los sistemas de geolocalización disponibles en el dispositivo. También tiene las capacidades de definir *waypoints*, capturar trazas del camino seguido y asistencia a la navegación de rutas. El visor soporta la visualización simultánea de hasta tres capas con información ráster. El usuario puede elegir qué capas visualiza entre varias capas online predefinidas o cualquiera de las almacenadas en el dispositivo (Centro Geográfico del Ejército de Tierra, 2008).

La aplicación ATAK constituye un sistema integral de mando y control. Se trata de una aplicación para teléfonos inteligentes Android de concienciación de la situación militar que se apoya en infraestructura geoespacial. Permite la orientación de precisión, el conocimiento de la situación, la navegación y el intercambio de datos. ATAK tiene una arquitectura de complementos que permite agregar diferentes funcionalidades de acción directa, asesoramiento de combate, aplicación de la ley, operaciones de protección, seguridad fronteriza, respuesta a desastres, comunicaciones fuera de la red, mapeo de precisión y geoetiquetado. Asimismo, permite a los usuarios navegar utilizando capas de información geográfica con conocimiento de la situación en tiempo real de los eventos en curso (TAK Product Center, 2020).

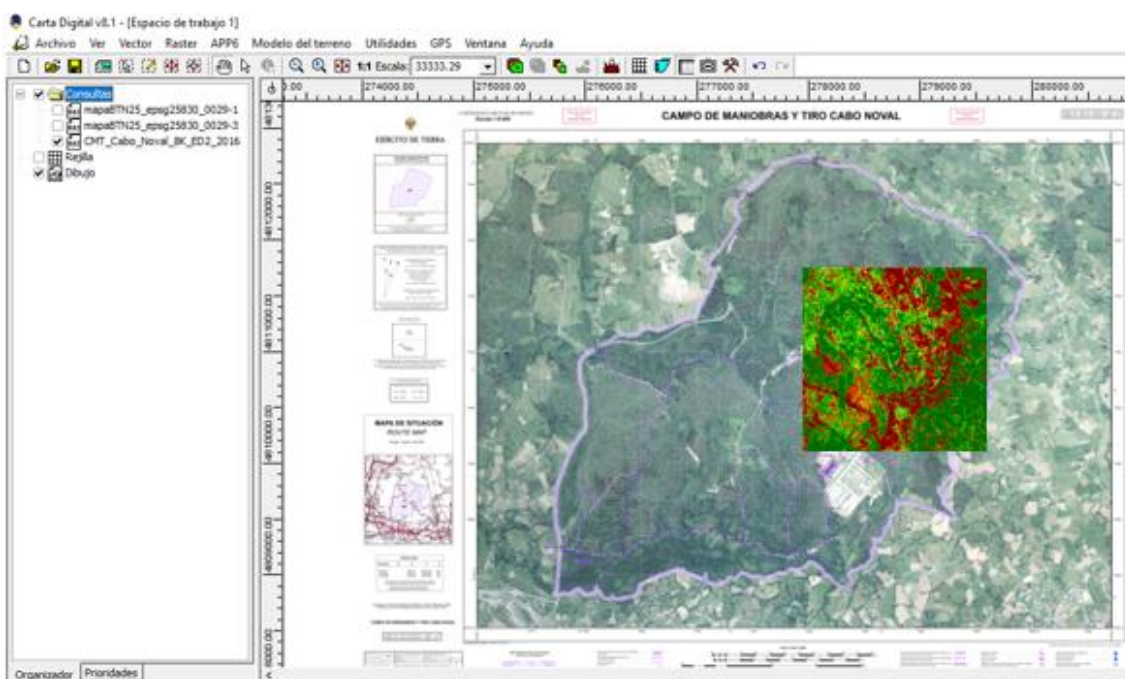


Figura 32 Implementación capa ráster en Carta Digital. Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El combate en bosque presenta una serie de particularidades entre las que destacan la



influencia sobre la visibilidad de los combatientes y la movilidad de las tropas. El conocimiento previo de la masa forestal puede ser clave para la planificación y el éxito de la operación. En este sentido, la disponibilidad de nubes de puntos capturadas con sistemas LiDAR aeroportados, tanto en España, como en otros muchos países, supone una importante ventaja de cara a caracterizar la estructura vertical y horizontal de la vegetación.

En este Trabajo Fin de Grado se ha hecho uso de datos LiDAR del PNOA, que son de baja densidad de puntos, para obtener un conjunto de productos cartográficos útiles, como el MDE, el MDS y el nMDS, y las capas de estratos de vegetación y la capa de frondosidad de una zona forestal del Acuartelamiento Cabo Noval (Asturias).

Los resultados obtenidos se pueden considerar satisfactorios, ya que se ha conseguido dar cumplimiento al objetivo principal marcado inicialmente, que era implementar el uso de datos LiDAR al combate en bosque. La capa ráster sobre frondosidad, la cual tiene en cuenta el tipo de estrato y el grado de cubrimiento vegetal, constituye un *input* destacable para analizar la transitabilidad y la visibilidad de la zona, siendo un avance metodológico para el correcto desarrollo de operaciones en terreno boscoso.

Así mismo, se han alcanzado cada uno de los objetivos parciales planteados. En primer lugar, se han identificado las necesidades de la Unidad relativas al mando y control en el combate en bosque, que han sido fundamentalmente, conocer la transitabilidad y visibilidad en función de la vegetación existente. En segundo lugar, se ha realizado un tratamiento de las nubes de puntos LiDAR para generar los productos cartográficos necesarios para la planificación del combate en bosque. Por último, se ha empleado la capa ráster de frondosidad en diferentes aplicaciones de uso táctico militar como Carta Digital o ATAK (Ver *Figura 32*).

Cabe destacar la posible integración del resultado obtenido en el presente trabajo con el estudio del terreno en las distintas operaciones del Ejército de Tierra, ya que se aporta un desarrollo metodológico que puede ser replicado en otros territorios que dispongan de datos LiDAR aeroportados. Este estudio del terreno finaliza con la obtención del superponible de obstáculos combinados (SOC) donde quedan reflejadas qué zonas no presentan ninguna dificultad para el movimiento, aquellas que presentan ciertas limitaciones al movimiento, y aquellas que son completamente inviables para el movimiento. Por ese motivo, sería de gran interés incluir los resultados obtenidos en el presente trabajo en el superponible de obstáculos combinados.

Como se puede observar en los resultados, la zona en la que se ha realizado el estudio presenta un elevado porcentaje de cubrimiento de herbáceo, así como un porcentaje mínimo de arbustivo, lo que implica que habrá una adecuada movilidad para personal a pie y relativos amplios campos de visión. Por otra parte, se tendrán en cuenta las zonas del terreno marcadas en tonos rojizos para poder ser usadas evitando la visión con el enemigo, pero también para sortearlas en caso de desplazamientos rápidos o con vehículos. Mediante la observación directa realizada sobre el terreno y tras la visualización de fotografías aéreas del área de estudio, se puede afirmar que los resultados obtenidos se aproximan considerablemente a la realidad.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, D. (2016) *FUSION: Un software para análisis y visualización de datos LiDAR, MappingGIS*. Disponible en: <https://mappinggis.com/2016/09/fusion-software-analisis-visualizacion-datos-lidar/> (Accedido: 22 de octubre de 2021).
- Centro Geográfico del Ejército de Tierra (2008) *Manual de Usuario Carta Digital Android*.
- Díaz, A. (2019) *Estructura de la vegetación*.
- Díaz, T. E. y Fernández, J. A. (1994) *Itinera Geobotánica*. León.
- Dirección General de Obras Públicas Sección de Cartografía (2019) *Manual de usuario LAS/LAZ Converter*.
- FAO (2020) *El estado de los bosques del mundo*. Editado por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- García, C. (2019) *Faro de Vigo*.
- Ibarra, P. y Yetano, M. (1989) «EL ESTUDIO DE LA VEGETACION EN GEOGRAFIA», en. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, pp. 165-174.
- Jong, W. (2008) «Bosques y conflictos», en *arborvitae*, pp. 7-10.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina (2015) *PD3-101 Combate generalizado*. Editado por Ejército de Tierra.
- McGaughey, R. J. (2008) *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Editado por United States Department of Agriculture.
- Milley, M. (2009) *ATP-3.2.1 Allied land tactics*.
- Ministerio de Defensa (2013) «Los Sistemas de Información y Telecomunicaciones y la Asistencia Técnica en el Ejército de Tierra», *Ejército de Tierra Español*, 873.
- Ministerio de Defensa (2014) «La OTAN se agiliza: Los aliados aprueban una fuerza de intervención rápida», *Revista española de Defensa*, 309.
- Ministerio de Defensa (2018) «ROTA, preparada para ser BASE ESTRATÉGICA DE LA UE», *Revista española de Defensa*, 350.
- Ministerio de Defensa (2019) «Unidad Militar de Emergencias», *Ejército*, 934, pp. 40-45.
- MITECO (2019) *Banco de Datos de la Naturaleza*.
- Pérez-Olivares, M. (2021) *Diez guerras y conflictos aún activos en 2021*.
- PNOA LiDAR (2009) *Instituto Geográfico Nacional*. Disponible en: <https://pnoa.ign.es/el-proyecto-pnoa-lidar> (Accedido: 22 de octubre de 2021).
- Ruzickova, K., Ruzicka, J. y Bitta, J. (2020) «A new GIS-compatible methodology for visibility analysis in digital surface models of earth sites», *Geoscience Frontiers*.
- TAK Product Center (2020) *ATAK Software User Manual*.