



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Análisis de la estructura de la cubierta vegetal en los campos abandonados de la Comarca del Matarraña mediante teledetección activa (LiDAR) y pasiva (Landsat)

Analysis of the vegetation cover structure in abandoned fields in the Matarraña region using active (LiDAR) and passive (Landsat) remote sensing

Sergio Romero Cabezudo

Director:

Juan de la Riva Fernández

Facultad de Filosofía y Letras
2020

Resumen

Actualmente la correcta gestión del medio ambiente y las investigaciones de carácter paisajístico son una cuestión de peso que vienen motivadas por los cambios en la mentalidad de la sociedad y los producidos en el propio medio ambiente, siendo estos un nicho de investigación para un geógrafo. La comarca de Matarraña es un claro reflejo de esta situación ya que, a lo largo de su historia, ha sufrido cambios en los usos del suelo traduciéndose en la existencia de parcelas abandonadas, que si no son gestionadas correctamente podrían poner en situación de riesgo el rico patrimonio paisajístico de la comarca. En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster tiene por objetivo continuar el análisis de la cobertura vegetal de estos campos abandonados realizado en el año 2019, pero desde una perspectiva estructural. El análisis realizado, basado en el uso de las técnicas de teledetección activa (LiDAR) y teledetección pasiva (Landsat), se basa en el tratamiento de la información LiDAR relativa a la comarca con el fin de integrarla en un entorno SIG y así poder combinarla con la información Landsat y otras variables explicativas. De esta forma se obtienen resultados cartográficos y relaciones estadísticas que permiten abordar una caracterización general de la estructura del cubrimiento vegetal en relación con otras variables e información espectral como los índices derivados del tratamiento de imágenes ópticas (NDVI, TTC). Por las razones citadas, este estudio tiene una fuerte componente territorial que se traduce en una posible vía de actuación en materia de ordenación territorial.

Palabras clave: *LiDAR, NDVI - TTC, teledetección, SIG, Comarca de Matarraña, estructura de la cobertura vegetal, percentil 99 y desviación típica.*

Abstract

Currently, the correct management of the environment and landscape research are a major issue that is motivated by changes in the mentality of society and those produced in the environment itself, being a research niche for a geographer. The Matarraña region is a clear reflection of this situation since, throughout its history, it has undergone changes in land use resulting in the existence of abandoned fields, which if not properly managed could put at risk the rich landscape heritage of the region. In this context, the present Master's Final Project aims to continue the analysis of the vegetation cover of these abandoned fields carried out in 2019, but from a structural perspective. The analysis carried out, based on the use of active remote sensing techniques (LiDAR) and passive remote sensing (Landsat), is based on the treatment of LiDAR information related to the region in order to integrate it in a GIS environment and thus be able to combine it with Landsat information and other explanatory variables. In this way, the cartographic results and statistical relations that are obtained allow to approach a general characterization of the structure of the vegetation cover in relation to other variables and spectral information such as the indices derived from the treatment of optical images (NDVI, TTC). For the above reasons, this study has a strong territorial component that translates into a possible way of action in terms of land management.

Keywords: *LiDAR, NDVI - TTC, remote sensing, GIS, Matarraña region, vegetation cover structure, 99th percentile, standard deviation.*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría darles las gracias a todos los compañeros del máster de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección por el apoyo brindado durante todo el transcurso del curso, puesto que sin su ayuda, sus conocimientos y el intercambio de opiniones e información hoy no estaría escribiendo estas líneas. En especial a mis compañeros y amigos Alejandro Moraleja, Esperanza Sancho, Sandra García y Pilar Bravo con los que no solo he tenido la suerte de compartir este máster, sino también el grado de Geografía.

En segundo lugar, querría destacar el apoyo y los consejos recibidos por Darío Domingo Ruíz, Raúl Hoffrén Mansoa, M. Teresa Lamelas Gracia y Estela Pérez Cardiel. Su implicación desinteresada y cercana ha resultado vital en algunos puntos del procesado de los datos LiDAR y en momentos de decisión de enfoque del proyecto, además de haberme brindado la posibilidad de comprobar como es el trabajo de campo con dron. Me gustaría agradecer de nuevo a Paloma Ibarra Benloch la facilitación de la cobertura de campos abandonados que utilicé en 2019 en mi Trabajo Fin de Grado y que continuó utilizando en el presente Trabajo Fin de Máster.

En tercer lugar, a mi director Juan de La Riva Fernández que desde tercero de carrera ha sido un referente para mí en la geografía y una persona que me ha animado a ser perseverante despertando así mi inquietud e interés por la investigación. También por confiar en mí y por animarme a realizar el doctorado.

Y en especial, quiero agradecerle a mi familia la confianza depositada en mi a lo largo de estos años y en especial en el transcurso del máster, sin ellos no hubiese llegado hasta este punto de mi vida.

Muchas gracias de corazón a todos.

Índice de contenidos

1. Introducción y justificación	1
2. El LiDAR en el contexto del análisis de la estructura de la cubierta vegetal	2
2.1 La combinación de la información LiDAR y Landsat en la determinación de la estructura vegetal.....	4
3. Objetivos	6
4. Área de estudio	7
5. Material y métodos	10
4.1 Metodología.....	13
4.1.1. Datos LiDAR empleados:.....	14
4.1.2. Tratamiento de los datos LiDAR.....	16
4.1.3. Cálculo de los estadísticos.....	18
4.1.4. Adecuación de la información LiDAR para el trabajo con la información óptica en parcelas.....	23
6. Resultados	25
6.1 Caracterización general de la estructura de las parcelas en el área de estudio .	27
6.2 Exploratorio de los datos relativos a la estructura de las parcelas abandonadas en la comarca de Matarraña.....	40
6.3 La estructura vegetal en relación con las variables explicativas:	44
7. Discusión	59
8. Conclusiones	60
9. Bibliografía	62
10. Anexo	66

Índice de figuras

Figura 1: Resumen del proceso metodológico. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.	14
Figura 2: Máxima actualidad de datos PNOA –LiDAR publicados en el área de estudio. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.	15
Figura 3: Gráfico explicativo del filtrado de los datos LiDAR. Fuente: Realización propia mediante LucidSpark.....	16
Figura 4: Las dataset tras el filtrado de las nubes de puntos. Fuente: Realización propia.	17
Figura 5: Función de peso de Kraus y Pfeifer, 1998.	17

Figura 6: Metodología empleada para la generación de métricas LiDAR. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.	19
Figura 7: Metodología empleada en el entorno SIG para la combinación de información. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.....	23
Figura 8: Superficie ráster de percentil 99 obtenida a partir de datos LiDAR. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.	24
Figura 9: Buffer negativo en las parcelas originales para mejorar la realización de las estadísticas. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.	25
Figura 10: Histogramas del percentil 99 para los años 2010 (izda.) y 2016 (dcha).	27
Figura 11: Histograma de los datos de desviación estándar para el año 2010 / 2016. ...	35
Figura 12: Número total de parcelas por estrato y porcentaje de cambio de parcelas entre los años 2010 y 2016. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.	40
Figura 13: Tipología de cambios en las parcelas según su estrato. Fuente: Realización propia mediante Lucidspark.	41
Figura 14: Distribución de la superficie (m2) por estratos en función del percentil 99. Año 2010. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.	42
Figura 15: Distribución de la superficie (r) por estratos en función del percentil 99. Año 2016. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.....	42
Figura 16: Altura ponderada por la superficie de las parcelas (percentil 99) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.	43
Figura 17: Realización del test de normalidad para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	44
Figura 18: Test no paramétrico de Kruskal Wallis. Fuente: XLSTAT.	45
Figura 19: Diagramas de dispersión (pendiente y percentil 99) para los años 2010 y 2016. Fuente: Realización propia.	45
Figura 20: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	46
Figura 21: Corrección de Bonferroni para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	46
Figura 22: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	47
Figura 23: Corrección de Bonferrani para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.	47
Figura 24: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	48

Figura 25: Corrección de Bonferroni para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	48
Figura 26: Realización del test de normalidad para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	49
Figura 27: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	49
Figura 28: Diagramas de dispersión (pendiente y percentil 99) para los años 2010 y 2016. Fuente: Realización propia.	50
Figura 29: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	51
Figura 30: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.	51
Figura 31: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	52
Figura 32: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.	52
Figura 33: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.....	53
Figura 34: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.	53
Figura 35: Gráficos de dispersión entre el percentil 99 (izda) y la desviación estándar (dcha) con el NDVI (junio 2018). Fuente: Realización propia.	54
Figura 36: Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.	55
Figura 37: Posición de los valores de percentil 99 respecto al NDVI por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.	56
Figura 38: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica), Unidades fisio – geomorfológicas. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.	66
Figura 39: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica), Vegetación y usos de suelo. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.....	66
Figura 40: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica) - Accesibilidad. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT. ...	66
Figura 41: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - vegetación. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.....	66

Figura 42: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.....	67
Figura 43: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - Accesibilidad. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.	67
Figura 44: Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.....	67
Figura 45: Posición de los valores de desviación estándar respecto al NDVI por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.	68
Figura 46: Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) - vegetación y usos del suelo. Fuente: Realización propia.....	68
Figura 47: Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) - vegetación y usos del suelo. Fuente: Realización propia.	69
Figura 48: Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia.	69
Figura 49: Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia.....	70

Índice de tablas

Tabla 1: Vegetación existente en el área de estudio por grandes dominios del paisaje. Fuente: Realización propia.	9
Tabla 2: Software empleado para la realización del Trabajo Fin de Grado. Fuente: Realización propia.	10
Tabla 3: Especificaciones técnicas de los vuelos y las nubes de puntos empleadas en la realización del proyecto. Fuente: Realización propia mediante información del PNOA – LiDAR.	15
Tabla 4: Modificadores de código empleados para la obtención de las métricas LiDAR en modo “grid”. Fuente: Realización propia.	21
Tabla 5: Métricas LiDAR obtenidas tras la ejecución del código. Fuente: Realización propia.	21
Tabla 6: Clasificación por tipos estructurales Braun – Blanquet, J. (1979). Fuente: Realización propia.	22
Tabla 7: Métricas LiDAR obtenidas tras la ejecución del código en función de los estratos definidos por Braun – Blanquet, J. (1979). Fuente: Realización propia.	22

Índice de cartografías

Cartografía 1: Cartografía de dominios de paisaje y localización de la comarca de Matarraña.....	7
Cartografía 2: Localización de las parcelas abandonadas en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.....	11
Cartografía 3: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo PNOA del año 2010, percentil 99.....	26
Cartografía 4: Altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Bajo Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.....	28
Cartografía 5: Altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Alto Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.....	31
Cartografía 6: Magnitud de cambio de la altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Comarca de Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.....	32
Cartografía 7: Variabilidad vertical de la cubierta según la desviación estándar. Bajo Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.....	34
Cartografía 8: Variabilidad vertical de la cubierta según la desviación estándar. Alto Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.....	37
Cartografía 9: Cambios en la variabilidad estructural vertical (desviación estándar). Comarca de Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.....	39
Cartografía 10: Relación NDVI (Junio 2018) - Percentil 99. Comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.....	57
Cartografía 11: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo del PNOA del año 2010. Ejemplo de la desviación estándar en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.....	71
Cartografía 12: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo del PNOA del año 2010. Ejemplo de la varianza en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.....	72
Cartografía 13: Unidades fisio - geomorfológicas en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.....	73

1. Introducción y justificación

El ser humano a lo largo de su historia ha variado enormemente la sensibilidad que tiene hacia el medio ambiente, siendo en la actualidad muy elevada. Pero esta dinámica actual es un hecho realmente reciente pues ha sido prácticamente en el último siglo cuando estas cuestiones se han puesto en alza y el paisaje y el medio ambiente han pasado a jugar un papel fundamental en muchos aspectos de la vida cotidiana y a ser amparados por numerosas instituciones y gobiernos.

Las razones por las que comienza a suceder esto es porque el paisaje y el medio ambiente son un reflejo del estado actual de un territorio y su comprensión permite derivar generalidades y numerosos estudios de diversa índole. Además, son unos recursos económicos realmente importantes, y en una época en la que actividades como el turismo buscan potenciar el patrimonio cultural y la puesta en valor de las características propias de una zona, el paisaje y el medioambiente se erigen como unos elementos fundamentales que, además, determinan enormemente la calidad de vida de las personas circunscritas a los mismos. Es en este contexto del análisis ambiental y paisajístico y de la correcta gestión del territorio donde se enmarca este Trabajo Fin de Máster y, concretamente lo hace en la comarca del Matarraña.

En la línea de una correcta gestión forestal se encuentran numerosos estudios y artículos en áreas contrastadas, y en concreto, para el área de estudio que compete al presente Trabajo Fin de Máster se encuentran antecedentes como la cátedra del Matarraña. Mediante esta iniciativa se produjo una colaboración entre la Universidad de Zaragoza y las entidades de la comarca que se tradujo en una serie de cartografías de parcelas abandonadas con el fin de una correcta gestión de las mismas y su puesta en valor (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015). Son estas parcelas las que se han utilizado como base tanto para el Trabajo Fin de Grado como para el presente Trabajo Fin de Máster.

El proceso de abandono de cultivos en la comarca de Matarraña se lleva sucediendo desde hace décadas siendo relevante el año 1984, que es el tomado como punto de partida para el estudio. Este abandono tiene una connotación negativa tanto desde la perspectiva socio – económica como desde la ambiental, pues muchos de estos cultivos podían actuar como cortafuegos (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015).

Teniendo esto en cuenta la comarca puso en marcha el proyecto denominado “*Banco de Tierras*” destinado a la recuperación de parcelas, con el objetivo de revertir la situación de abandono agrícola reduciendo el riesgo de posibles incendios y beneficiando así al paisaje recuperando paisajes agrarios tradicionales (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015). Es en este contexto de ordenación paisajística y del territorio donde los sistemas de información geográfica y la teledetección juegan un papel fundamental como herramientas que posibilitan la caracterización y la correcta gestión de estos espacios desde su uso reiterado desde los años 80 aproximadamente cuando revolucionaron la manera de operar sobre el territorio.

La selección del área de estudio viene motivada por la propia naturaleza del Trabajo Fin de Máster, pues este es una continuación del Trabajo Fin de Grado y por ello la comarca

de Matarraña será elegida como unidad de actuación. Además, se realizó trabajo previo en el grado sobre esta comarca con anterioridad y prácticamente no existen estudios de teledetección en este ámbito (Romero Cabezudo, S. 2019).

Por lo tanto, el presente Trabajo Fin de Máster se aborda desde una doble perspectiva, por un lado, se utilizará la información relativa al Trabajo Fin de Grado en el que fundamentalmente se trataban temas relacionados con la detección de cambios, el análisis de variaciones y el análisis ambiental (Romero Cabezudo, S. 2019). Sin embargo, en este Trabajo Fin de Máster se abordará, junto a los temas citados, el análisis de la estructura vegetal de las parcelas abandonadas en la comarca del Matarraña. De esta manera se pretende dar continuidad al estudio realizado en el año 2018 – 2019 realizando una ampliación del mismo mediante las técnicas de tratamiento de datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) obtenidas durante el transcurso del máster. De esta manera se podrán conocer con totalidad las parcelas abandonadas citadas de la cátedra del Matarraña con el objetivo de demostrar como los sistemas de información geográfica y la teledetección son capaces de jugar un papel relevante en este tipo de áreas temáticas.

Para llevar a cabo este objetivo se hará uso de información óptica tratada en el Trabajo Fin de Grado en el que fundamentalmente se hizo uso de los satélites Landsat 4-5, 7 y 8 junto con sus respectivos sensores ETM, ETM+ y OLI. Junto a esta información se tratarán los datos relativos al LiDAR en dos vuelos distintos y toda la información se integrará en un entorno SIG con el objetivo de crear una representación cartográfica que muestre la distribución y los cambios en estas parcelas y un exploratorio estadístico de los datos que permita inferir que variables ambientales o paisajísticas son las que juegan un papel determinante en la dinámica de dichas parcelas. De esta forma se pretende obtener un conocimiento global e integrador de esta problemática que afecta a la comarca de Matarraña con el fin último de obtener una serie de medidas que resulten eficaces en la gestión de este espacio.

2. El LiDAR en el contexto del análisis de la estructura de la cubierta vegetal

Conocida el área de estudio y las decisiones que han motivado la realización del presente Trabajo Fin de Máster, es necesario destacar el concepto de estructura vegetal. La estructura vegetal se entendida como la distribución espacial del tamaño, edad y especies de la vegetación, tanto viva como muerta (Pascual Castaño, 2006). Además, y en línea el ámbito donde se inscribe el Trabajo Fin de Máster, el análisis de la estructura constituye un aspecto fundamental en materia de desarrollo de estrategias o directrices para lograr una gestión forestal adecuada, (Montealegre Gracia, 2017). Por lo tanto, la estructura horizontal y vertical de la vegetación es un reflejo de la salud y la productividad de los árboles individuales, además mediante estas técnicas de tratamiento de los datos LiDAR se puede inferir el comportamiento en cuanto a la competitividad que tienen las diferentes especies o incluso a sus interacciones a la hora de capturar la luz solar u otros recursos (Carroll, 1980, Lowman and Rinker, 2004).

Las técnicas de teledetección en las que se utilizan los sensores ópticos pasivos junto con la teledetección activa (LiDAR) dan una serie de maneras eficientes de estimar la

dinámica general de la vegetación en un área de estudio determinada, puesto que se tiene en cuenta tanto información de la cubierta vegetal como su estructura. De la teledetección con sensores ópticos pasivos se pueden obtener numerosos índices de vegetación como el índice de vegetación diferenciada (NDVI) (Baret and Guyot, 1991) o el índice tasseled cap (TCT), una conversión de las bandas originales de una imagen en un nuevo set de bandas cuya interpretación no depende de la imagen, sino de unos coeficientes que resultan útiles para cartografiar y analizar vegetación (Crist, 1985, Mostafiz and Chang, 2018).

El problema de los métodos citados, y empleados en el Trabajo Fin de Grado, es que pueden verse alterados ya que son sensibles a las variaciones en las condiciones de iluminación traduciéndose en valores de saturación (Stark et al., 2016).

Por estas razones, actualmente, la tecnología LiDAR tiene una importancia más que relevante en los estudios de carácter ambiental ya que permite estimar parámetros estructurales de una manera eficiente (Moorthy et al., 2011). En consecuencia, el LiDAR es un método activo y que es independiente de las condiciones de iluminación y que además ofrece una visión y descripción mucho más detallada de la estructura vegetal posibilitando la visualización de las nubes de puntos en tres dimensiones (Montealegre Gracia., 2017).

Los datos LiDAR pueden ser obtenidos mediante sensores satelitales o aeroportados. En el caso de los aeroportados, estos sensores pueden ir montados sobre numerosos soportes. En concreto para el presente Trabajo Fin de Grado se hará uso de los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La razón por la que se ha optado por el uso del aeroportado frente al satelital es que el aeroportado ofrece una precisión mayor (Liang et al, 2016) y teniendo en cuenta que se pretende hacer un estudio sobre parcelas de tamaño muy dispar y situadas en dominios de paisaje contrastados, es necesario obtener la mayor precisión posible. Además, la existencia de los vuelos del PNOA para los años 2016 y 2018 en el área de estudio junto con la existencia de software específico como “*LiDAR Converter*” de la universidad de Navarra hacen que la información aeroportada sea rápidamente asequible y tratable.

A través del tratamiento de los datos LiDAR se puede cuantificar la estructura de la vegetación y como esta varía en el espacio y en el tiempo haciendo uso de diferentes métricas que puedan ser representativas de la complejidad vertical y horizontal (Hoe et al., 2018). Sin los datos LiDAR, realizar esta tarea mediante trabajo de campo puede ser realmente costosa en cuanto al tiempo que se emplea y el grado de error que se puede obtener si no se define una metodología de trabajo en campo adecuada. Por ello, el empleo de las técnicas de teledetección, y más concretamente del LiDAR, se postula como una manera eficaz de representación de la estructura forestal al poder realizar representaciones en tres dimensiones en numerosas escalas espaciales (Shi et al., 2018). Algunas de estas escalas pueden ser tanto para un árbol individual, como para el análisis por parcelas (Tooke et al., 2014), siendo este último el método que se va a emplear fundamentalmente en el Trabajo Fin de Máster.

Por lo tanto, la estructura vegetal se puede definir y estudiar mediante una serie de atributos obtenidos directamente del tratamiento de los datos LiDAR, siendo algunos de los más relevantes la cobertura, la altura u otros estadísticos como la desviación típica, los

percentiles o los diferentes estratos de estratos de vegetación. Estos estratos de vegetación se pueden obtener mediante clasificaciones previamente establecidas como la de Braun – Blanquet, J. (1979) que es la que se tomará como referencia en el presente Trabajo Fin de Máster.

En concreto se han tenido en cuenta para la realización del presente Trabajo Fin de Máster aquellas relacionadas con la altura (percentil 99), la variabilidad (desviación típica) y la densidad (total de primeros retornos por estrato definido) ya que de esta manera se obtiene una representación fiel de la estructura.

Pero no solo estas métricas son importantes, sino que existen numerosas métricas y atributos derivados de los datos LiDAR que permiten generar proyectos de investigación de diversa índole como algunos de los encaminados a la estimación de variables dasométricas y el contenido de carbono (Montealegre et al., 2016), el estudio de la biomasa o la estimación de la severidad del fuego mediante técnicas contrastadas en las que se realiza una combinación entre índices derivados de imágenes ópticas junto con información LiDAR (Montealegre et al., 2014).

2.1 La combinación de la información LiDAR y Landsat en la determinación de la estructura vegetal

Comprendida la importancia de las técnicas LiDAR en cuanto al análisis de la estructura, una de las principales razones que motivan la realización del presente Trabajo Fin de Grado se fundamenta en la combinación de la información óptica (imágenes de satélite Landsat 4-5, 7 y 8 junto con sus respectivos sensores) y la información derivada del tratamiento de las nubes de puntos LiDAR. Esto es debido a que las técnicas de teledetección en las que se utilizan los sensores ópticos pasivos junto con la teledetección activa (LiDAR) permiten, por un lado, tal y como se indicó anteriormente, el estudio de la cobertura vegetal, su distribución y su variabilidad temporal (Romero Cabezudo, S. 2019). Pero esta información junto con la información LiDAR que posibilita el análisis de la estructura de las parcelas deriva en un análisis que exhaustivo que tiene un carácter integrado y completo.

Son numerosos los autores que han empleado esta combinación de técnicas de teledetección para obtener resultados relacionados con una caracterización precisa de la estructura vegetal obteniendo resultados concluyentes (Xiaoxiao Zhu et al., 2020, HaoTang et al., 2020, LaRue, EA et al., 2018).

Por lo tanto, la teledetección es una técnica muy efectiva para la estimación de la cobertura a través de la realización de diferentes combinaciones de bandas que se traducen en neocanales. Teniendo en cuenta que las técnicas de teledetección son sumamente recientes, tradicionalmente se ha utilizado la información óptica para la realización de este tipo de estudios (Irons et al., 2012, Zarco-Tejada et al., 2014). Por esta razón, las diferentes métricas de vegetación se han obtenido durante mucho tiempo a partir de imágenes de satélite (Crist y Cicone, 1984). En concreto las métricas de verdor, humedad o NDVI, se utilizan para analizar la cobertura vegetal (Zheng y Moskal, 2009), tal y cómo se comprobó en el Trabajo Fin de Grado. Con estos neocanales se pueden realizar estudios a todo tipo de escalas espaciales y en numerosos ámbitos por lo que resultan vitales para la interpretación

y la predicción del funcionamiento de un ecosistema a diferentes escalas (Glenn et al., 2008), siendo el Trabajo Fin de Grado una escala de paisaje. Sin embargo, la comprensión de la información estructural representada en estos neocanales derivados de la combinación de diferentes bandas espectrales sigue siendo un desafío todo un desafío (Huete et al., 2002).

Esta tradición por la utilización únicamente de la información óptica para el estudio de la vegetación se ha traducido en numerosos estudios de cobertura vegetal, con resoluciones moderadas que pueden ir de los 10 a los 30 metros en imágenes Landsat, y en parte motivados por las numerosas políticas de “*open data*” que ofrecen numerosas instituciones en materia de teledetección, como por ejemplo el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Desde estas instituciones es sencillo acceder a la información y a los datos brutos a los que hacer transformaciones previas o incluso cada vez es más habitual encontrar imágenes de satélite que ya tienen datos de reflectividad con la atmósfera y la influencia topográfica corregida (Hansen and Loveland, 2012).

Sin embargo, tal y como se ha citado con anterioridad la estimación de diferentes parámetros, tales como la altitud, pueden presentar ciertos problemas de precisión debido a la enorme sensibilidad que tienen las imágenes ópticas a factores topográficos. También hay que tener en cuenta que puede existir ruido en las imágenes, incoherencias geométricas, de una baja calidad radiométrica o en regiones con pocos bosques, paisajes fragmentados o lugares donde la transición entre zonas de vegetación no es clara (Song et al., 2014).

Por lo tanto, la combinación de los datos provenientes del LiDAR aeroportado, y, por lo tanto, sistemas de teledetección activa, junto con los datos de las imágenes ópticas, en este caso de la familia Landsat, resulta muy útil debido a la combinación de los datos tridimensionales con la información espectral de los diferentes neocanales resultantes de la combinación de bandas Landsat. De esta forma se podrán realizar análisis que muestren si un mayor vigor vegetal (a través de los valores de NDVI o verdor) se corresponde con un estrato de vegetación de una altura mayor entre otras muchas consideraciones.

3. Objetivos

El principal objetivo que se persigue en el presente trabajo es el análisis de la estructura de la cubierta vegetal de las parcelas abandonadas en la comarca de Matarraña, analizada a partir de los datos de los vuelos LiDAR – PNOA. Junto a este objetivo, se busca combinar dicha información con el análisis dinámico de los cambios experimentados en el recubrimiento vegetal de los campos de cultivo abandonados en la comarca del Matarraña en el periodo 1984 – 2018. Dicha información fue tratada en el Trabajo Fin de Grado debido a que estos campos de cultivos abandonados estaban sujetos a un proceso de revegetación que aún no había sido suficientemente evaluado.

El área de estudio, que, como gran parte del medio rural, ha sufrido importantes cambios en la ocupación del suelo en las últimas décadas, encierra un rico patrimonio paisajístico ligado al cultivo tradicional en bancales (Romero Cabezado, S. 2019). Tal y como se indicó en la introducción, la Cátedra Matarraña-Matarranya abordó un análisis cartográfico de estas parcelas de cultivo abandonadas, sobre las que existe un interés patente por su posible recuperación y puesta en valor, que se tradujo en una cartografía de las mismas (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015), que es utilizada como marco de referencia para el presente trabajo.

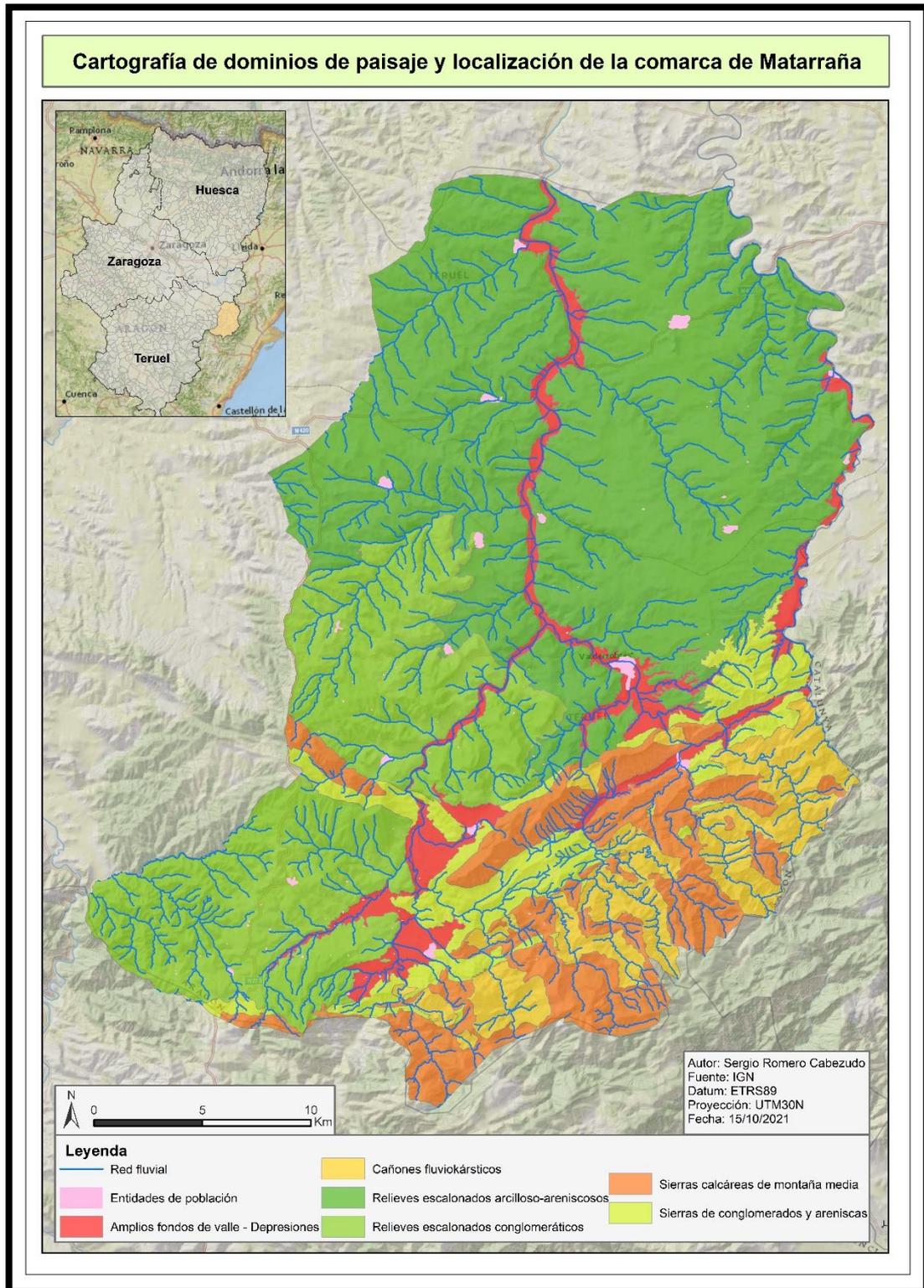
Si en el Trabajo Fin de Grado se partía de la hipótesis de que, en el contexto metodológico de las técnicas de detección de cambios mediante tratamiento multitemporal de imágenes de teledetección, *“la aplicación de índices espectrales –especialmente los relativos al vigor vegetal y a la humedad– eran capaces de reflejar de forma muy ajustada la cobertura vegetal”* (Romero Cabezado, S. 2019), en este caso, las técnicas de tratamiento de datos LiDAR podrán ofrecer datos precisos sobre las características estructurales de la cubierta vegetal de campos de cultivo abandonados.

De esta manera la parte estructural que en el anterior Trabajo Fin de Grado se dejaba de lado por no tener conocimientos de LiDAR, puede al fin ser integrada y abordada en su conjunto. Junto a la información de teledetección espacial, el trabajo se sirve del análisis de diversa información en entorno SIG, generándose resultados tanto estadísticos como cartográficos que permiten una aproximación a la comprensión de los cambios observados.

El objetivo perseguido se materializa en una serie de etapas metodológicas – tareas: a) definición y aplicación de un proceso metodológico que permita la obtención de métricas LiDAR para las parcelas abandonadas; b) identificación y elaboración de los procesos de análisis y visualización más adecuados para la cartografía de los cultivos abandonados en los dos vuelos realizados por el PNOA; c) extracción de métricas LiDAR representativas de la estructura y de los estratos en función de la cartografía de los campos abandonados y de sus atributos (municipio, unidad paisajística, cubierta vegetal, accesibilidad...); d) combinar la información óptica del Trabajo Fin de Grado con las métricas obtenidas; e) realizar una interpretación de los cambios ocurridos que pueda contribuir a las iniciativas de ordenación territorial y paisajística de una manera más ajustada y concisa respecto al Trabajo Fin de Grado.

4. Área de estudio

El apartado que se presenta a continuación es similar al presentado en el Trabajo Fin de Grado, pero se han introducido algunas modificaciones en las diferentes descripciones y en la cartografía (**cartografía 1**) con el fin de obtener un apartado mejorado.



Cartografía 1: Cartografía de dominios de paisaje y localización de la comarca de Matarraña.

El área de estudio se corresponde con un ámbito comarcal, en concreto la comarca del Matarraña. La razón para la selección de esta comarca viene fundamentada por la naturaleza del Trabajo Fin de Grado, ya que como se indicaba con anterioridad este es una continuación del mismo, así como por la abundante información disponible en materia de paisaje debido a la cátedra del Matarraña citada anteriormente. Además, ofrece numerosos contrastes entre la parte norte y Sur de la comarca por lo que estudiar los patrones en la distribución de la estructura de la vegetación y comparar los diferentes vuelos del PNOA resulta interesante ya que no existen estudios previos con datos LiDAR a nivel de comarca.

Dicha comarca se localiza en el sector Sur – Sureste de la provincia de Teruel, limitando con Castellón y Tarragona. Lo más destacado de la comarca es que existen ciertos sectores muy diferentes entre sí con un claro gradiente Norte – Sur denominados bajo y Alto Matarraña respectivamente (Benavente Serrano, J et al. 2003). Tiene una superficie total de 933 km² (**Cartografía 1**) y se encuentra incluida dentro del dominio morfoestructural del sistema ibérico caracterizado por ser un relieve más monótono y menos enérgico que los pirineos, aunque con una elevada complejidad y compartimentación.

La fisiografía de la comarca del Matarraña está caracterizada por la existencia de una serie de sierras en la zona Sur con una dirección de relieve dominante SE – S. En esta zona elevada los puntos más elevados corresponden a los Puertos de Beceite que tienen una altura aproximada de 1.400 m sobre el nivel del mar, pero sin sobrepasarlos, en concreto algunos de ellos son el Tossal d'en Canader (1.393 m) o Tossal dels Tres Reis (1.361 m) (Benavente Serrano, J et al. 2003).

Pese a ello, de forma generalizada en su conjunto esta comarca puede ser entendida como un conjunto de escalones que se levantan dirección Norte - Sur desde Mazaleón hasta los puertos de Beceite citados en el párrafo anterior alcanzando en la comarca en su conjunto una altitud media de 580 m sobre el nivel del mar.

Teniendo esto en cuenta, predomina el clima mediterráneo lluvioso con veranos secos y calurosos que predominan en la parte Norte y que según la clasificación de Köppen pertenecen al grupo Csa. Por otra parte, y tal y como se aprecia en la **Cartografía 1** existen fuertes diferencias entre esta parte Norte de la comarca y la Sur donde se aprecia un gradiente altitudinal que se traduce en la existencia de otro tipo de clima en algunos municipios como el de Peñarroya de Tastavins donde se pueden encontrar climas templados – húmedos con veranos con veranos cálidos y calurosos que entran en el grupo de los Cfb.

Continuando con las precipitaciones, estas por lo general oscilan en torno a los 700mm y la temperatura media oscila entre los 12° (Peñarroya de Tastavins y las zonas montañosas del Sur) y los 17 – 19° de los municipios pertenecientes a la parte más llana del sector Norte como por ejemplo Calaceite.

Otro de los aspectos fundamentales es la red hidrográfica, en la que destacan con disposición Sur – Norte los ríos Matarraña y Algars siendo este último un factor determinante para la distinción de la frontera entre Aragón y Cataluña.

Finalmente, y en cuanto a la vegetación, hay que destacar que viene influenciada por algunos factores explicativos de la vegetación en esta unidad morfoestructural como la disposición diagonal de la ibérica aragonesa y la fuerte actividad agrícola que hace que esté por norma general degradada.

Teniendo esto en cuenta los pisos bioclimáticos presentes se corresponden en primer lugar con el piso mesomediterráneo representado por encinares, matorrales aromáticos, pastizales leñosos y zonas degradadas por la actividad agrícola junto con la vegetación de ribera. En segundo lugar, en el piso supramediterráneo se encuentra dominado por los encinares, robledales y zonas con pino carrascos. Además, entre estos dos pisos se podrían dar zonas con quejigares.

En cuanto a la vegetación existente por dominios de paisaje destacan en la **tabla 1** los siguientes:

Sierras calcáreas de montaña media	pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>), pino laricio (<i>Pinus nigra</i>), encina (<i>Quercus ilex</i>), coscoja (<i>Quercus coccifera</i>), enebro (<i>Juniperus oxycedrus</i>), sabina negral (<i>Juniperus phoenicea</i>), pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>) y boj (<i>Buxus sempervirens</i>).
Sierras de conglomerados y areniscas	pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>), pino laricio (<i>Pinus nigra</i>), coscoja (<i>Quercus coccifera</i>), enebro (<i>Juniperus oxycedrus</i>) y sabina negral (<i>Juniperus phoenicea</i>).
Relieves escalonados arcilloso – areniscosos	olivos (<i>Olea europaea</i>), almendros (<i>Prunus dulcis</i>) y pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>).
Cañones fluviokársticos	pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>), pino laricio (<i>Pinus nigra</i>), encina (<i>Quercus ilex</i>), coscoja (<i>Quercus coccifera</i>), enebro (<i>Juniperus oxycedrus</i>) y sabina negral (<i>Juniperus phoenicea</i>).
Relieves escalonados conglomeráticos	pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>) y pino laricio (<i>Pinus nigra</i>).
Amplios fondos de valle – depresiones	olivos (<i>Olea europaea</i>), almendros (<i>Prunus dulcis</i>), álamos negros (<i>Populus nigra</i>), sauces (<i>Salix sp.</i>), fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) y olmos (<i>Ulmus minor</i>).

Tabla 1: Vegetación existente en el área de estudio por grandes dominios del paisaje. Fuente: Realización propia.

5. Material y métodos

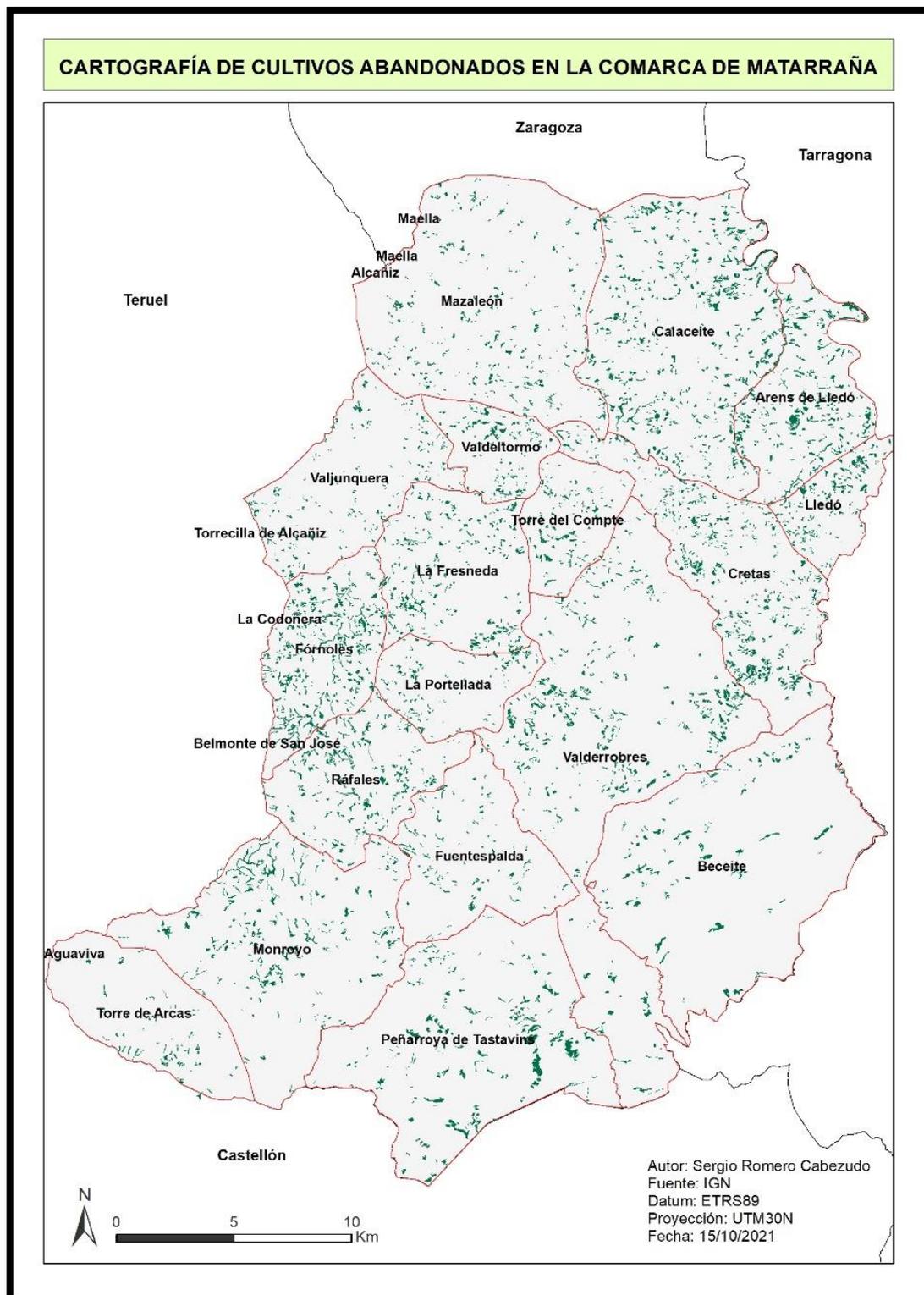
El trabajo en rasgos generales se basa en la utilización de las nubes de puntos LiDAR con el fin de obtener métricas variadas que permitan crear una radiografía de la estructura vegetal a nivel comarcal para poder llevar esa información a nivel de parcela y poder fusionarla con la información óptica ya obtenida previamente. Para poder llevar a cabo esta tarea se ha utilizado software variado en función de las necesidades que se han ido encontrando a lo largo de la realización del Trabajo Fin de Máster.

En cuanto al software empleado, este queda representado en la **tabla 2**:

<i>LiDAR Converter</i>	Herramienta creada por el gobierno de Navarra que permite de manera sencilla y sin la realización de código la descompresión de los archivos “.laz” en “.las”.
<i>FugroViewer</i>	Software gratuito de fácil manejo que ha resultado de vital interés para la exploración de las nubes de puntos y para la visualización en 3D de algunas parcelas determinadas.
<i>FUSION</i>	Elaborado por el Servicio Forestal de Estados Unidos este software gratuito ha sido el fundamental para la realización del proyecto pues su uso mediante comandos es realmente eficaz y ofrece numerosas aplicaciones y “switches” con los que adaptar el análisis de los datos LiDAR a los requerimientos de cualquier usuario. Gracias a él se han obtenido las métricas tanto de manera general como por estratos.
<i>LasTools</i>	Mediante esta herramienta que se puede introducir en ArcMap como una caja de herramientas más se ofrecen posibilidades similares a las del anterior software y su uso ha dependido fundamentalmente de si había problemas debido a la capacidad de procesamiento de los datos con FUSION.
<i>ArcMap 10.7.1</i>	Mediante este software repleto de aplicaciones de carácter espacial se han podido obtener ciertos estadísticos y se han realizado procesos de geoprocésamiento con el que obtener los rásters con información LiDAR y óptica y poder realizar el traslado de la información a las parcelas necesarias.

Tabla 2: Software empleado para la realización del Trabajo Fin de Grado. Fuente: Realización propia.

La información sobre la que se fundamenta el Trabajo Fin de Máster son los campos de cultivo abandonados tal y como se indicó en el apartado introductorio. Dicha capa fue proporcionada por la profesora Paloma Ibarra como parte del proyecto de la cátedra del Matarraña. En la **cartografía 2** se puede comprobar la disposición de las parcelas que se corresponden con los campos de cultivo abandonados en la comarca de Matarraña.



Cartografía 2: Localización de las parcelas abandonadas en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.

Dichos campos de cultivo fueron digitalizados a una escala 1:10.000 a través de fotointerpretación comparando fotografías aéreas de los años 1984 y 2009 en combinación con sistemas de información geográfica y el Visor 2D del Sistema de Información Territorial de Aragón (SITAR). Por lo tanto, en la capa se incluyen los cultivos abandonados desde hace más de 20 años junto con los abandonados recientemente, enriqueciendo de esta manera la información y posibilitando la comprensión de la dinámica de abandono actual (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015).

En cuanto al resto de fuentes de información empleadas, en primer lugar, hay que destacar información relativa al LiDAR y a los diferentes tratamientos que se pueden realizar con los datos que brindan estos sensores activos y que son la base sobre la que se fundamenta el trabajo. En este sentido varios artículos han sido relevantes de cara a enfocar el Trabajo Fin de Máster debido a que como se detallará más adelante, al trabajar a nivel comarcal y ser las parcelas tan dispares en tamaño y en localización, se han tenido que tener en cuenta ciertas consideraciones. De esta manera, para lograr las métricas finales derivadas de LIDAR, se ha hecho uso de algoritmos de procesamiento LIDAR y de software dividiendo cantidades sustanciales de puntos LIDAR en varios bloques de datos (Pu et al., 2011) con el fin de reducir y rasterizar los datos LIDAR y poder expresarlos como un ráster continuo a nivel de comarca (Mongus y Zalik, 2012). De esta manera se ha podido hacer uso de todas las nubes de puntos y se ha conseguido agilizar el procesado de los datos que parcela a parcela hubiera resultado poco eficiente.

Finalmente, y en consonancia con la idea anterior, la principal fuente de información para el manejo de los datos LiDAR ha sido el manual de “*Fusion*”, el software citado con anterioridad. Mediante este manual se pueden obtener consejos útiles que permiten adaptar los códigos del programa a las necesidades requeridas para los numerosos enfoques que se pueden realizar con datos de este tipo como el de trabajar en bloques de nubes de puntos LiDAR y realizar procesos de rasterizado.

Nuevamente se ha hecho uso de la información brindada a lo largo del máster en materia de tratamiento de imágenes de satélite, pues la información relativa a los diferentes neocanales que se van a emplear a lo largo del proyecto resulta de vital importancia. Adicionalmente se ha hecho uso de “*Fundamentos de la teledetección ambiental*” de Emilio Chuvieco (2010), que, junto a otras de sus obras consultadas, constituyen fuente de información básica en materia de teledetección.

En cuanto a la información óptica, esta proviene del Trabajo Fin de Grado realizado en 2019 con una serie de pequeñas modificaciones en los datos, tal y como se detallará más adelante. Fundamentalmente se ha hecho uso de los satélites Landsat 4 - 5,7 y 8 que cuentan con sus respectivos sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) y *Operational Land Imager* (OLI). Dicha información se obtuvo del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) mediante el visor Earth Explorer con el objetivo de realizar un estudio de la dinámica del recubrimiento vegetal en el Matarraña (Romero Cabezado, S. 2019).

Por otro lado, los datos LiDAR han sido obtenidos del instituto geográfico nacional en su gran mayoría y se corresponden con los vuelos del PNOA del año 2010 y de los del

año 2016-2018 que por suerte están procesados y disponibles para la totalidad de la comarca de Matarrña. En el caso de que alguna nube de puntos resultase problemática o se hubiera detectado algún tipo de error se ha acudido al IDE Aragón donde se han podido obtener las nubes que desde el Instituto Geográfico Nacional resultasen inaccesibles. Las ortofotos, modelos digitales de elevaciones, así como la información relativa al área de estudio (delimitación y base topográfica nacional 1:25.000) nuevamente han sido obtenidas del instituto geográfico nacional.

Finalmente es necesario destacar que la cobertura sobre la que se fundamenta el grueso del estudio, los campos abandonados en la comarca del Matarrña, fue facilitada por el equipo de Mastergeo, S.L. del proyecto titulado “*Cartografía de cultivos abandonados y selección de áreas prioritarias de recuperación en la Comarca del Matarrña/Matarranya*” (Ibarra et al., 2011) y que sirvió como apoyo fundamental para el estudio de la información óptica a nivel de parcela (Romero Cabezudo, S. 2019).

4.1 Metodología

En cuanto a la metodología del presente Trabajo Fin de Máster hay que destacar que fundamentalmente se parte del Trabajo Fin de Grado titulado “*Análisis ambiental y detección de cambios en el recubrimiento vegetal de la comarca del Matarrña mediante teledetección y SIG: Dinámica multitemporal en los campos abandonados (1986/2018)*” (Romero Cabezudo, S. 2019). En dicho trabajo se realizó un estudio multitemporal (1984/2018) y multiestacional (junio/agosto-septiembre) que se fundamentó en una selección adecuada de imágenes de los satélites citados en el apartado de fuentes de información para hacerles un tratamiento posterior mediante el cual obtener una serie de índices o neocanales tanto dependientes de la imagen, como independientes (NDVI, NDWI y análisis Tasseled Cap) con el objetivo de observar si había cambios en cuanto al recubrimiento de la comarca de Matarrña. Estos datos se incluyeron en las parcelas y se observó dicho comportamiento en escala de mayor detalle y en relación con otros factores como la proximidad a vías de comunicación, el dominio de paisaje o las pendientes.

Pero en el anterior proyecto no se tuvo en cuenta la estructura de la vegetación y solo se atendió al recubrimiento vegetal a grosso modo, por lo que la metodología fundamental de este Trabajo Fin de Grado es realizar una ampliación del estudio de 2019 en el que ya se obtenían resultados interesantes y esclarecedores que ponían de manifiesto un avance significativo en el recubrimiento vegetal (Romero Cabezudo, S. 2019) y comprobar si la estructura también ha jugado un papel relevante en esta dinámica de cambio constante.

Por ello, la metodología general de trabajo ha consistido en la búsqueda de información LiDAR PNOA para el año 2010 y la comprobación de si existía, para la totalidad de la comarca, información relativa a los vuelos del 2016 y 2018 que no se encuentran actualmente disponibles para todo el territorio. Tras una búsqueda previa y una descarga de la información se ha realizado el tratamiento pertinente, descrito más adelante, y se ha definido la metodología de trabajo en relación con las parcelas. Finalmente uniendo la información obtenida de los datos LiDAR y junto con la información óptica derivada del estudio de 2019 a nivel de parcela, se han obtenido una serie de cartografías, estadísticos y

gráficos que permiten conocer con propiedad la situación real de la comarca respecto a su cubrimiento vegetal, su evolución y su estructura; todo ello relacionado con diferentes factores como los citados anteriormente.

Para conocer con propiedad la situación de la comarca, se ha realizado un cruce de la información óptica junto con la información derivada de las métricas LiDAR con el fin de si existían relaciones estadísticas entre dos técnicas de teledetección tan contrastadas.

Finalmente, se muestra a continuación un cuadro resumen (**figura 1**) de los diferentes apartados metodológicos que se han ido sucediendo para la realización del trabajo descrito que fundamentalmente se basa en el tratamiento de datos LiDAR y su combinación con información óptica a nivel de parcela para extraer diferentes conclusiones en cuanto a la vegetación del área de estudio.

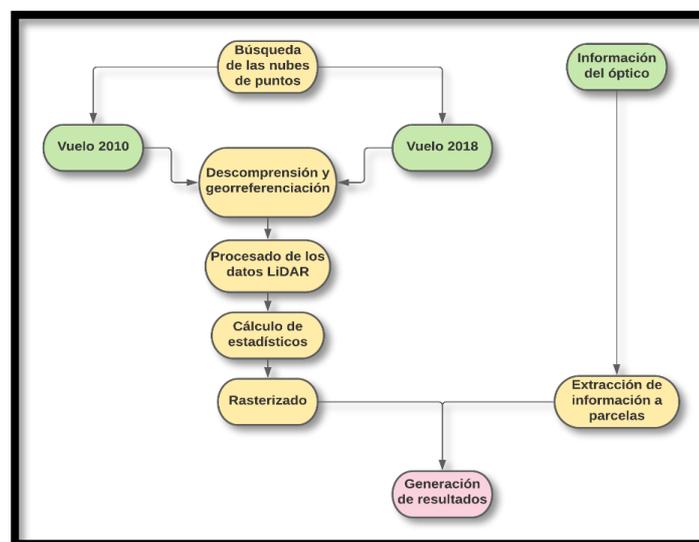


Figura 1: Resumen del proceso metodológico. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.

4.1.1. Datos LiDAR empleados

El LiDAR es un sistema activo de teledetección que se fundamenta en la medición del tiempo entre la emisión de un pulso y la recepción del eco o retorno en función de las diferentes cubiertas de la superficie terrestre. Además, gracias a su distanciómetro se puede conocer la altura y las coordenadas geográficas, aunque estas vienen determinadas por una serie de factores (sensor, ángulo de escaneo... etc.) (Hao et al, 2000). En concreto en este proyecto se han empleado los datos del proyecto PNOA-LiDAR que busca cubrir todo el territorio español con datos LiDAR mediante el uso de sensores aerotransportados para tener datos disponibles de gran precisión con los que abordar estudios de todo tipo como la obtención de MDE precisos o la creación de modelos de combustible entre otros muchos usos (Instituto Geográfico Nacional).

Se han utilizado los datos referidos a los vuelos de 2010 y 2016 puesto que atendiendo a la **figura 2**, se puede comprobar como la totalidad de la comarca de Matarraña tiene datos de máxima actualidad publicada de hasta el año 2018 por lo que se podrá hacer un uso comparativo de ambas cubiertas y evaluar los cambios en la estructura vegetal en 6 años.

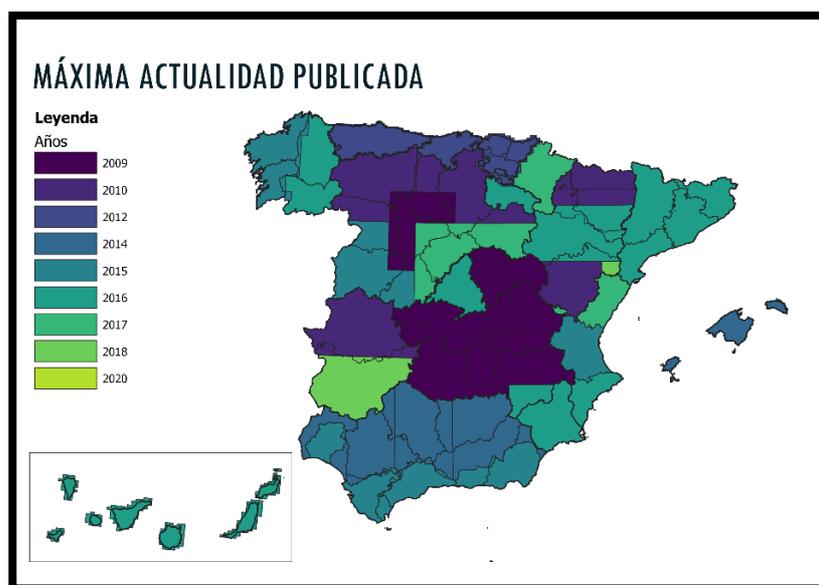


Figura 2: Máxima actualidad de datos PNOA –LiDAR publicados en el área de estudio.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Aunque el análisis es por parcelas, estas se reparten a lo largo de toda la comarca del Matarraña por lo que para realizar un correcto análisis se ha optado por la descarga sistemática de todas las nubes de puntos que componen la comarca. Para agilizar este proceso y asegurar que en la descarga no se perdía ningún fichero se ha cargado el shape de “información de pasadas” (para la primera y segunda cobertura) que se puede descargar como información auxiliar junto al shape de “primera y segunda cobertura” y se ha realizado un clip con el área de estudio. De esta manera, cargando dicho shape en el buscador del instituto geográfico nacional, la descarga de los ficheros LAZ es mucho más ágil.

En cuanto a las características de los vuelos, cuyas nubes de puntos han sido empleadas en la zona del Matarraña, estas quedan detalladas en la **tabla 3** mediante la cual se puede comprobar como entre agosto y enero de 2011 quedo realizado el primer vuelo y como entre octubre y noviembre de 2016 y septiembre de 2018 se realizó el segundo de los vuelos. Entre otras características destacan las variaciones en cuanto a la exactitud y la precisión y el número de nubes de puntos empleadas fruto de los cambios en la distribución de las hojas.

Características	Vuelo 2010	Vuelo 2016
Sensor	Leica ALS50	Leica ALS80
Densidad	0.5 puntos m2	0.5 puntos m2
Proyección cartográfica	ETRS89 UTM 30/31N	ETRS UTM 30/31N
Altitud empleada	Ortométrica	Ortométrica
Distribución de hojas	8x8 de las hojas MTN50 oficiales	2x2 Kilómetros
Fecha de vuelo	Agosto 2010 - Enero 2011	Octubre - Noviembre (2016) ARA C/ septiembre (2018) ARA SE
Ficheros empleados	396	298
Exactitud altimétrica	RMSE <= (0.2 - 0.4)m	RMSE <= (0.15 - 0.2)m
Precisión altimétrica	RMSE <= (0.2 - 0.4)m	RMSE <= (0.15 - 0.2)m

Tabla 3: Especificaciones técnicas de los vuelos y las nubes de puntos empleadas en la realización del proyecto. Fuente: Realización propia mediante información del PNOA –LiDAR.

4.1.2. Tratamiento de los datos LiDAR

En cuanto al tratamiento de los datos hay que destacar que se han seguido una serie de fases de manera sistemática antes de proceder con el cálculo de estadísticos, estas fases quedan recogidas en la **figura 3** donde se puede comprobar con facilidad el proceso metodológico empleado.

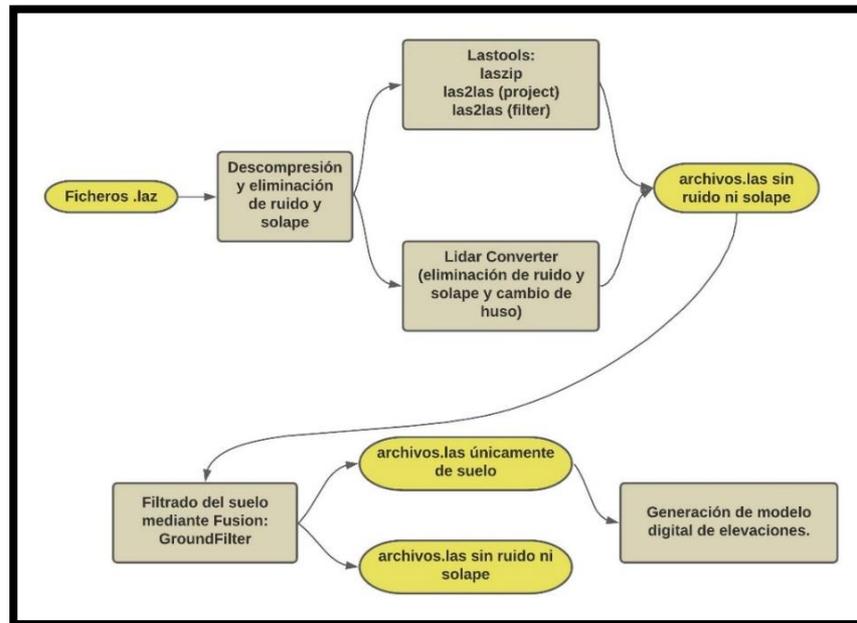


Figura 3: Gráfico explicativo del filtrado de los datos LiDAR. Fuente: Realización propia mediante LucidSpark.

El primer paso consistió en cambiar el sistema de coordenadas de los ficheros LAZ de 2010 y 2016 que estaban en el huso 31N para trabajar enteramente en el 30N. Para ello se acudió a RStudio para utilizar un script con el paquete “*lidR*” y la función “*lastransform*” pero en la última versión de este paquete dicha función quedó inhabilitada por lo que se acudió al software LiDAR Converter anteriormente citado. Mediante esta herramienta no solo se han podido descomprimir los archivos LAZ de manera sistemática, sino que se ha podido elegir cuales son las clases a exportar y definir el sistema de coordenadas de salida para los ficheros que así lo requiriesen.

En cuanto a las clases elegidas para exportar, se ha optado por exportar todas a excepción de la 7 y la 12 que hacen referencia al ruido y al solape para de esta manera evitar errores. En algunas de las nubes de puntos que no se ha conseguido realizar este proceso, mediante el software citado, se ha empleado Lastools y concretamente la herramienta *las2las(filter)*. De esta manera todos los archivos .las han partido sin estas dos clases. El siguiente paso consistió en el uso de la herramienta “*Groundfilter*” en FUSION con el objetivo de generar ficheros .las que únicamente se compusieran de la clase suelo para posteriormente utilizar estos archivos en la creación de un modelo digital de elevaciones.

La sintaxis del código necesario para la utilización de esta herramienta es la siguiente:

“GroundFilter [switches] outputfile cellsize datafile1 datafile2 ...”

Esta herramienta demanda los ficheros sin ruido y solape y mediante el establecimiento del directorio de salida y un tamaño de celda que usa para cálculos intermedios y que no es representativo de los rásters que se generarán en cálculos posteriores, adicionalmente se demanda el valor W para la ecuación de pesos que se va a explicar a continuación y que toma el valor de 2. Además, hay que indicarle la clase suelo, que en este caso es 2. En definitiva, lo que se consigue es obtener únicamente los puntos de clase suelo (figura 4).

Clasificación	Conteo de puntos	%	Z Mín.	Z Máx.	Intensi...	Intensi...	Conteo...
1 Sin asignar	264,192	0.16	265.52	1361.47	4	255	0
2 Terreno	161,494,098	99.69	241.03	1390.82	2	255	0
3 Vegetación baja	97,828	0.06	257.58	1352.59	4	255	0
4 Vegetación media	77,968	0.05	267.63	1353.11	0	65535	0
5 Vegetación alta	52,588	0.03	303.73	1351.88	0	65535	0
6 Edificio	16,171	0.01	308.10	1353.13	0	65535	0

Figura 4: Las dataset tras el filtrado de las nubes de puntos. Fuente: Realización propia.

Para conseguir esto se utiliza un algoritmo de filtrado. Este es una modificación del algoritmo de filtrado basado en la interpolación de superficies de Kraus y Pfeifer, 1998 y se basa en la predicción lineal de Kraus y Mikhail de 1972. Lo que fundamentalmente se realiza es un análisis iterativo en el que se genera una superficie con pesos iguales para los puntos LiDAR que queda entre el suelo real y el dosel vegetal y en función de la situación por encima o por debajo de los puntos en relación con la línea imaginaria se aplica una función de peso (figura 5) de manera iterativa y a cada punto individualmente.

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a(v_i - g)^b)} & g < v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases}$$

Figura 5: Función de peso de Kraus y Pfeifer, 1998.

En la función, los parámetros a y b son los que determinan la inclinación en función del peso, normalmente sus valores son 1 y 4 respectivamente. El valor g determina cuales son los puntos que van a tener peso máximo y el valor W, anteriormente citado, es el que se utiliza para establecer un límite superior para que los puntos tengan influencia en la superficie intermedia. En definitiva, los puntos que queden por encima de la superficie intermedia y del valor W tienen poca influencia sobre la forma de la superficie mientras que los que estén por debajo son los que tendrán mayor influencia y se les asignará más peso puesto que sus residuales serán negativos. Si bien en 1998 Kraus y Pfeifer utilizaron unos procesos iterativos que hacían variar los valores de g y w en las diferentes iteraciones, en este caso este valor es fijo durante todo el proceso. Tras la iteración final, los puntos que satisfacen las condiciones de los valores g y w son los que se seleccionan como suelo.

Tras el cálculo y el filtrado de la categoría de suelo se ha procedido a la generación de un modelo digital de elevaciones. En cuanto a la creación de dicho modelo, se parte únicamente de los ficheros que únicamente contienen información de superficie y se utiliza la herramienta “*Gridsurfacecreate*”. Esta herramienta genera MDT de manera continua mediante puntos aleatorios y la elevación de la celda viene determinada por la elevación media de todos los puntos de suelo que convergen en dicha celda.

La sintaxis del código necesario para la utilización de esta herramienta es la siguiente:

```
“GridSurfaceCreate [switches] surfacefile cellsize xyunits zunits coordsys zone  
horizdatum vertdatum datafile1 datafile2...”
```

Esta herramienta demanda los ficheros .las filtrados con la clase suelo y un directorio de salida donde se almacenarán los archivos en formato .dtm. Adicionalmente habrá que establecer un tamaño de pixel que en este caso para el presente estudio se ha optado por que sea de 2x2 metros. Es necesario indicar también el sistema de coordenadas y la zona (UTM 30N) ya que, si no se hubiese cambiado el sistema de coordenadas en los pasos previos, esta herramienta no los hace, solo requiere que se le indique en que sistemas de coordenadas están, por lo que con el paso inicial se evitan problemas en la creación del modelo digital de elevaciones. Estos modelos en formato .dtm pueden ser empleados en cualquier tipo de estudio si se hace uso de otra de las funciones como “*dtm2tif*”. Esta función fue utilizada para poder cargar el modelo digital de elevaciones en ArcMap y comprobar que se había realizado correctamente y que no presentaba ruido.

Finalmente, y teniendo en cuenta que los ficheros son numerosos, se ha hecho uso de la función “*MergeDTM*” con el fin de crear bloques de modelos digitales de elevaciones que permitiesen que el procesado de las métricas LiDAR posteriores fuese más sencillo y requiriese menos demanda de procesador (Mongus y Zalik, 2012, Pu et al., 2011), ya que ni mediante “*Lastools*”, ni mediante “*Fusion*” se podía abordar un análisis de tal magnitud y para dos vuelos distintos.

Llegados a este punto lo normal hubiera sido generar un modelo digital de superficies normalizadas realizando una resta, mediante la herramienta “*ráster calculator*”, entre el modelo digital de elevaciones y el cálculo de un modelo digital de superficies mediante “*Lastools*” con el fin de obtener los datos de los estadísticos de la vegetación con su altura real. Pero FUSION automatiza este proceso a la hora de calcular los estadísticos haciendo uso de los DTM generados con anterioridad mediante la herramienta “*GridSurfaceCreate*” por lo que no ha sido necesario realizarlo debido a que tampoco se iba a emplear como tal en ninguno de los objetivos del proyecto.

4.1.3. Cálculo de los estadísticos

En este punto del desarrollo del Trabajo Fin de Grado y con la información LiDAR tratada se planteó la idea de trabajar con información estadística a nivel de parcela únicamente, pero al contar con 4609 parcelas, la obtención de las coordenadas que limitaban cada una de estas parcelas para tener datos LiDAR únicamente sobre las parcelas resultaba

excesiva por lo que la utilización de la herramienta “*CloudMetrics*” no resultaba del todo adecuada. Esta herramienta se utiliza normalmente cuando la información LiDAR está recortada a cada una de las parcelas y normalmente se utiliza para calcular métricas que se usarán para análisis de regresión o para la clasificación de árboles en el caso de muestras LiDAR de árboles individuales. Por esta razón se ha optado por trabajar a nivel de “*Grid*”, es decir, generando superficies continuas en formato ráster para luego introducir esos datos mediante otro software a las diferentes parcelas agilizando notablemente el proceso de trabajo (Mongus y Zalik, 2012, Pu et al., 2011).

En cuanto al cálculo de estadísticos fundamentalmente se ha buscado obtener algunos de los que fueran representativos de la elevación de la cubierta vegetal sin tener en cuenta la presencia de estratos, y por otro lado se han obtenido estadísticos que permitiesen conocer en profundidad el comportamiento de la vegetación de manera estratificada en cada parcela. Para lograr este objetivo se presenta a continuación un cuadro resumen (**figura 6**) que sintetiza la metodología empleada en este apartado.

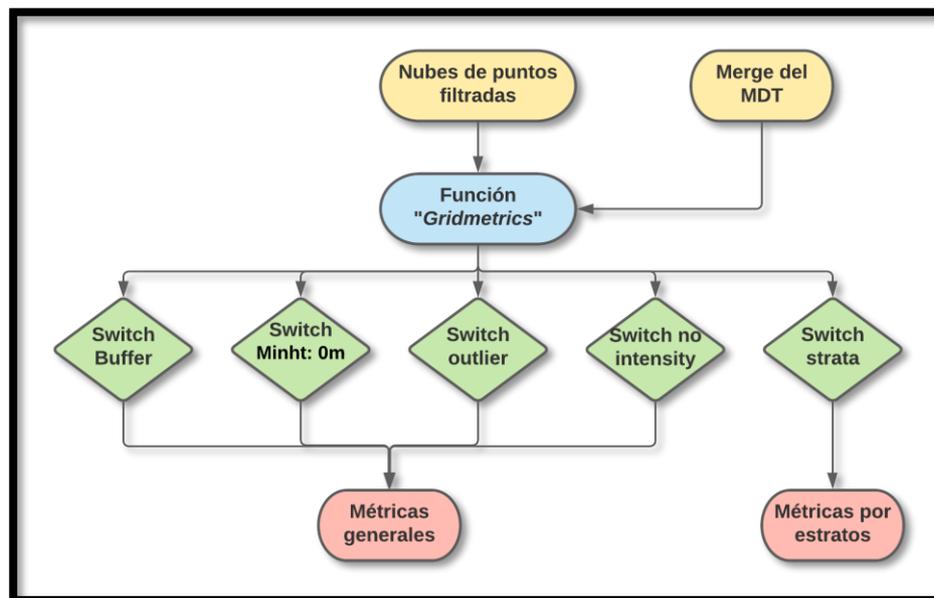


Figura 6: Metodología empleada para la generación de métricas LiDAR. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.

Para llevar a cabo el cálculo de los estadísticos se ha utilizado la función de FUSION denominada “*GridMetrics*”. Mediante esta herramienta se obtienen unas estadísticas descriptivas para las diferentes nubes de puntos cuya salida es una cuadrícula ráster en la que se puede definir el tamaño de celda y en la que cada celda se almacena información estadística proveniente del conjunto de puntos que existen en su interior. Esto se expresa mediante un archivo de texto ASCII con valores separados por comas, es decir, un archivo CSV.

La sintaxis del código necesario para la utilización de esta herramienta es la siguiente:

*“GridMetrics [switches] groundfile heightbreak cellsize outputfile datafile1
[datafile2 ... datafileN]”*

Lo que fundamentalmente demanda la herramienta es el archivo DTM referido al modelo digital de elevaciones generado en el apartado de tratamiento de la información LiDAR. A su vez se demandan las nubes de puntos del inicio, es decir, aquellas que no contienen la clase de ruido y solape y que tienen el sistema de coordenadas homogéneo ya que es a partir de ellas, y del modelo digital de elevaciones (proveniente del filtrado del suelo), como se va a proceder al cálculo de las estadísticas. Además, y tal y como se citó con anterioridad, a partir del modelo digital de elevaciones se va a proceder de forma automática a la normalización de las alturas por lo que los estadísticos resultantes podrán tener un uso inmediato en los análisis pertinentes. También es necesario indicar la resolución de salida que para este estudio se ha definido en 10x10 metros.

El uso de esta herramienta es realmente importante para el desarrollo del Trabajo Fin de Grado y para que los resultados fueran plenamente operativos se ha hecho uso de una serie de “switches” o modificaciones en la línea de código para ajustar los resultados a las necesidades del proyecto (**tabla 4**):

<i>Buffer: 20m</i>	Mediante esta modificación se realiza un buffer de análisis estadístico de 20 metros entre las diferentes nubes de puntos para que en el caso de que exista algún pixel sin información entre las nubes de puntos contiguas este quede con información estadística fruto de las nubes de puntos próximas.
<i>Minht: 0m</i>	Mediante este modificador de código se puede especificar que se utilicen únicamente los retornos que estén por encima del valor que el usuario quiera utilizar para el cálculo de los estadísticos. Por defecto este valor es 1, para eliminar el suelo desnudo, el suelo con vegetación parcial o el sotobosque, pero en este estudio sí que es necesario obtener información sobre las pequeñas manchas de vegetación en el suelo, así como del sotobosque por lo que se ha indicado que se utilicen únicamente los retornos superiores a 0.
<i>Outlier: 0.20m / 40m</i>	Este modificador de código permite ser aún más restrictivo en cuanto al cálculo de estadísticos pues omite en dicho cálculo, los puntos que están por debajo del mínimo (0.20m) y por encima del máximo 40m. De esta forma se consigue ajustar el análisis estadístico dejando completamente de lado el suelo desnudo (menor de 0.20) pero conservando la información estadística referida a la vegetación de bajo porte y el sotobosque. Por otro lado, el límite superior de 40 metros de altura se ha establecido con ese valor en concreto para evitar ruidos de cualquier tipo o errores como los retornos elevados fruto de la detección de aves que están volando en el momento de la captura.

<p><i>Strata:</i> <i>[0,0.2,0.5,1,3,5,40]</i></p>	<p>Este es uno de los modificadores de código más relevantes de los empleados de cara a la obtención de estadísticos específicos. Mediante su uso se obtienen estadísticos referidos no a la elevación general de los puntos, sino que se cuentan los retornos en varios estratos de altura. Para ello se cuentan los puntos siempre y cuando sean mayores o iguales al límite inferior del estrato y menores al límite superior del estrato deseado.</p>
<p><i>Nointensity</i></p>	<p>Mediante este modificador se especifica que se calculen las estadísticas únicamente tomando como referencia los datos de elevación provenientes del modelo digital de elevaciones.</p>

Tabla 4: *Modificadores de código empleados para la obtención de las métricas LiDAR en modo “grid”. Fuente: Realización propia.*

Comprendidos los modificadores de código que van a ser empleados en esta herramienta, a continuación, se expone en la **tabla 5** los diferentes estadísticos obtenidos para la realización del proyecto y que a su vez están únicamente referidos a la elevación, es decir, sin utilizar el modificador “*strata*”:

<p><i>Percentil 99 de la elevación</i></p>	<p>Este estadístico indica un valor por debajo del cual se encuentra un porcentaje del conjunto de datos. Es un estadístico realmente útil para realizar comparaciones entre los datos de las parcelas ya que de esta manera se obtiene prácticamente la elevación máxima por parcela.</p>
<p><i>Desviación estándar de la elevación</i></p>	<p>Utilizada para medir la variación o la dispersión de los datos respecto a la media. Esto ayudará a caracterizar las parcelas ya que una parcela con un percentil 99 elevado y una desviación típica baja será un indicador de homogeneidad en la estructura vegetal mientras que una parcela con un percentil 99 elevado y una alta desviación típica pondrá de manifiesto la existencia de una estructura más heterogénea con algún estrato que predomine más sobre otro o con algún punto de arbolado elevado.</p>
<p><i>Varianza de la elevación</i></p>	<p>La variancia es la desviación típica al cuadrado y en este caso se ha calculado como medida alternativa a la desviación típica. JUSTIFICAR MEJOR.</p>

Tabla 5: *Métricas LiDAR obtenidas tras la ejecución del código. Fuente: Realización propia.*

En segundo lugar, hay que destacar que para los estadísticos que se van a obtener únicamente por estratos utilizando la función “*strata*” se ha tenido en cuenta la clasificación por tipos estructurales de Braun – Blanquet, J. (1979). Teniendo esto en cuenta los estratos seleccionados son los mostrados en la **tabla 6**:

< a 0,2 metros	Suelo desnudo con vegetación parcial
0,2 metros a 0,5 metros	Estrato herbáceo
0,5 metros a 1 metros	Estrato subarbusitivo
1 metro a 3 metros	Estrato arbustivo
3 metros a 5 metros	Estrato arborescente
> a 5 metros	Estrato arbóreo

Tabla 6: Clasificación por tipos estructurales Braun – Blanquet, J. (1979). Fuente: Realización propia.

Teniendo en cuenta estas consideraciones los estadísticos obtenidos por estratos son los que quedan recogidos en la **tabla 7**:

<i>Número total de retornos</i>	Con el número total de retornos por estrato se puede obtener mediante otra herramienta, tal y como se expone más adelante la suma de todos los retornos por cada pixel que compone una parcela.
<i>Porcentaje de retornos pertenecientes cada uno de los estratos por parcelas</i>	Este estadístico se calcula a partir del sumatorio del número total de retornos parcela a parcela, es decir, el total del sumatorio de retornos de todos los estratos en una parcela se considera el 100% y a partir de este dato se tiene en cuenta el sumatorio de cada estrato de dicha parcela con el fin de obtener el porcentaje de representación de cada estrato por parcelas. Resulta de especial interés en combinación con los estadísticos del percentil 99 y la desviación típica pues es muy esclarecedor en cuanto a la valoración de la estructura vegetal de una parcela y combinado con una visualización de la nube de puntos en 3d permite crear un análisis preciso de su estructura vegetal.

Tabla 7: Métricas LiDAR obtenidas tras la ejecución del código en función de los estratos definidos por Braun – Blanquet, J. (1979). Fuente: Realización propia.

4.1.4. Adecuación de la información LiDAR para el trabajo con la información óptica en parcelas

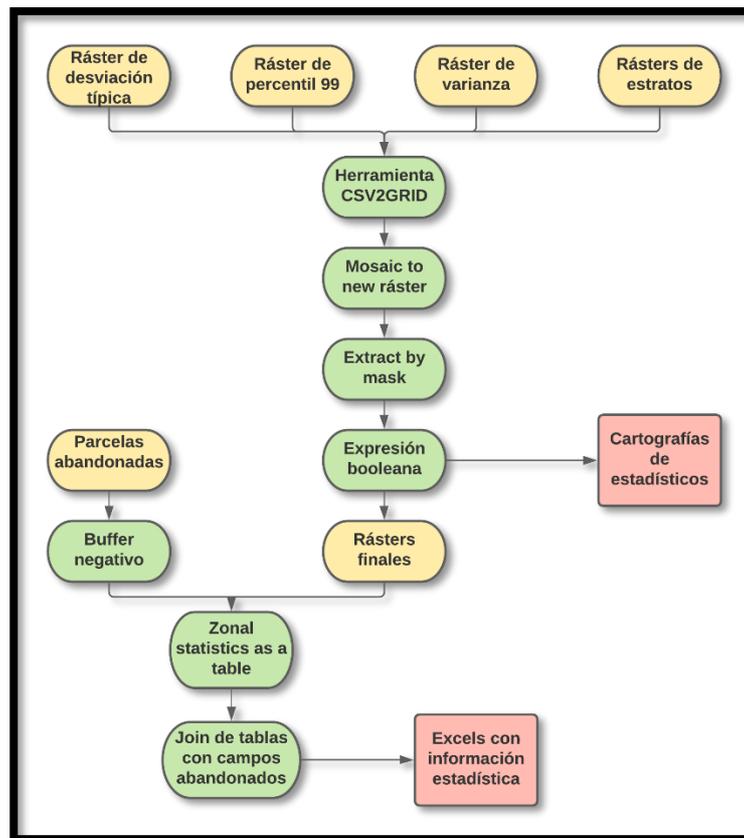


Figura 7: Metodología empleada en el entorno SIG para la combinación de información. Fuente: Realización propia mediante LucidChart.

Con los estadísticos calculados el siguiente paso en la realización del proyecto ha consistido en la obtención de superficies ráster en base a los estadísticos para poder realizar una unión a las parcelas donde también se encuentran los datos de información óptica (NDVI, verdor y humedad). La secuencia metodológica empleada en este apartado del proyecto se presenta en el siguiente esquema (**figura 7**):

La herramienta empleada para la creación de las superficies ráster estadísticas es “CSVGrid” y se encuentra implementada en el software FUSION. La línea de código para su uso es la siguiente:

“CSV2GRID [switches] inputfile column outputfile”.

En este caso, este sencillo código demanda los estadísticos generados anteriormente con “GridMetrics” y solo es necesario especificar una ruta de salida para los ráster y especificar un valor numérico que hace referencia a la columna dedicada para cada uno de los estadísticos citados (percentil 99, desviación estándar... etc.). Esta numeración puede ser consultada en el manual de fusión donde para cada estadístico se indica la columna numérica o puede ser consultada abriendo el CSV en una hoja Excel y realizando un conteo de las columnas hasta llegar al encabezado deseado.

Finalmente, con los ráster obtenidos se ha generado un mosaico de los mismos mediante la herramienta “mosaic to new ráster” y una extracción con la forma de la comarca mediante la herramienta “*extract by mask*”. En el resultado final existían píxeles considerados como suelo desnudo debido a que se especificó con anterioridad que solo se realizasen estadísticos a partir de 0.2 metros por lo que en estas áreas de suelo desnudo los valores son de “*no data*”. Estos valores hacen que a la hora de trasladar la información estadística a las parcelas y obtener otros estadísticos derivados como la media la moda el rango y la desviación típica no se tengan en cuenta los valores 0 por lo que el resultado final acabaría siendo erróneo y sobreestimado. Para paliar esta problemática se optó en un primer momento por utilizar la herramienta de QGIS “*close gaps*” que mediante el filtro “*Von Neumann neighborhood*” da valores a estos píxeles en función de los cercanos tal y como señalan Royé y Serrano Notivoli, (2019). Pero esta tampoco era la solución adecuada pues estos píxeles eran de suelo desnudo y también harían que las masas de agua tomaran valores irreales por lo que se optó por aplicar una función booleana mediante “*ráster calculator*” para transformar los valores nulos a 0 y que estos no obtuviesen otro tipo de valor. La consulta empleada fue la siguiente:

Con(IsNull(“ráster de entrada”),0,”ráster de entrada)

Aplicando esta función a cada uno de los estadísticos en formato ráster para cada una de las cubiertas se han obtenido una serie de capas ráster como la que se presenta en la **figura 8**.

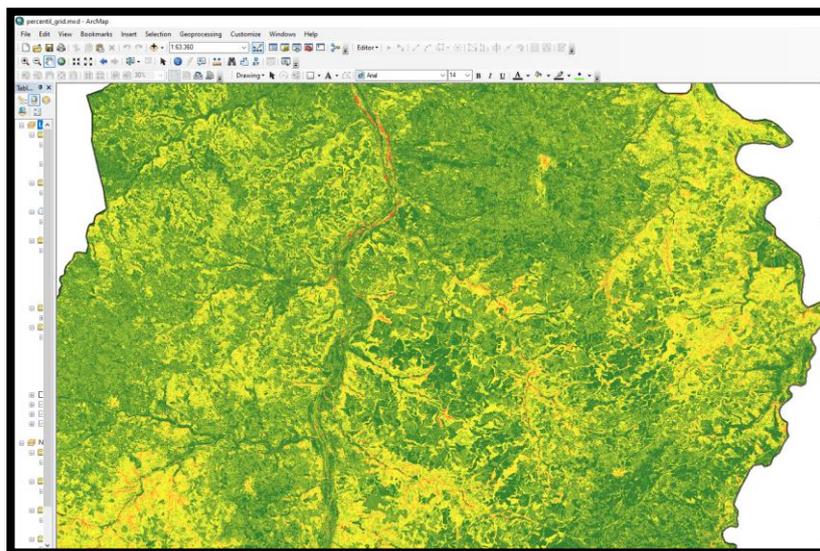


Figura 8: Superficie ráster de percentil 99 obtenida a partir de datos LiDAR. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.

Finalmente se procedió a hacer un “Zonal statistics as a table” tomando como referencia los ráster de estadísticos para que la información de estos entrase a las diferentes parcelas, pero antes de realizar este sencillo paso se comprobó que esta función toma como referencia el centroide del píxel para obtener el estadístico y que no era posible desde los entornos de la herramienta cambiar esta forma de crear estadísticas zonales. Esto podría hacer que nuevamente se sobreestimase la información estadística al introducir información

que no era única y exclusivamente de la parcela, por lo que se optó por la realización de un “buffer”, pero en este caso negativo y de 7.5 m a la capa de cultivos ya que teniendo en cuenta que cada pixel es de 10x10 metros se conseguiría eliminar cualquier influencia del exterior sin que afectase a la información estadística que sí que debería estar incluida en el interior (**figura 8**).

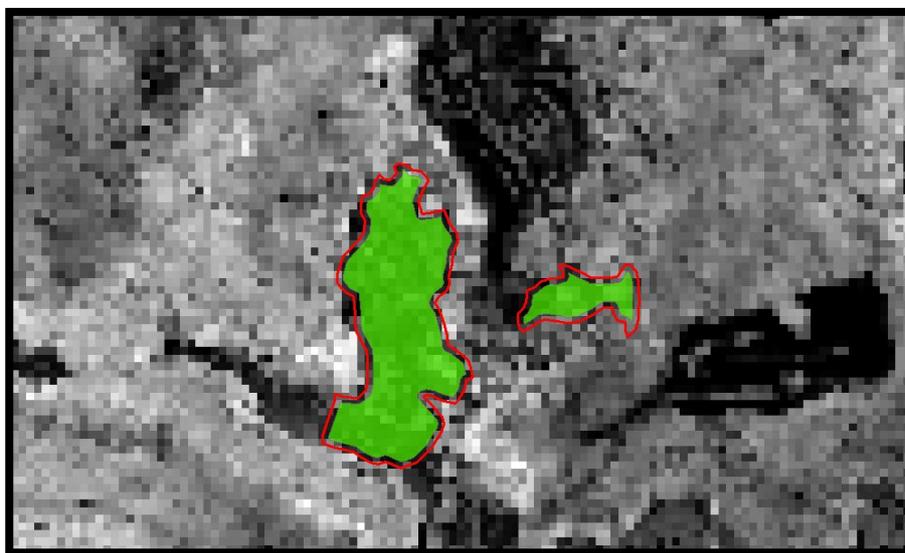


Figura 9: *Buffer negativo en las parcelas originales para mejorar la realización de las estadísticas. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.*

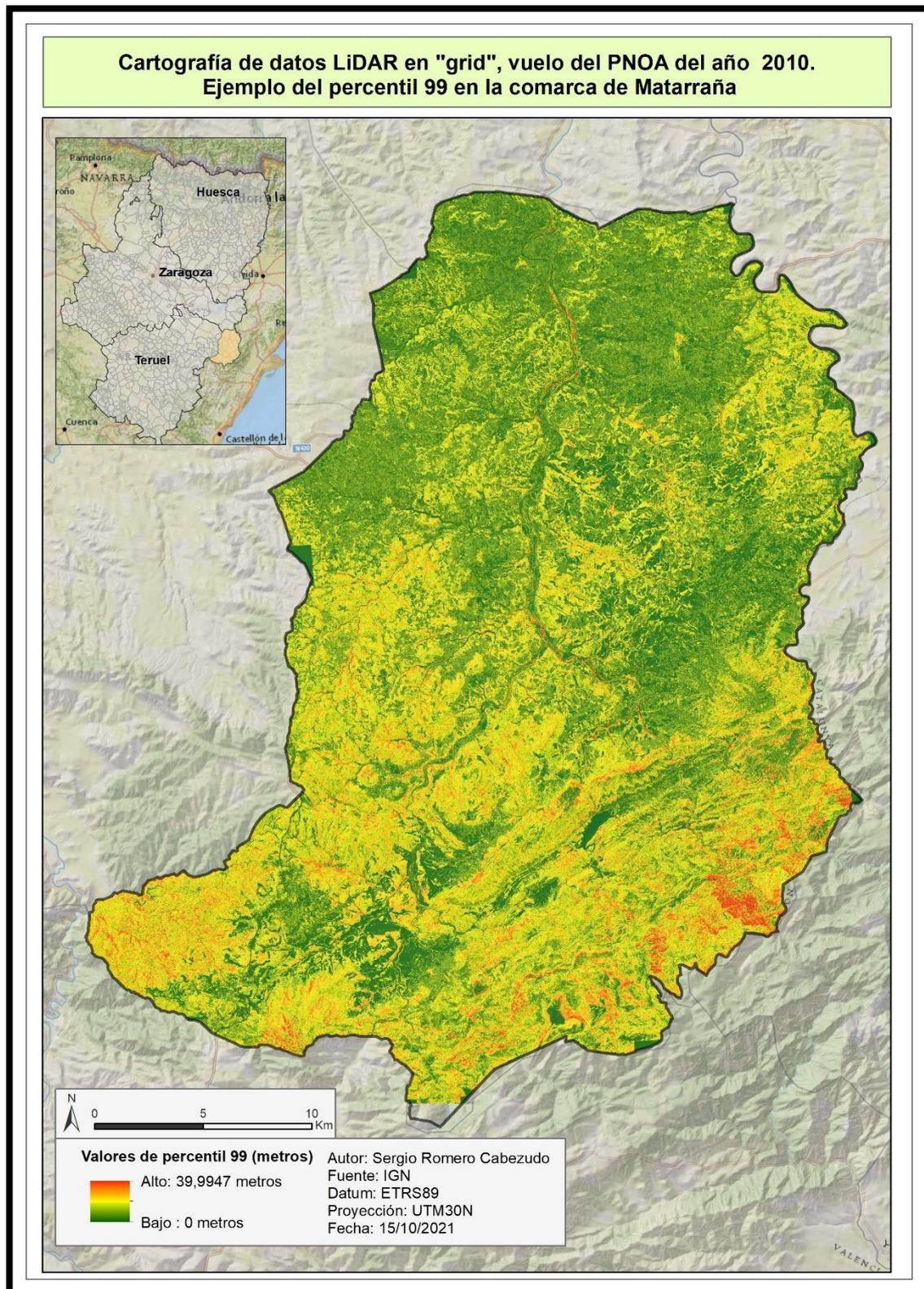
En la **figura 8** se puede comprobar como el contorno rojo representa la dimensión anterior al buffer de la parcela original mientras que la verde es el resultado del buffer en la que se pueden apreciar como los pixeles que quedasen única y exclusivamente en su interior se mantienen, eliminando aquellos que resultasen problemáticos. Pero, además, las parcelas con una superficie meramente anecdótica y no aptas para el estudio desaparecerían con el propio buffer negativo, ahorrando así trabajo en cuanto a la selección de cuáles son las adecuadas.

Finalmente, mediante la herramienta “*zonal statistics as a table*” y “*join*” se han combinado los datos LiDAR por parcelas junto con los datos de información óptica existentes en la capa de parcelas tratada en el Trabajo Fin de Grado.

6. Resultados

Para la realización de los resultados se han tomado dos tipos de enfoque, en primer lugar, se mostrará la situación general de la comarca mediante una serie de cartografías cuyos datos representados provienen directamente de los estadísticos obtenidos tras el tratamiento de las nubes de puntos PNOA – LiDAR. Comprendida la situación y las particularidades en cuanto a la distribución de las alturas, la variación vertical en el dosel vegetal y la estructura de las parcelas, se procederá a mostrar mediante una serie de gráficos, cuál es la realidad de estos estadísticos pues se pondrán en relación con otras variables explicativas que permitirán caracterizar, junto con la combinación de información óptica, la estructura y la cobertura vegetal de los campos abandonados en la comarca de Matarraña. En primer lugar, y antes de

comenzar con la caracterización estructural, se muestra el resultado cartográfico del tratamiento de los datos LiDAR (**cartografía 3**). El resto de cartografías generadas se muestran en el **anexo**.



Cartografía 3: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo PNOA del año 2010, percentil 99.

6.1 Caracterización general de la estructura de las parcelas en el área de estudio

La primera de las cartografías (**cartografía 3**) muestra la altura de la cubierta vegetal según el percentil 99, y teniendo en cuenta los valores obtenidos en el tratamiento de las nubes de puntos se ha realizado una clasificación por tipos estructurales tomando como referencia a Braun – Blanquet, J. (1979) tal y como se señalaba en la metodología. La razón de la utilización del percentil 99 se debe a que de esta forma se elimina la información de retornos que pudieran provenir de algún tipo de ave o infraestructura eléctrica, entre otros elementos. Teniendo esto en cuenta, se han definido los siguientes intervalos:

- 0 metros a 0,5 metros: Estrato herbáceo.
- 0.5 metros a 1 metros: Estrato subarbuscivo.
- 1 metro a 3 metros: Estrato arbustivo.
- 3 metros a 5 metros: Estrato arborescente.
- 5 metros a 7,5 metros: Estrato arbóreo (1).
- Más de 7,5 metros: Estrato arbóreo (2).

Estos son una modificación de los intervalos definidos en el apartado metodológico ya que los anteriores iban encaminados a la obtención de retornos, pero en este caso, analizando el histograma de los datos del percentil 99 (**figura 9**) se ha optado por realizar pequeños cambios con el objetivo de tener una representación cartográfica más adecuada.

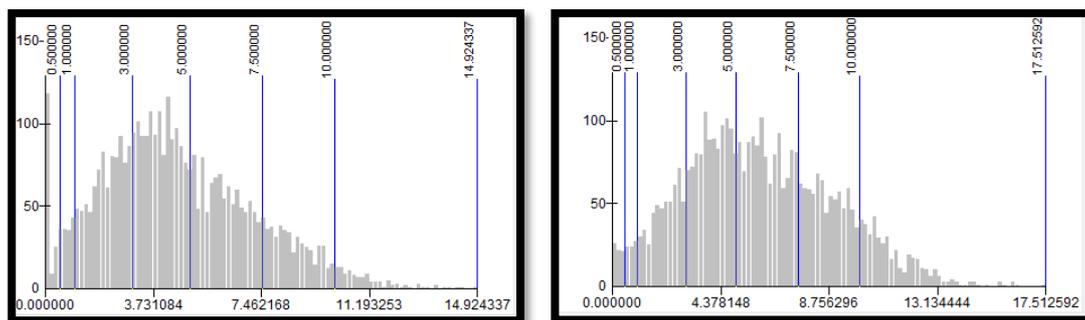
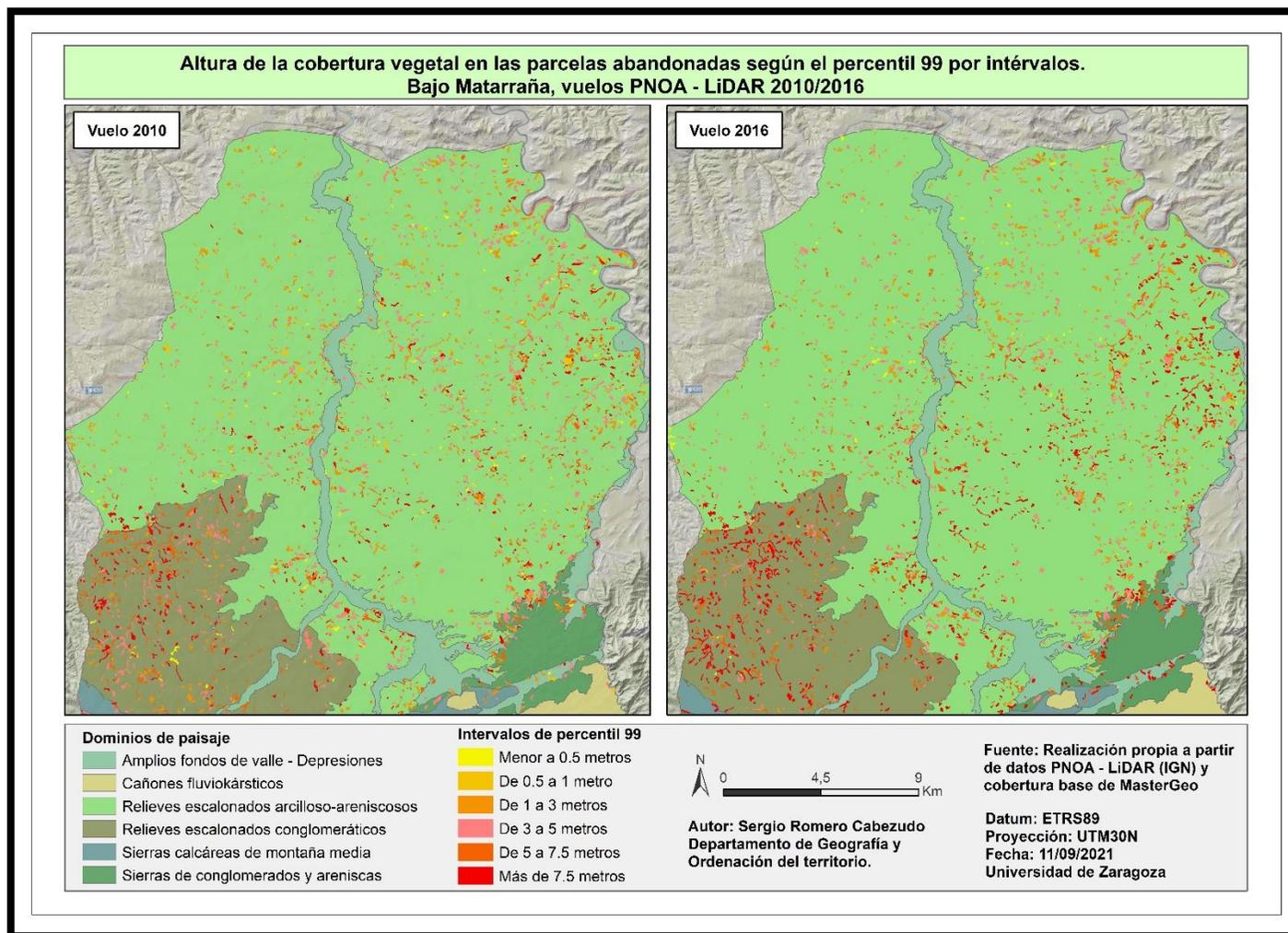


Figura 10: Histogramas del percentil 99 para los años 2010 (izda.) y 2016 (dcha).

Con una primera aproximación al histograma del percentil 99 ya se puede comprobar como el rango de la altura de las parcelas sufre un aumento en los 6 años de diferencia respecto a ambos vuelos. En concreto lo hace en unos 4 metros aproximadamente. También se observa como la frecuencia de parcelas con alturas mínimas, que corresponderían a suelo desnudo con estrato herbáceo, se ve reducida. Adicionalmente, se observa cómo hay un paso notable del estrato arbustivo al arborescente, aunque esto se observará en profundidad con las cartografías y estadísticos.



Cartografía 4: *Altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Bajo Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.*

En cuanto a la información mostrada en la cartografía se puede apreciar la comparación entre el vuelo del año 2010 y el de 2016 en la zona del bajo Matarraña junto con los dominios de paisaje de la comarca. Se puede apreciar como en el año 2010 y en la zona norte se atiende a una predominancia de los campos abandonados de bajo porte, es decir, los estratos herbáceos, subarbustivos y arbustivos y que por lo tanto se encuentran alturas que van desde los 0 metros hasta los 3 metros. Teniendo en cuenta que son parcelas abandonadas y de baja superficie se podría pensar que en esta zona debería haber más parcelas de estrato herbáceo y que en general en esta zona se atiende a una altura de la cubierta vegetal considerable.

Estos datos realmente no inducen a error ya que como se comprobó en el estudio del Trabajo Fin de Grado, en el que se atendió a la evolución de la cobertura vegetal, se ha producido una gran variación en cuanto a la cobertura entre los años 1984 y 2018 en la zona del bajo matarraña. Por esta razón, en el año 2010 ya se puede comprobar como las parcelas definidas como estrato herbáceo (0,2 a 0,5 metros) son meramente anecdóticas, y en esta zona del bajo Matarraña donde en años anteriores a 2010 se encontraban parcelas de suelo desnudo, ahora predominan los estratos subarbustivos y arbustivos. Esta zona en concreto se encuentra situada en el dominio de los relieves escalonados arcillo – areniscosos y aunque lo que predomina fundamentalmente son los tres estratos de bajo porte citados con anterioridad, también se observan parcelas de porte arborescente o arbóreo lo que indica que en esta zona llana de la comarca donde por lo general existen amplias superficies de cultivo e infraestructuras, también se atiende a un proceso de crecimiento en la cubierta vegetal de las parcelas abandonadas.

Las razones que explican esta dinámica se encuentran en que un dominio de vegetación engloba características vegetales y morfológicas (entre otras muchas) de un territorio determinado. Por ello, si se atiende no solo al dominio, sino a la vegetación que lo caracteriza, se aprecia como los valores de porte arborescente o arbóreo se encuentran fundamentalmente en áreas de pinar mediterráneo y submediterráneo y cuyas unidades fisiomorfológicas se corresponden con los taludes de 5° a 20° y los vales de fondo plano.

Por otro lado, en el dominio de los amplios fondos de valle y depresiones no se encuentran parcelas y si las hay son de bajo porte pues en estas zonas predomina la vegetación de ribera y la propia morfología del terreno juega un papel fundamental a la hora de que no existan parcelas en estas áreas.

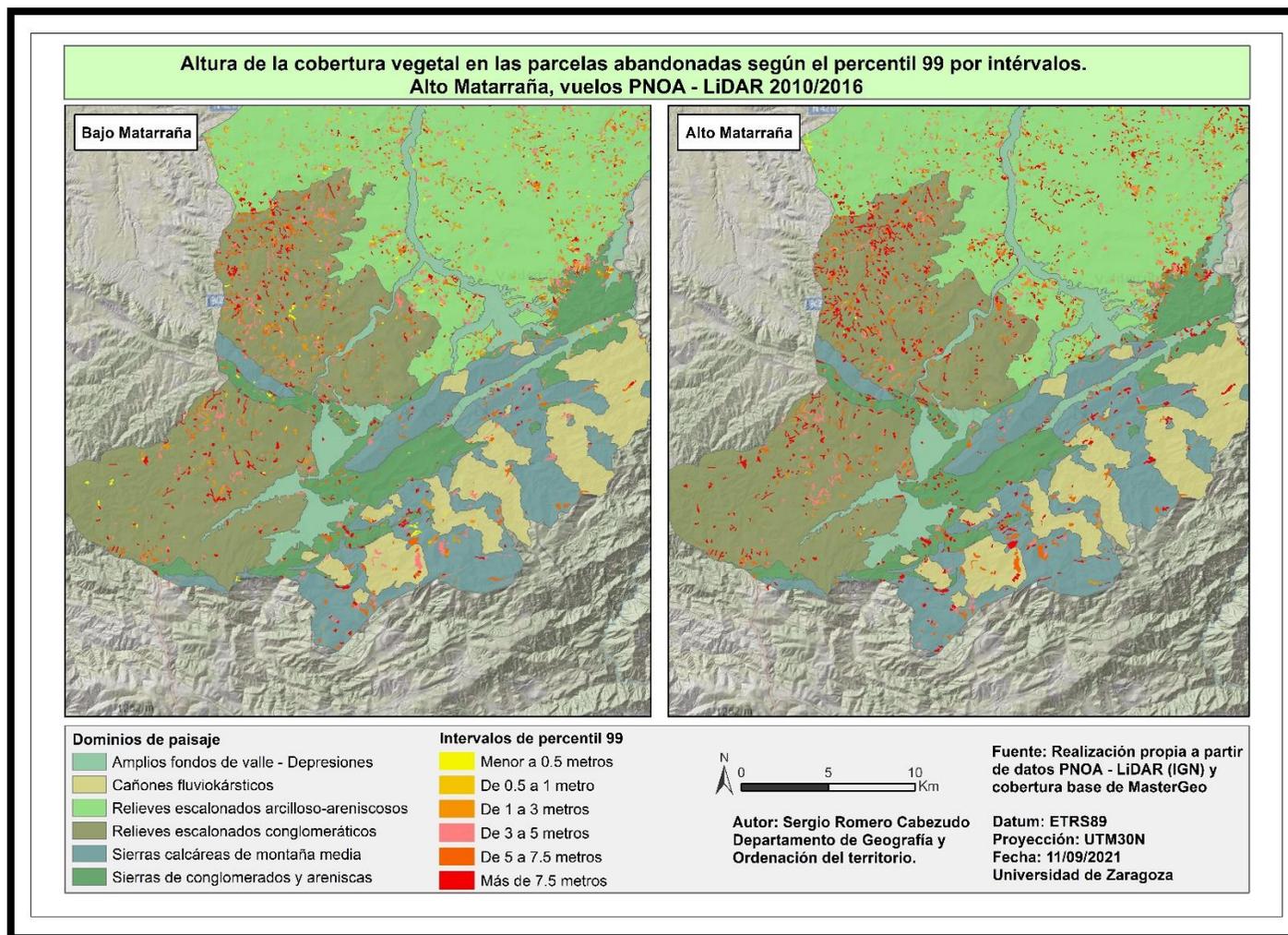
En cuanto al año 2016, las diferencias en la zona del bajo Matarraña y más concretamente en el dominio de los relieves escalonados arcillo – areniscosos, son mínimas puesto que estas parcelas fueron las últimas en ser abandonadas y su crecimiento se ha producido hace escasos años. Incluso existen zonas en las que se asiste a un descenso de la altura de la cubierta vegetal que puede ser debido a la puesta en marcha de nuevos cultivos sobre estas parcelas. Donde sí se producen ciertos cambios en 2016 dentro de este gran dominio es nuevamente en las áreas donde la vegetación es de pinar y la unidad fisiomorfológica se corresponde con los vales de fondo plano o los taludes de baja pendiente. En estas áreas se atiende a un crecimiento en los estratos de mayor porte, acentuando enormemente las diferencias entre estratos si se compara un vuelo con otro.

Finalmente, es necesario destacar un sector que queda a caballo entre la zona alta y baja de la comarca y que se corresponde con el dominio de paisaje de los relieves escalonados conglomeráticos. En este dominio es donde mayores valores de altitud se ven tanto en el año 2010 y 2016 y donde se encuentran los mayores valores de cambio tal y como se verá en la **cartografía 6**. En cuanto a la vegetación y las diferentes Unidades fisio - geomorfológicas, predominan los bosques mixtos esclerófilos, los pinares mediterráneos y submediterráneos y los cultivos leñosos. Por otro lado, en cuanto a las Unidades fisio - geomorfológicas predominan los taludes de baja pendiente, las plataformas escalonadas y los vales de fondo plano.

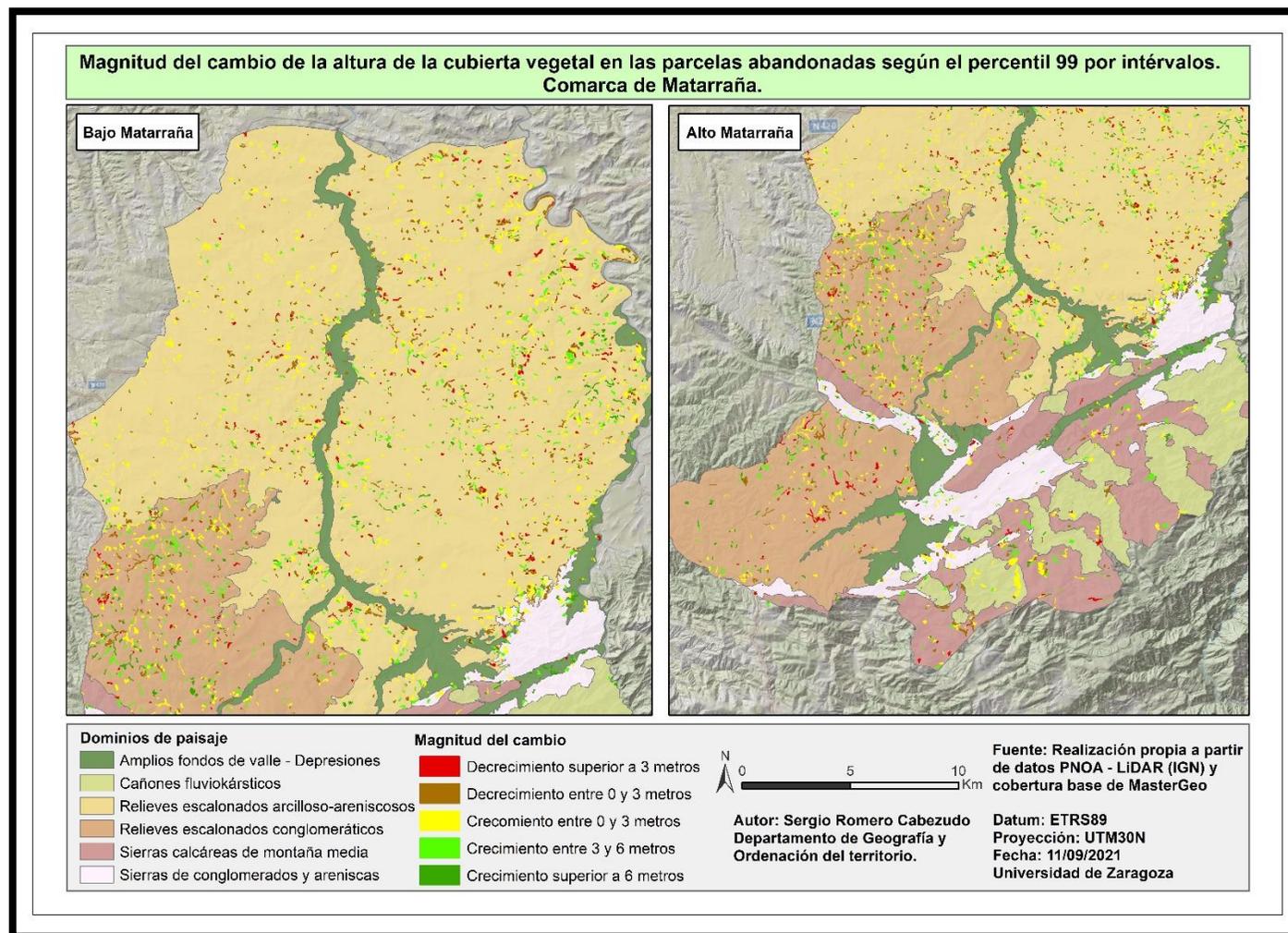
En cuanto al alto Matarraña, la **cartografía 5** muestra como en general las parcelas son clasificadas con estratos de mayor porte, poniendo de manifiesto el claro gradiente entre el bajo y alto Matarraña. Las razones que pueden explicar esto son que en el alto Matarraña las parcelas pudieron ser abandonadas más temprano debido en parte a la altitud y a la mayor distancia a núcleos de población, por esta razón la vegetación ha podido crecer sin la influencia del ser humano durante una serie mayor de años que se traduce en unos portes que van desde los 5 metros hasta los 14 metros en 2010 y los 18 metros en 2016 para las parcelas abandonadas. Además, es necesario destacar que puede que estas parcelas “abandonadas” realmente no lo estén ya que teniendo en cuenta que se atiende a un total de 4609 parcelas, es muy probable que algunas de ellas sí que hayan tenido uso a lo largo de estos años.

En el alto Matarraña ya no se observa la misma densidad de parcelas si se compara con el bajo Matarraña debido a un relieve mucho más accidentado que juega un papel fundamental en su distribución, creando un paisaje más heterogéneo en el que los cultivos serán por lo general menos numerosos, pero más destacados en términos de superficie. Las razones que podrían explicar esta situación podrían ser debido a que se optaba por utilizar parcelas de mayor envergadura ya que el relieve no permite aprovechamientos en toda el área como sí que sucede en la zona del bajo Matarraña donde el paisaje es más monótono y salpicado por grandes superficies llanas y plataformas. De esta forma se obtenía mayor rentabilidad de las que sí podían ser explotadas ya que al ser zonas elevadas el coste de desplazamiento podría ser más elevado y se buscaba tener una buena superficie aprovechable.

En este caso, los dominios sobre los que se observa la predominancia de parcelas y el crecimiento en su altura, se corresponden con las sierras calcáreas de montaña media y las sierras de conglomerados y areniscas. Donde se encuentra el mayor número de parcelas es en las sierras calcáreas de montaña media mientras que en las sierras de conglomerados y areniscas fundamentalmente se encuentran en la parte oeste del dominio. En cuanto a las Unidades fisio - geomorfológicas y la vegetación existente en estas áreas destacan los pastos, los prados y praderas y los bosques mixtos esclerófilos que se sitúan sobre taludes de baja y alta pendiente. En la zona este, al ser la más accidentada de la comarca es donde menos parcelas se encuentran pues las condiciones del relieve serán mucho más complejas.



Cartografía 5: *Altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Alto Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1*

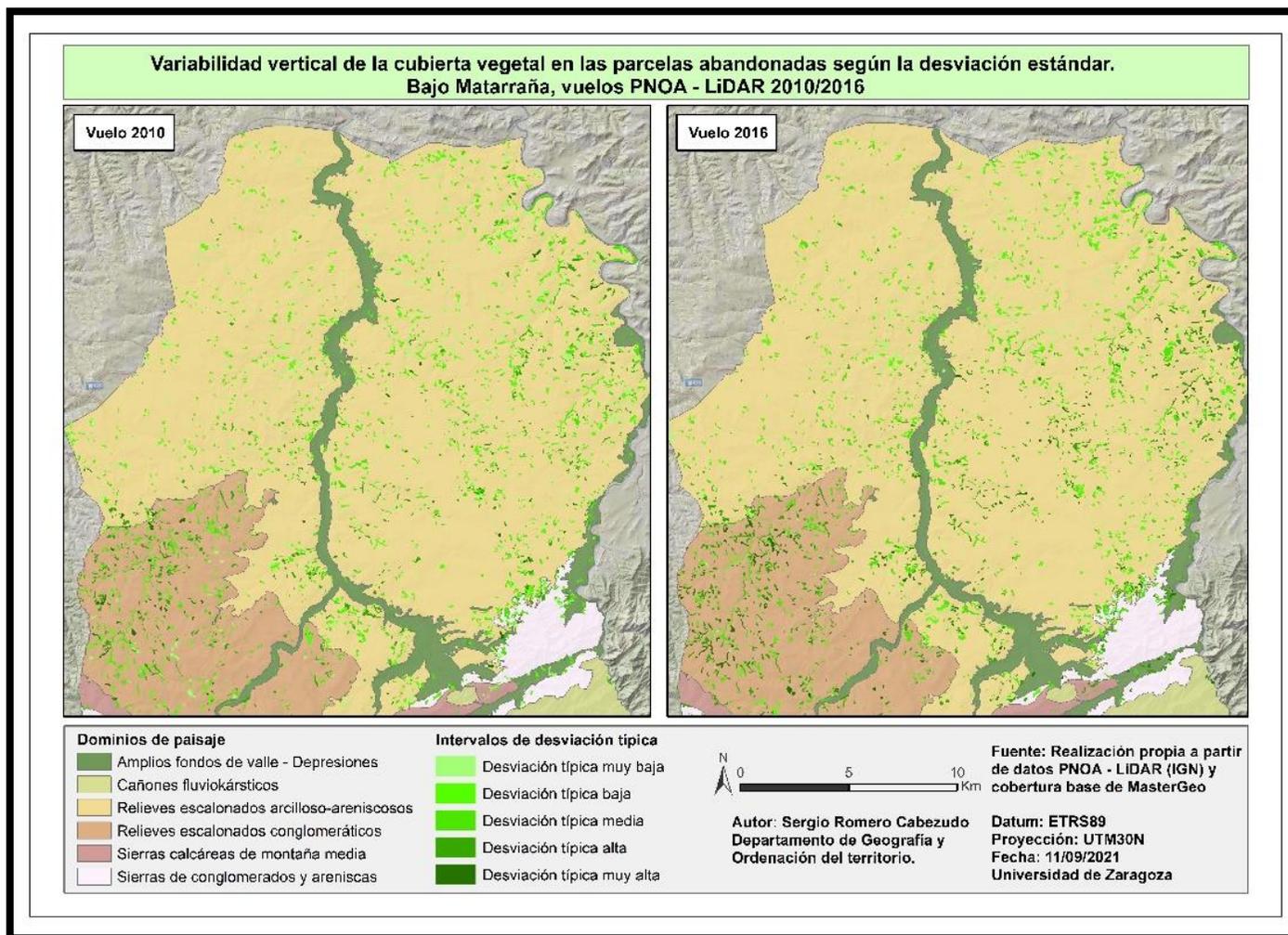


Cartografía 6: Magnitud de cambio de la altura de la cubierta vegetal según el percentil 99 por intervalos. Comarca de Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.

En la **cartografía 6** se muestra la magnitud del cambio en la altura de la cubierta vegetal a partir de los datos del percentil 99. Para ello se ha realizado una diferencia entre los valores de 2016 y 2010 y en función de los resultados se han creado una serie de rangos que expresan si la parcela ha aumentado su altura entre este periodo de tiempo o si, por el contrario, ha descendido la altura de la cubierta vegetal. Observando la cartografía, existen ciertas peculiaridades en el área de estudio que merecen ser destacadas. En el bajo Matarraña la situación es muy estable y se aprecian parcelas que crecen o decrecen entre 0 y 3 metros. Es en estas áreas donde de forma generalizada se producen los cambios menos destacados habiendo pequeños descensos de la altura de la cubierta vegetal en las zonas de pinar y crecimiento en las zonas de cultivos leñosos donde el abandono de las parcelas hace que especies de porte arbustivo comiencen a colonizar. De cualquier modo, es necesario matizar que el cambio tanto en cuanto a crecimiento como a decrecimiento es prácticamente anecdótico y en el conjunto del bajo Matarraña se asiste a una situación de estabilidad en cuanto a la altura de la cubierta vegetal a excepción de algunas parcelas cuyos datos de decrecimiento son excesivos y que pueden poner de manifiesto que no están abandonadas realmente. Esta situación de estabilidad en cuanto a la altura de la cubierta vegetal, viene dada por la dinámica evolutiva de la cobertura de la vegetación desde 1984 hasta la actualidad, en la que se ha asistido al proceso de revegetación citado por lo que los cambios más relevantes simplemente son fruto del propio ciclo de vida de la vegetación dentro de una parcela o por la puesta en marcha de parcelas previamente abandonadas.

Por el contrario, donde sí que se pueden observar cambios reseñables es en la zona del bajo Matarraña, y más concretamente en el este, donde se encuentran manchas verdes que hacen referencia a un crecimiento positivo destacado. Estas se corresponden con áreas de pinar mediterráneo y submediterráneo junto con superficies de mosaico agroforestal. La razón que podría explicar este fuerte crecimiento en solo 6 años es la existencia de regadíos, que unidos a un terreno poco accidentado, crean un clima propicio para el crecimiento de la altura de la cubierta vegetal de las parcelas. Adicionalmente, en la zona del oeste de la comarca, el dominio citado anteriormente de los relieves escalonados conglomeráticos es donde mayores valores de cambio se observan ya que también es donde mejor se ha podido observar el crecimiento entre el año 2010 y 2016 en cartografías anteriores. En este dominio en concreto, la existencia de un relieve favorable como plataformas, vales de fondo plano y taludes de escasa pendiente, junto con una gran diversidad de usos del suelo y vegetación hacen que sea una zona referente para el estudio del crecimiento en la altura de la cubierta vegetal.

Finalmente, en las zonas del alto Matarraña la situación de crecimiento también es favorable, pero no tan destacada como en los relieves escalonados conglomeráticos. Las razones de esta situación podrían ser debidas a que la altitud actúe como un factor limitante del crecimiento de estas parcelas que probablemente habrían sido abandonadas en primer lugar por su difícil accesibilidad fruto del relieve y por lo tanto ya han alcanzado su techo de crecimiento. También la propia morfología del terreno puede jugar un papel limitante debido a las fuertes pendientes existentes en esta zona de la comarca de Matarraña.



Cartografía 7: Variabilidad vertical de la cubierta según la desviación estándar. Bajo Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7

Continuando con la **cartografía 7** en este caso se muestra la variabilidad vertical de la cubierta vegetal. Para ello se ha hecho uso del estadístico de desviación estándar obtenido mediante los procedimientos metodológicos detallados con anterioridad. En este caso se ha hecho un exploratorio del histograma del ráster (**figura 10**) generado a nivel comarcal para generar una serie de intervalos.

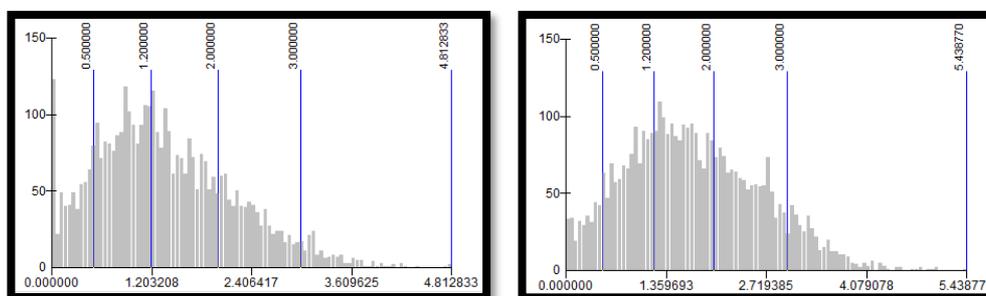


Figura 11: Histograma de los datos de desviación estándar para el año 2010 / 2016.

Haciendo una breve comparación de los datos ya se puede apreciar como el rango de desviación estándar ha aumentado entre los dos periodos observados y como en el año 2016 los valores con desviación estándar de 0 han visto reducida su frecuencia por lo que se espera que en el año 2016 la variabilidad de la cubierta sea mayor que en el año 2010.

Teniendo en cuenta estos dos histogramas y con el fin de realizar una representación cartográfica adecuada, se han definido los siguientes intervalos:

- 0 a 0.5 desviaciones: Variabilidad vertical muy baja.
- 0.5 a 1.2 desviaciones: Variabilidad vertical baja.
- 1.2 a 2 desviaciones: Variabilidad vertical media.
- 2 a 3 desviaciones: Variabilidad vertical alta.
- Más de tres desviaciones: Variabilidad vertical muy alta.

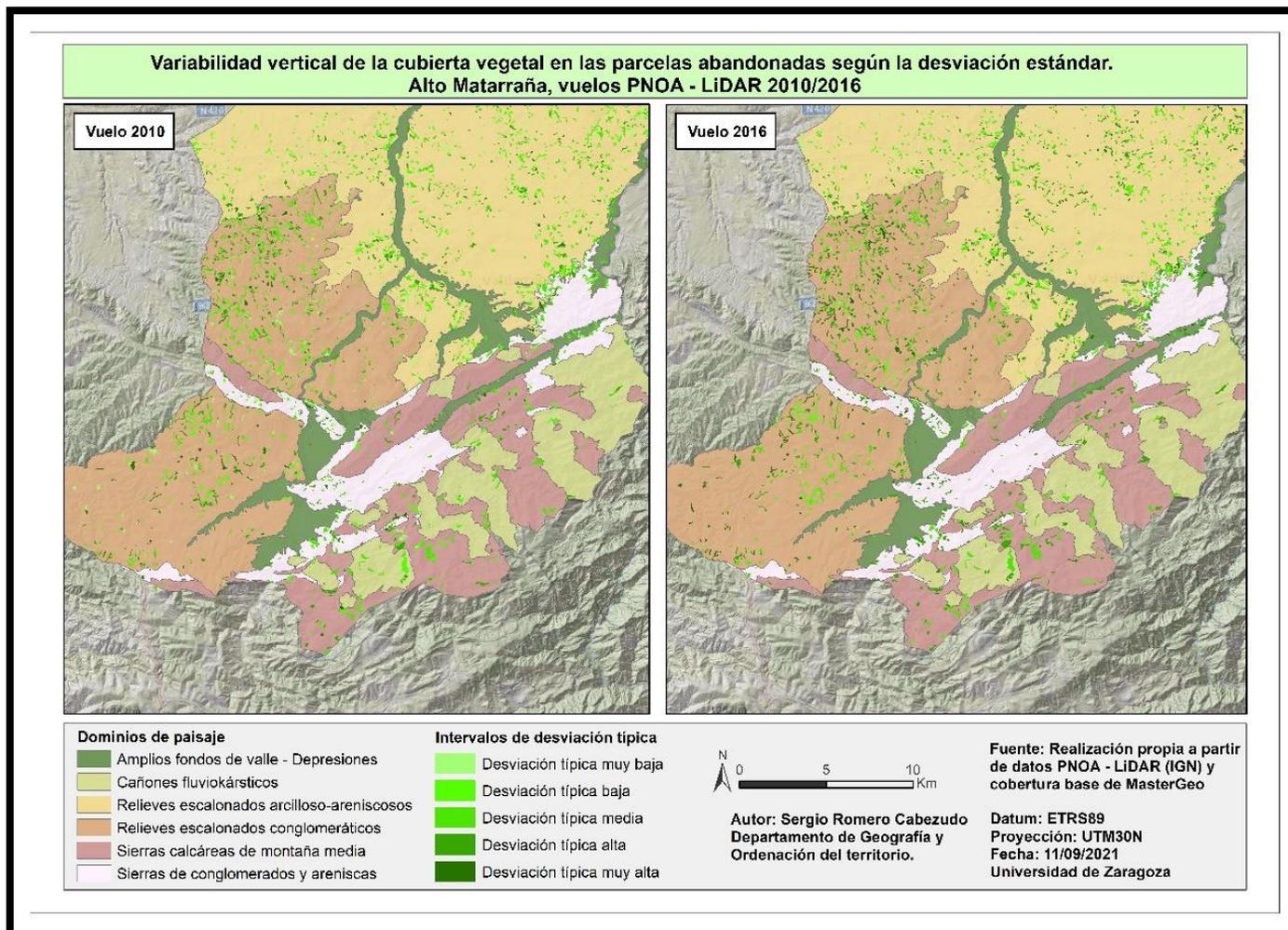
Observados los intervalos y los histogramas, en la **cartografía 7** se muestra la variabilidad vertical de la cubierta en el bajo Matarraña para el vuelo de 2010 y 2016. Se puede apreciar como en el bajo Matarraña la variabilidad de la cubierta vegetal es muy baja, esto quiere decir que el estrato que predomina en estas parcelas es constante en su interior, es decir, existe una homogeneidad en la estructura. Esto además viene abalado por la propia altitud extraída del percentil 99 en la que se ve que predominan en estas áreas los estratos herbáceos, subarborescentes y arbustivos, cuyas alturas no difieren enormemente entre sí. Además, atendiendo a los resultados del Trabajo Fin de Grado en los que se comprobó como la cubierta vegetal existente en esta zona es relativamente reciente, se puede constatar cómo esta vegetación está en un proceso de crecimiento temprano por lo que no hay estratos de elevada altitud como por ejemplo un arbóreo que pueda hacer aumentar la desviación típica. Además, es necesario tener en cuenta que gran parte de estas parcelas situadas sobre el dominio de relieves escalonados arcillo – areniscosos se encuentra sobre el uso de suelo de cultivos leñosos y en una zona llana en la que se realizan aprovechamientos, por lo que su abandono es reciente, poniendo

nuevamente de manifiesto estos bajos valores de desviación estándar y, por lo tanto, la heterogeneidad y el bajo porte de estas parcelas.

Nuevamente destacan por sus amplios valores de variabilidad vertical de la cubierta las zonas del oeste de la parte central de la comarca junto con la parte nororiental de la comarca. En estas áreas de relieves escalonados arcillo areniscosos y relieves escalonados conglomeráticos las parcelas presentan las mayores variabilidades probablemente debido ya no tanto a las Unidades fisio - geomorfológicas (a excepción de las vales de fondo de plano), puesto que son las mismas que las encontradas en las zonas del norte que tienen ese marcado carácter homogéneo, sino a la presencia de regadíos y la proximidad a zonas de pinar que puede que hayan intervenido en el proceso de colonización de la parcela haciendo que haya presencia de estratos de carácter arbóreo tal y como se comprobaba en la cartografía de estratos según el percentil 99 (**cartografía 4**). Esto se traduce en última instancia en la existencia de heterogeneidad en el dosel vegetal, pero esta no puede ser explorada únicamente mediante cartografía ya que no se puede conocer qué tipo de estrato es el que está interviniendo en la presencia de valores de desviación típica elevados. Para conocer esto con profundidad se han obtenido los valores del total de retornos por parcelas que fueron descritos en la metodología y que serán expuestos más adelante.

Finalmente, en la **cartografía 8** se muestra la variabilidad vertical del dosel vegetal en el alto Matarraña. En cuanto a los datos observados hay que destacar que la variabilidad vertical no es especialmente elevada en estas áreas y que las razones que están detrás de esta dinámica pueden ser nuevamente debidas a que estas parcelas son las que tuvieron el abandono más temprano en el conjunto del área de estudio. Esto, unido a la altitud y a la menor interacción con el ser humano ha podido propiciar que la vegetación de estas parcelas se haya homogeneizado con el tiempo creando parcelas de gran altitud y cuya vegetación mantiene ese porte a lo largo y ancho de la parcela. Pese a ello hay que destacar nuevamente que el alto Matarraña el número de parcelas es menor y se encuentran repartidas de manera dispar por el territorio, probablemente influidas por el relieve más accidentado.

Sin embargo, también se encuentran parcelas en el alto Matarraña cuyos valores de variabilidad vertical son elevados y que pueden poner de manifiesto como el propio relieve o la unidad fisiológica juegan un papel fundamental en que existan disparidades en cuanto a los estratos que se pueden encontrar en el interior de las parcelas pudiendo haber algunas de ellas que tengan estratos de bajo porte junto con vegetación arbórea. Este es el caso de las parcelas que se encuentran situadas en el dominio más accidentado del conjunto de la comarca, las sierras calcáreas de montaña media. En este dominio las parcelas no solo son escasas como ya se ha comprobado, sino que, si en el percentil 99 se apreciaban valores elevados de altitud, en este caso se observan valores medios o incluso bajos de desviación estándar, lo que pone de manifiesto que puede haber alguna especie arbórea que se haya impuesto a las condiciones del clima y del relieve, dando así un valor de altitud elevado, pero que la realidad del conjunto de la parcela difiera totalmente de este resultado.

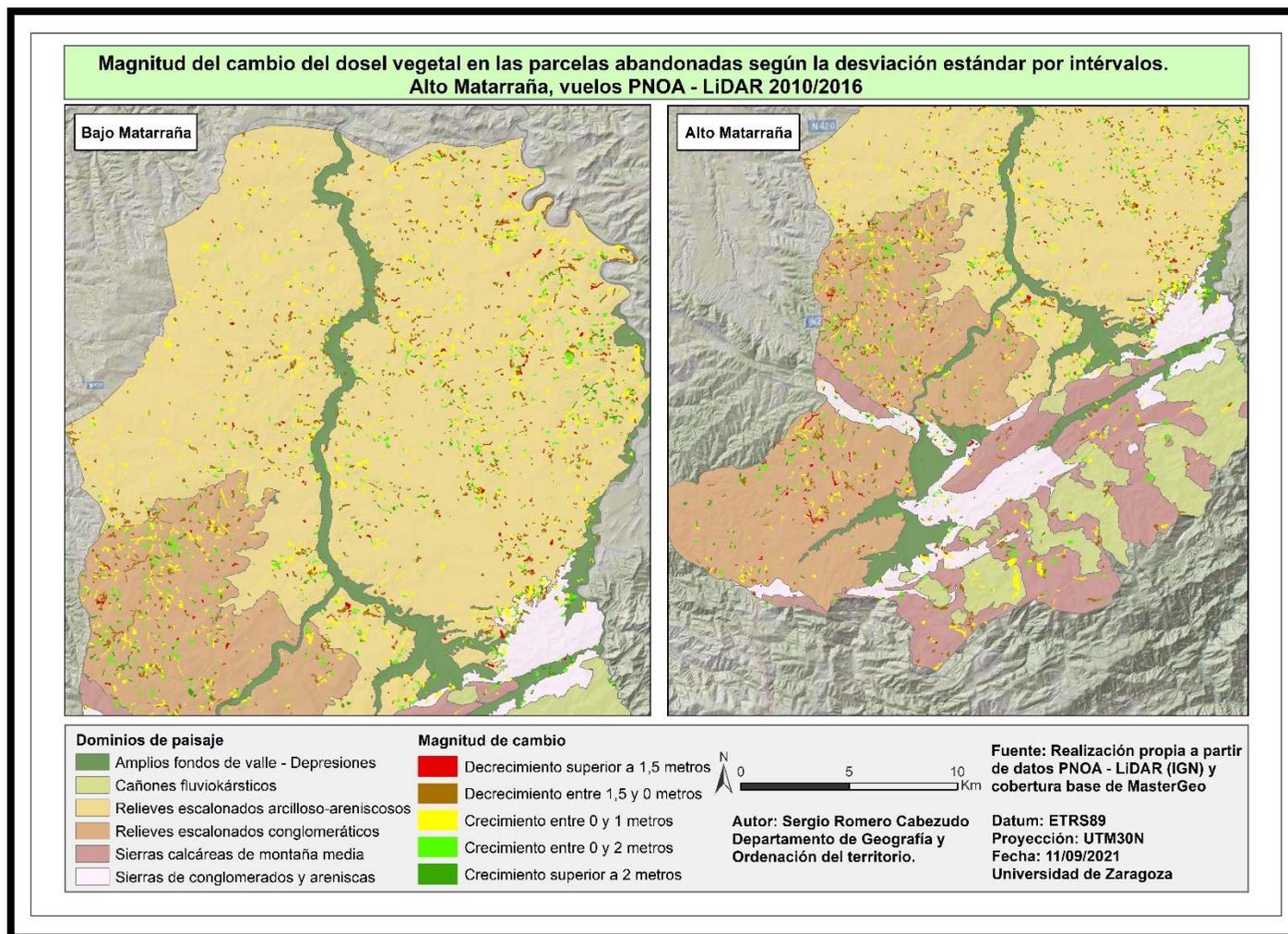


Cartografía 8: Variabilidad vertical de la cubierta según la desviación estándar. Alto Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.

Finalmente, en la **cartografía 9** se muestra la magnitud del cambio de la variabilidad del dosel vegetal y se puede comprobar como las consideraciones realizadas en cuanto a las cartografías anteriores (**cartografía 7**, **cartografía 8**) se cumplen. Es destacable como en el bajo Matarraña es donde la variabilidad vertical del dosel vegetal varía mínimamente o decrece, por lo que los estratos son homogéneos sin ninguno que destaque en altura sobre el resto. En el alto Matarraña la situación es similar y la variabilidad vertical del dosel no crece en exceso o desciende mínimamente por lo que también se espera encontrar parcelas cuyo estrato es similar en el conjunto, pero que, en contraposición a la zona del bajo Matarraña, presentan una altura mayor. Nuevamente se aprecia como en el sector occidental y nororiental de la comarca, en los dominios de los relieves escalonados conglomeráticos y arcillo – areniscosos, se encuentran los mayores valores de cambio y como pese a algún descenso puntual en la variabilidad vertical del dosel vegetal, la tendencia es al alza. Esto puede poner de manifiesto como alguna especie puede estar colonizando estas parcelas y destacando en altura sobre el resto de estratos generando así valores de desviación típica elevados.

Por lo tanto, las principales conclusiones que se pueden obtener de la observación meramente cartográfica y descriptiva de las parcelas en el área de estudio es que hay un gran contraste en la estructura vegetal entre la zona del bajo y alto Matarraña y más concretamente en dos dominios de paisaje claramente diferenciados respecto al resto. Si en el Trabajo Fin de Grado se apreciaban contrastes, pero la conclusión general fue que se asiste a un proceso de revegetación prolongado en el tiempo, en este caso el análisis de la estructura vegetal matiza esa afirmación de la revegetación pues ya se ha comprobado mediante estas cartografías que muchas parcelas descienden en cuanto a la altura del dosel, y solo en un periodo de 6 años. Por el contrario, se observa como también existe una fuerte disparidad entre las parcelas del bajo Matarraña que tienen una estructura más homogénea puesto que su porte es menor y aún no han experimentado un crecimiento muy elevado y las del sur, que, si bien no son tan homogéneas, ya muestran más variación en su estructura vertical. Pero lo que realmente es destacable en esta primera aproximación, son los dos focos situados en el dominio de los relieves escalonados conglomeráticos y arcillo – areniscosos donde no solo hay grandes valores de altitud en los años 2010 y 2016, sino que hay una gran magnitud de cambio entre ambos años y una variabilidad en la estructura vertical del dosel que destaca por ser muy elevada respecto al conjunto de la comarca.

Como atendiendo únicamente a las cartografías solo se pueden realizar análisis descriptivos y es complicado cuantificar alturas concretas por parcelas, el número de parcelas según su estrato vegetal o el grado de significación entre unos determinados valores de altura y desviación en función de las diferentes variables del terreno, se ha optado por un análisis estadístico y un exploratorio de los datos.



Cartografía 9: Cambios en la variabilidad estructural vertical (desviación estándar). Comarca de Matarraña, vuelos PNOA – LiDAR 2010/2016. Fuente: Realización propia mediante ArcMap 10.7.1.

6.2 Exploratorio de los datos relativos a la estructura de las parcelas abandonadas en la comarca de Matarraña

Comprendida la dinámica general en cuanto a la distribución de las parcelas por la comarca y explorados de manera descriptiva los estadísticos del percentil 99 para las alturas, y la desviación típica para la variabilidad vertical del dosel vegetal, se procederá a continuación a hacer un exploratorio de los datos que permita dar una mayor veracidad a las consideraciones realizadas anteriormente, así como poder afirmar o denegar las hipótesis planteadas en los objetivos del proyecto, con el fin último de poder realizar un análisis de la estructura vegetal de las parcelas abandonadas de la comarca de Matarraña. Para hacer la descripción de los datos se han tenido en cuenta el número de parcelas por estrato, el cambio experimentado en los estratos, la distribución de la superficie por estratos y la altura de los estratos ponderada por la superficie de las diferentes parcelas.

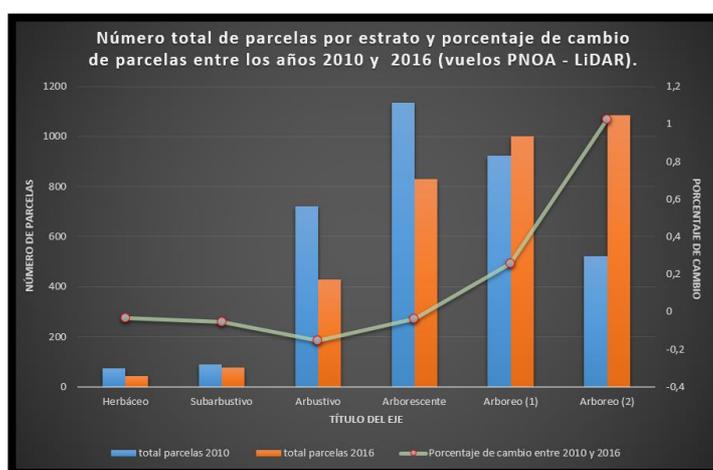


Figura 12: Número total de parcelas por estrato y porcentaje de cambio de parcelas entre los años 2010 y 2016. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.

Un primer punto de aproximación al análisis consiste en comenzar por conocer el número de parcelas existentes según los estratos. Por ello, el primero de los gráficos generados (**figura 11**) muestra el número total de parcelas, pero agrupadas en función del estrato, a su vez definido gracias a los valores del percentil 99. De esta manera se puede comprobar como el estrato herbáceo y subarbusivo son los que menos representación tienen el conjunto del área de estudio. Estas parcelas cuyos estratos van de 0 a 0.5 y de 0.5 a 1 metro se congregan fundamentalmente en la zona norte del bajo Matarraña tal y como se apreciaba en las cartografías. Estas se corresponden con aquellas parcelas que posiblemente hayan sido abandonadas muy recientemente y en las que la vegetación comienza a abrirse paso o las que no están abandonadas.

El grupo que destaca por repartirse en el área de estudio de manera uniforme es el arbustivo, es decir, las parcelas cuyas alturas tienen entre 1 y 3 metros. Este es el porte más común en cuanto a su distribución espacial en el área de estudio en 2010 y uno de los que juega un papel fundamental en el cambio entre los vuelos de 2010 y 2016 pues tal y como se puede apreciar en la **figura 11**, tiene un acusado descenso y ese descenso significa que dichas parcelas han cambiado de estrato. Por el contrario, el estrato

arborescente, con un porte que va desde los 3 a los 5 metros es el que mayor número de parcelas recoge en el año 2010, teniendo también un descenso notable en cuanto a su número en 2016. En este caso ocurre lo mismo que con el arbustivo ya que se reparte de manera uniforme por el territorio y es uno de los principales estratos que propician el cambio de los estratos arbóreos. Estos estratos arbóreos, denominados “*arbóreo 1 y 2*” cuyas alturas van desde los 5 a 7,5 metros y desde los 7,5 m² hasta los máximos de altura observados tienen una clara retroalimentación, pues muchos de los arbóreos del grupo 1 crecerán hasta entrar en arbóreo 2.

Para ilustrar correctamente estos cambios entre el número de parcelas se ha generado un gráfico que muestra la tipología de cambios en las parcelas según su estrato tal y como se muestra en la **figura 12**. Para ello, se ha hecho uso de la información del percentil 99 y del porcentaje de retornos por estrato para cada una de las parcelas.

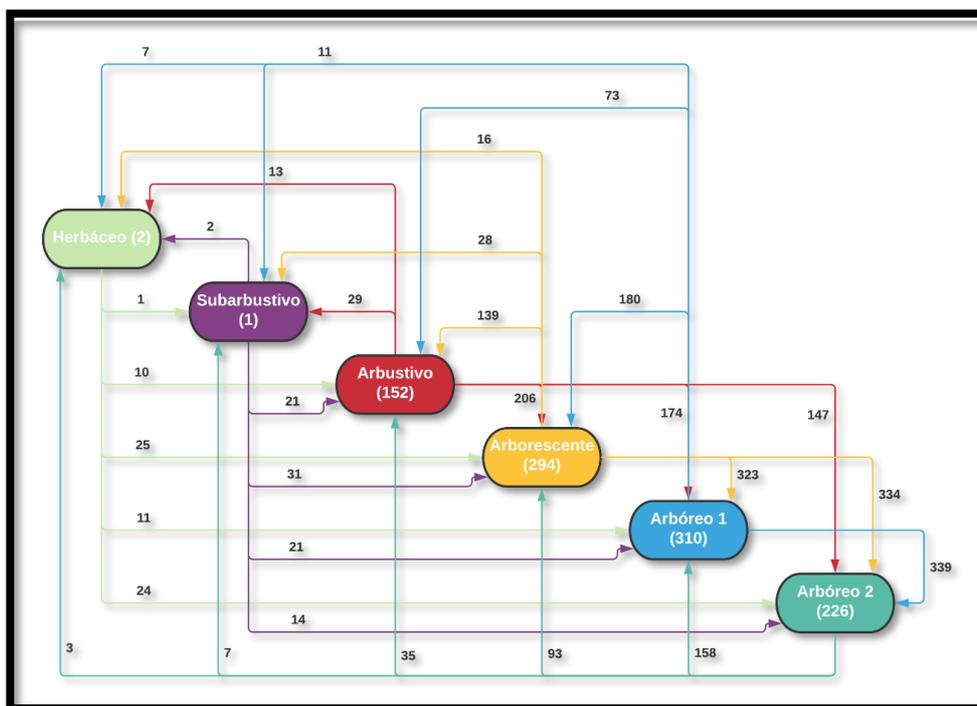


Figura 13: Tipología de cambios en las parcelas según su estrato. Fuente: Realización propia mediante Lucidspark.

En el gráfico se muestran los diferentes estratos junto con el número de parcelas que entre el vuelo de 2010 y de 2016 no han variado en su altura y, por lo tanto, mantienen su mismo estrato. Por el contrario, se pueden comprobar los movimientos desde un estrato al resto y el número de parcelas que han variado desde 2010 a 2016 desde un estrato determinado hacia el resto. Las principales consideraciones que se pueden obtener es que los estratos herbáceos y subarbustivos han crecido en su inmensa mayoría en los 6 años de diferencia, quedando solo 3 parcelas iguales en este periodo de tiempo. El resto de parcelas cuyos estratos tienen más porte, mantienen un número mayor de parcelas “estables” y sin cambios. Pero pese a ello, un gran número de estas parcelas sigue creciendo en altura hacia estratos superiores. Finalmente, es necesario destacar que también se producen decrecimientos, en todos y cada uno de los estratos, pero desde

luego, no tan acusados como los crecimientos. En cuanto a las situaciones de decrecimiento, normalmente es entre 1 o 2 estratos donde se encuentran los números más elevados, pudiendo ser perfectamente natural y correspondiéndose con los cambios que puede experimentar la vegetación existente en un parcela debido a su propio ciclo vital, sin embargo, existen decrecimientos desde los estratos arbóreos hasta los subarbustivos o herbáceos que pueden poner de manifiesto que algunas parcelas se comienzan a aprovechar de nuevo, pues no se conocen otros indicios, o incendios en el área de estudio que hayan propiciado una variación del estrato tan destacada.

Pero nuevamente, estas consideraciones solo hablan del número de parcelas incluidas dentro de un determinado estrato o de los movimientos entre estratos, lo cual es ilustrativo y necesario, pero no se tiene en cuenta la superficie, puesto que puede haber pocas parcelas de estrato herbáceo y subarbustivo, pero estas podrían representar una superficie realmente elevada del conjunto. Para conocer la realidad que existe en cuanto a la superficie, y teniendo en cuenta los estratos, se presentan a continuación dos gráficos (figuras 13, 14).

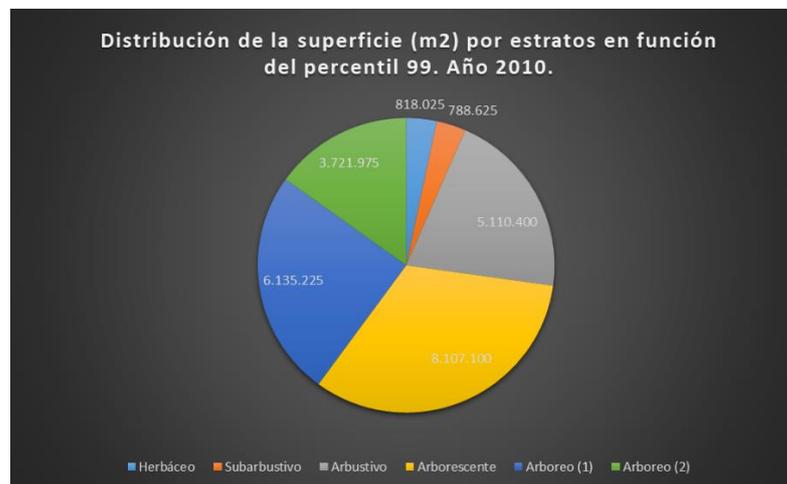


Figura 14: Distribución de la superficie (m2) por estratos en función del percentil 99. Año 2010. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.

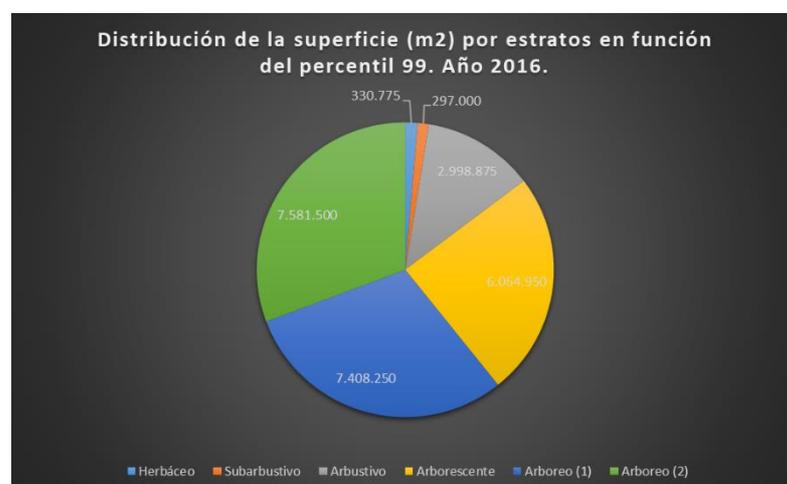


Figura 15: Distribución de la superficie (r) por estratos en función del percentil 99. Año 2016. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.

Mediante estos gráficos se puede entender en términos de superficie cual ha sido la dinámica de cambio, que en este caso es muy similar a los datos de la **figura 11**. Se aprecian los crecimientos y decrecimientos en términos de superficie siendo en 2010 el estrato arborescente el más representativo y quedando este enormemente reducido en el año 2016 para dar paso a estratos de porte arbóreo. Por el contrario, los estratos de bajo porte que ya contaban con una representación reducida, ven como su superficie desciende de manera alarmante, quedando los estratos herbáceos y subarborescivos sin prácticamente representación seguidos del arbustivo.

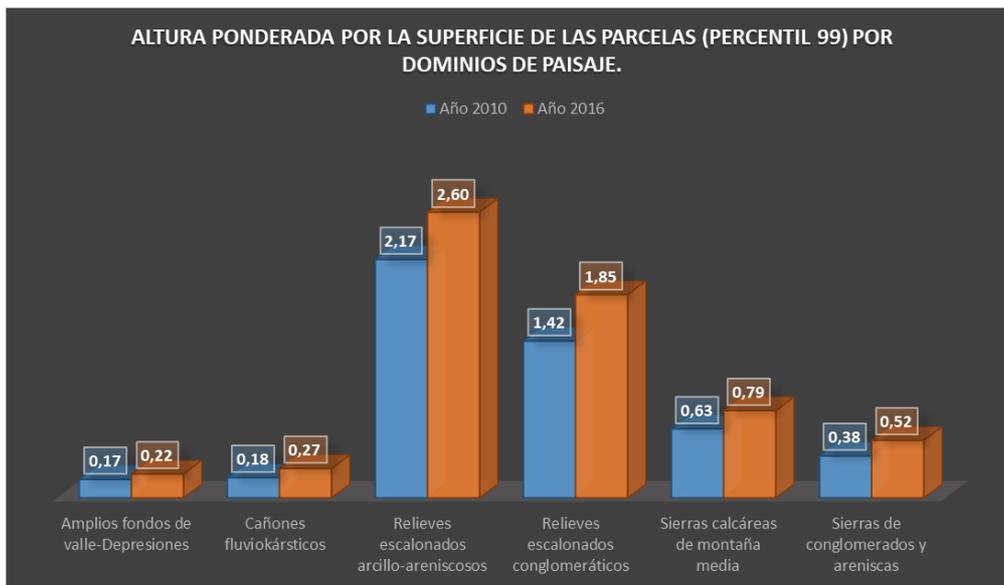


Figura 16: *Altura ponderada por la superficie de las parcelas (percentil 99) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia mediante datos extraídos del PNOA – LiDAR.*

Finalmente, la **figura 15** muestra la altura promedio de las diferentes parcelas por dominios de paisaje. Pero para realizar este gráfico no se han usado los datos del percentil 99 obtenidos directamente del tratamiento de las nubes de puntos, sino que se ha hecho una ponderación por la superficie de las parcelas. La superficie y la forma de estas parcelas es muy relevante a la hora de analizar los datos, pues, aunque dos parcelas sean de estrato arbóreo y que su valor de percentil 99, o de cualquier otro estadístico, sea idéntico, estas parcelas no son iguales ya que el mismo dato puede provenir de una parcela con 10 píxeles de información y otra con 50 píxeles de información. De esta manera se evita este sesgo de los datos y se puede comprobar como dos dominios de paisaje destacan sobre el resto, los relieves escalonados arcillo –areniscosos y los relieves escalonados conglomeráticos. Estos a su vez son los que en las cartografías obtenían los mayores valores de altura, desviación y cambio, y, por lo tanto, sobre los que se realizará el análisis.

Mediante este sencillo exploratorio de los datos y de la cartografía se comprueba como igual que sucedía con el cubrimiento vegetal, la estructura también tiene unas variaciones espaciales norte – sur muy marcadas y a su vez se asiste a un crecimiento de la altura de la cubierta vegetal moderado y paulatino en el tiempo, aunque con pequeños matices de descenso en ciertos estratos.

6.3 La estructura vegetal en relación con las variables explicativas

Visto el pequeño exploratorio de los datos, se puede apreciar como existen dos dominios de paisaje sobre los que mayor cambio se ve entre los diferentes estadísticos (percentil 99 y desviación típica). Estos son los relieves escalonados arcillo – areniscosos y los relieves escalonados conglomeráticos. Teniendo en cuenta que se encuentran bien situados a lo largo del área de estudio, y que en el resto de los dominios no hay un gran número de parcelas por razones como el relieve, o la proximidad a ríos encajados en valles, se ha optado por la realización del análisis de variables ambientales explicativas en estos dos dominios en concreto. Las variables explicativas que se van a utilizar en el siguiente apartado son las siguientes:

- Vegetación.
- Unidades fisio - geomorfológicas.
- Cercanía a carreteras.
- Pendiente.

5.3.1: Los relieves escalonados arcillo – areniscosos.

Comenzando por el dominio de los relieves escalonados arcillo – areniscosos, el primer paso en la búsqueda de variables explicativas que puedan servir para conocer el comportamiento de la estructura vegetal en las parcelas de los dominios donde mayores cambios se aprecian ha consistido en el cruce de la información del percentil 99 de los años 2010 y 2016 junto con las pendientes. Para ello se ha utilizado XLSTATS y se ha realizado un análisis de regresión lineal y junto con una prueba de normalidad. En primer lugar, atendiendo a los datos de la **figura 16** se asume que no existe normalidad, lo que ha llevado a la realización del test de Kruskal – Wallis, utilizado para datos con carácter no paramétrico.

Pruebas las hipótesis:	
Prueba sobre la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk). (Media 2010):	
W	0,960
valor-p (bilateral)	<0,0001
alfa	0,050
Interpretación de la prueba:	
H0: Los residuos siguen una distribución Normal.	
Ha: Los residuos no siguen una distribución Normal.	
Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.	

Figura 17: Realización del test de normalidad para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

El resultado de dicho test (**figura 17**) muestra como no existe una relación entre las variables comparadas, es decir, la pendiente no es un factor determinante en la altura de la cubierta vegetal. Esto ya se podía comprobar en las cartografías donde se podía

observar como parcelas situadas en dominios de paisaje con un relieve accidentado y altitudes elevadas obtenían datos de percentil 99 elevados.

Prueba de Kruskal-Wallis / Prueba bilateral:	
K (Valor obse	1437,876
K (Valor crític	3,841
GL	1
valor-p (unila	<0,0001
alfa	0,050
Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.	
Interpretación de la prueba:	
H0: Las muestras vienen de la misma población.	
Ha: Las muestras no vienen de la misma población.	
Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.	

Figura 18: Test no paramétrico de Kruskal Wallis. Fuente: XLSTAT.

Finalmente, generando un gráfico de regresión lineal se puede comprobar como no existe una relación significativa, ya que el estadístico r^2 es de 0,108 para el año 2010 (**figura 18 a**) y de 0,037 para el año 2016 (**figura 18 b**). Es destacado como comparando los dos valores de percentil, la pendiente baja su valor de r^2 . Esto puede venir motivado por los errores de captura de datos LiDAR de los vuelos PNOA de 2016 cuyo ángulo de escaneo ha podido generar problemas que hacen que este valor descienda respecto al vuelo de 2010.

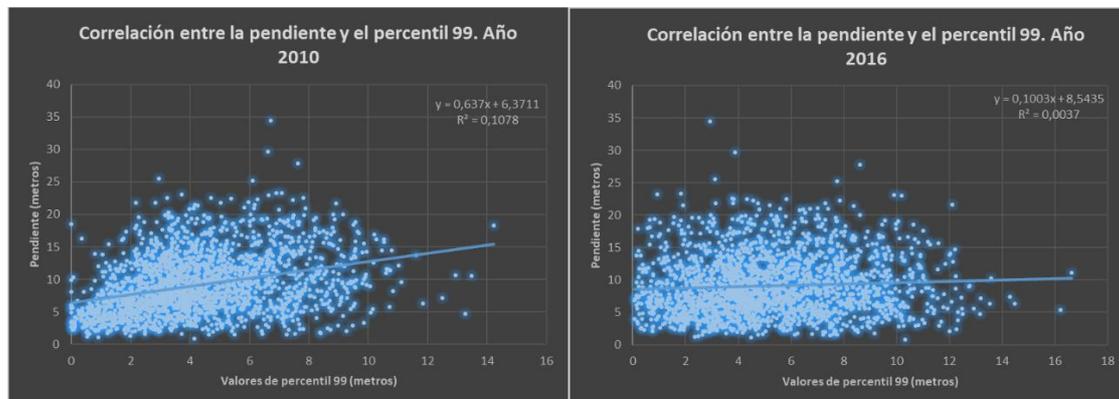


Figura 19: Diagramas de dispersión (pendiente y percentil 99) para los años 2010 y 2016. Fuente: Realización propia.

Continuando con la variable explicativa de las Unidades fisio - geomorfológicas, se ha comenzado por realizar una categorización de dichas unidades de la siguiente manera:

- Fondos de valle en U: 1
- Plataformas escalonadas: 2
- Plataformas onduladas: 3
- Taludes 5 – 25 metros: 4
- Taludes tendidos: 5
- Vales: 6

Una vez realizada la categorización, se ha hecho un test ANOVA para comprobar en primer lugar la normalidad. Nuevamente se ha comprobado cómo no tienen una distribución normal, por lo que se ha optado nuevamente por la realización de un test no paramétrico de Kruskal – Wallis. En este caso los resultados se exponen en las **figura 19**.

Prueba de Kruskal-Wallis /		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos
K (Valor observado)	8,164	5	102	102732,000	1007,176	A
K (Valor crítico)	11,070	6	457	460484,000	1007,624	A
GL	5	2	216	220907,000	1022,718	A
valor-p (unilateral)	0,147	1	4	4263,000	1065,750	A
alfa	0,050	3	426	457840,000	1074,742	A
		4	915	1002034,000	1095,119	A

Figura 20: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

En este caso el valor de p es mayor que el de alfa, el nivel de significación por lo que se puede afirmar que las muestras vienen de la misma población. Esto fundamentalmente quiere decir que independientemente de la unidad fisiológica que se analice, el comportamiento del percentil 99 no variará de manera especial en ningún caso, por lo que no existe una unidad fisiológica que sea determinante en los valores de altura de la estructura vegetal de las parcelas. Pese a ello la corrección de Bonferroni, una manera de identificar que categorías tienen comportamientos diferentes, muestra que la categoría 6 tiene un comportamiento que difiere del resto de categorías (**figura 20**) y que podría ser indicativo de que los vales de fondo plano sí que juegan un papel relevante en la altura de la cubierta vegetal.

	1	2	3	4	5	6
1	1	0,889	0,977	0,924	0,851	0,850
2	0,889	1	0,309	0,118	0,833	0,765
3	0,977	0,309	1	0,570	0,317	0,104
4	0,924	0,118	0,570	1	0,169	0,013
5	0,851	0,833	0,317	0,169	1	0,995
6	0,850	0,765	0,104	0,013	0,995	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 21: Corrección de Bonferroni para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

La siguiente variable explicativa fue la vegetación a la que nuevamente se le aplicó una categorización como en el caso anterior:

- Bosques mixtos esclerófilos: 1
- Cauces: 2
- Cultivos herbáceos: 3
- Cultivos leñosos: 4
- Matorrales mediterráneos: 5
- Mosaico agroforestal: 6
- Pinares mediterráneos y submediterráneos: 7

- Prados y praderas: 8
- Vegetación de ribera: 9

Nuevamente, tras la realización del test ANOVAS y la comprobación de la normalidad de las variables, no se han encontrado resultados que se ajustasen a esta distribución, por lo que se ha acudido a la realización del test de Kruskal – wallis donde se ha comprobado (**figura 21**) que, en contraposición al caso de las Unidades fisio - geomorfológicas, indica que existen diferencias entre los tipos de vegetación si esta se pone en relación con el percentil 99.

Prueba de Kruskal-Wallis / Prueba bilateral (Media 2010):	
K (Valor observado)	20,943
K (Valor crítico)	15,507
GL	8
valor-p (unilateral)	0,007
alfa	0,050
Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.	
Interpretación de la prueba:	
H0: Las muestras vienen de la misma población.	
Ha: Las muestras no vienen de la misma población.	
Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.	

Figura 22: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Teniendo esto en cuenta, se ha optado por la implementación de la corrección de Bonferroni, que tal y como se indicó con anterioridad, permite identificar que categorías tienen comportamientos diferentes (**figura 22**).

valores-p:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0,577	0,166	0,282	0,539	0,170	0,052	0,081	0,284
2	0,577	1	0,989	0,869	0,370	0,992	0,852	0,505	0,479
3	0,166	0,989	1	0,376	0,094	0,923	0,403	0,274	0,435
4	0,282	0,869	0,376	1	0,146	0,367	0,000	0,167	0,382
5	0,539	0,370	0,094	0,146	1	0,097	0,042	0,045	0,208
6	0,170	0,992	0,923	0,367	0,097	1	0,263	0,255	0,428
7	0,052	0,852	0,403	0,000	0,042	0,263	1	0,375	0,486
8	0,081	0,505	0,274	0,167	0,045	0,255	0,375	1	0,718
9	0,284	0,479	0,435	0,382	0,208	0,428	0,486	0,718	1
Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0014									

Figura 23: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Según esta figura, las categorías de cultivos leñosos (4) y los pinares mediterráneos y submediterráneos son los que obtienen diferencias en cuanto al comportamiento de los estratos según el percentil 99. Además, estos datos no son erróneos pues en el comentario de las cartografías ya se apreciaba como los mayores valores del percentil 99 o de variación vertical del dosel vegetal coincidían espacialmente con zonas donde predominaba este tipo de vegetación.

Finalmente, la última de las variables hace referencia a la cercanía a carreteras, pues podría darse el caso de que, en función de la distancia a estas vías, el coste de acceso a las parcelas sea mayor o menor y que esto se traduzca en una mayor influencia del ser humano en estas áreas que pudiera hacer que algunas de estas parcelas abandonadas no lo estuviesen y por lo tanto hubiera variaciones en el percentil 99. Para ello se ha realizado una categorización de la siguiente manera:

- Sin buena accesibilidad: 0
- Accesibilidad desde zonas cultivadas: 1
- Accesibilidad a menos de 60 metros de carreteras: 2
- Accesibilidad a menos de 40 metros de pistas: 3
- Accesibilidad a menos de 20 metros de senderos: 4
- Accesibilidad a menos de 100 metros de un núcleo de población: 5

Tras la realización del test ANOVAS, esta última variable explicativa tampoco era normal por lo que nuevamente se ha optado por la realización del test de kruskal – wallis (**figura 23**) en el que, igual que ha sucedido con la mayoría de las variables explicativas, no se aprecia que ningún tipo de accesibilidad juegue un papel relevante en los valores del percentil 99.

Prueba de Kruskal-Wallis / I		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos
K (Valor obse	8,602	5	16	11020,000	688,750	A
K (Valor crític	11,070	2	160	163050,500	1019,066	A
GL	5	3	1280	1355235,500	1058,778	A
valor-p (unila	0,126	4	114	121467,000	1065,500	A
alfa	0,050	1	350	373416,000	1066,903	A
		0	200	224071,000	1120,355	A

Figura 24: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Finalmente aplicando la corrección de Bonferroni (**figura 24**) se puede comprobar como la categoría 5, difiere del resto en cuanto a su significación por lo que la accesibilidad a menos de 100 metros de un núcleo de población juega un papel relevante en los valores de percentil 99.

valores-p:						
	0	1	2	3	4	5
0	1	0,325	0,119	0,186	0,445	0,007
1	0,325	1	0,413	0,826	0,983	0,016
2	0,119	0,413	1	0,439	0,536	0,040
3	0,186	0,826	0,439	1	0,911	0,016
4	0,445	0,983	0,536	0,911	1	0,021
5	0,007	0,016	0,040	0,016	0,021	1
Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033						

Figura 25: Corrección de Bonferroni para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Comprendida la altura para este dominio el siguiente paso lógico ha sido realizar lo propio con la variación vertical del dosel vegetal (desviación típica) siendo los resultados completamente iguales a los del percentil 99. Por lo tanto, la variación vertical del dosel vegetal no depende de la pendiente, ni de ninguna variable explicativa como tal a excepción de la vegetación (pinos mediterráneos - submediterráneos y cultivos leñosos). Además, igual que sucedía con el percentil 99 se presentan en el **anexo x** las tablas de la corrección de Bonferroni para cada una de las variables explicativas respecto a la desviación típica, donde se aprecia de nuevo como los vales de fondo plano, la accesibilidad a menos de 100 metros de un núcleo de población y la vegetación citada determinan el comportamiento de la variabilidad vertical del dosel vegetal.

5.3.2: Los relieves escalonados conglomeráticos:

El segundo de los dominios de paisaje donde se va a realizar el análisis de las variables explicativas es el de los relieves escalonados conglomeráticos. Dicho dominio se sitúa al sureste de la comarca y se compone de materiales detríticos como conglomerados, arcillas y areniscas que geomorfológicamente se organizan en relieves amesetados predominando así morfologías como vales y relieves escalonados de superficie plana (Ibarra et al., 2011, Ric e Ibarra, 2015).

Comenzando por el análisis de la pendiente, nuevamente se ha realizado un análisis de regresión lineal para comprobar si la pendiente juega un papel determinante en la altura de las parcelas (percentil 99) junto con un análisis de la normalidad (**figura 25**)

Prueba sobre la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk).	
W	0,989
valor-p (bilat)	<0,0001
alfa	0,050

Figura 26: Realización del test de normalidad para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Debido a los resultados obtenidos se ha realizado el test de Kruskal – Wallis con carácter no paramétrico (**figura 26**).

Prueba de Kruskal-Wallis / i		Comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de Dunn / Prue				
		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos
K (Valor obs)	554,174	Media 2010	803	426456,500	531,079	A
K (Valor criti)	3,841	NXALT	803	863964,500	1075,921	B
GL	1					
valor-p (unil)	<0,0001					
alfa	0,050					

Se ha utilizado una aproximación

Figura 27: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para pendientes y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Los resultados muestran como no existe una relación directa entre las variables y, por lo tanto, la pendiente no juega un papel determinante en los valores de percentil 99 de las parcelas abandonadas en este dominio, de igual manera que sucedía con el otro. Nuevamente, para ilustrar los resultados obtenidos en cuanto a la pendiente en relación con el percentil 99, se han generado dos gráficos de dispersión (**figura 27**) que muestran que los valores de r^2 son especialmente bajos siendo el de 2010 de 0,0394 y el de 2016 de 0,0023 por lo que la pendiente explica realmente una cantidad ínfima de información del percentil 99.

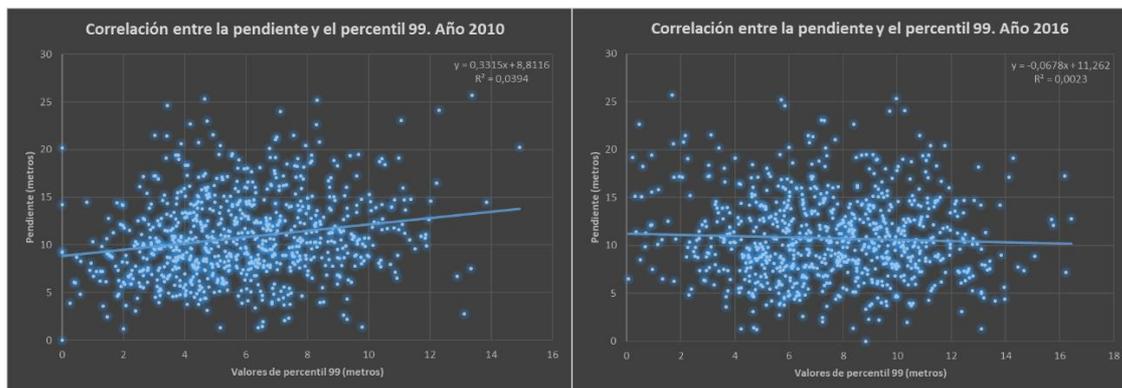


Figura 28: Diagramas de dispersión (pendiente y percentil 99) para los años 2010 y 2016.
Fuente: Realización propia.

Pese a ello se puede apreciar la misma dinámica que en el anterior dominio, observando como en 2010 la significación es menor y la pendiente de la línea de tendencia desciende, por lo que nuevamente se podría pensar que en el proceso de captura de datos del vuelo de 2016 LiDAR – PNOA han ocurrido algunos fallos.

En cuanto a la vegetación en relación con el percentil 99, se ha realizado una categorización de la siguiente manera para facilitar en el análisis estadístico:

- Bosques mixtos esclerófilos: 1
- Cultivos herbáceos: 2
- Cultivos leñosos: 3
- Frondosas perennifolias: 4
- Matorrales mediterráneos: 5
- Mosaico agroforestal: 6
- Pinares mediterráneos y submediterráneos: 7
- Prados y praderas: 8

Tras realizar un análisis ANOVA y determinar que las muestras no son normales se ha procedido a la realización del test Kruskal – Wallis cuyos resultados se muestran en la **figura 28**.

Prueba de Kruskal-Wallis / P		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos	
K (Valor observado)	153,380	8	18	3121,000	173,389	A	
K (Valor crítico)	14,067	2	50	11535,000	230,700	A	
GL	7	5	22	6674,000	303,364	A	
valor-p (unilateral)	<0,0001	3	179	54726,000	305,732	A	
alfa	0,050	6	79	25095,000	317,658	A	
		4	2	947,000	473,500	A	B
		7	429	207437,000	483,536		B
		1	24	13271,000	552,958		B

Figura 29: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Los resultados en este caso son diferentes que, en el anterior dominio, en este caso no se observa que todos los tipos de vegetación tengan un comportamiento similar, sino que existen claras diferencias. En primer lugar, el valor de p indica como las muestras no vienen de la misma población por lo que existen diferencias entre las clases 8 y 7, 8 y 1, 2 y 7, 2 y 1 y así sucesivamente. Esta comparación por pares es similar a la comparación que se podría haber realizado con un análisis ANOVA en el caso de que se hubieran observado valores de normalidad. Finalmente, la **figura 29** muestra la *corrección de Bonferroni* expresada en diferencias significativas:

valores-p:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	<0,0001	<0,0001	0,642	0,000	<0,0001	0,154	<0,0001	
2	<0,0001	1	0,043	0,147	0,221	0,038	<0,0001	0,369	
3	<0,0001	0,043	1	0,309	0,964	0,703	<0,0001	0,021	
4	0,642	0,147	0,309	1	0,321	0,348	0,951	0,083	
5	0,000	0,221	0,964	0,321	1	0,798	0,000	0,078	
6	<0,0001	0,038	0,703	0,348	0,798	1	<0,0001	0,017	
7	0,154	<0,0001	<0,0001	0,951	0,000	<0,0001	1	<0,0001	
8	<0,0001	0,369	0,021	0,083	0,078	0,017	<0,0001	1	

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0018

Figura 30: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

En definitiva, en este dominio la vegetación sí que juega un papel relevante en los valores de la altura de las parcelas pudiéndose avalar esta afirmación mediante datos estadísticos. La única categoría de vegetación cuyo comportamiento no influye es la 4 que hace referencia a los bosques mixtos esclerófilos. Es necesario destacar que este dominio tiene una superficie más reducida que el anterior y se concentra en una zona muy concreta de la comarca, tal y como se apreciaba en las cartografías, por lo que, aunque la inmensa mayoría de tipos de vegetación son relevantes, los que más destacan en cuanto a su frecuencia son los pinares mediterráneos y submediterráneos junto con los cultivos leñosos, igual que sucedía en el dominio de los relieves escalonados arcillo – areniscosos.

La tercera de las variables explicativas son las Unidades fisio - geomorfológicas que se han categorizado de la siguiente manera:

- Fondos de valle abierto: 1
- Plataformas escalonadas: 2
- Taludes 5 – 25 metros: 3

- Taludes muy pendientes: 4
- Taludes tendidos: 5
- Vales: 6

El análisis ANOVA de los datos de percentil 99 junto con las Unidades fisio - geomorfológicas ha puesto de manifiesto que los datos no son normales por lo que se ha optado por la realización del test Kruskal – Wallis (**figura 30**). En este caso los resultados muestran que las Unidades fisio - geomorfológicas no juegan un papel fundamental en los valores de percentil 99 siendo necesaria nuevamente la corrección de Bonferroni para analizar si a pesar de estos resultados existe alguna unidad fisiológica que tenga un comportamiento diferente respecto al resto (**figura 31**).

Prueba de Kruskal-Wallis		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos
K (Valor observado)	35,545	1	1	74,000	74,000	A
K (Valor crítico)	11,070	5	7	1724,000	246,286	A
GL	5	2	59	19622,000	332,576	A
valor-p (unilateral)	<0,0001	6	188	63458,000	337,543	A
alfa	0,050	4	4	1642,000	410,500	A
		3	544	236286,000	434,349	A

Figura 31: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para Unidades fisio - geomorfológicas y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

valores-p:	1	2	3	4	5	6
1	1	0,269	0,121	0,194	0,487	0,257
2	0,269	1	0,001	0,516	0,352	0,886
3	0,121	0,001	1	0,838	0,033	<0,0001
4	0,194	0,516	0,838	1	0,259	0,534
5	0,487	0,352	0,033	0,259	1	0,307
6	0,257	0,886	<0,0001	0,534	0,307	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 32: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

En este caso la **figura 31** muestra como las categorías 2, 3 y 6 aportan diferencias significativas en cuanto al comportamiento del percentil 99. Estas son las plataformas escalonadas, los taludes entre 5 -25 metros y los vales de fondo plano. Estos datos son coherentes con los lugares donde se espera que la estructura de la vegetación prospere, pues son zonas donde la pendiente no es elevada y permite un desarrollo de la vegetación óptimo.

Finalmente, la última de las variables empleadas para la explicación de los valores de percentil 99 es la accesibilidad a carreteras que se ha categorizado de la siguiente manera:

- Sin buena accesibilidad: 0

- Accesibilidad desde zonas cultivadas: 1
- Accesibilidad a menos de 60 metros de carreteras: 2
- Accesibilidad a menos de 40 metros de pistas: 3
- Accesibilidad a menos de 20 metros de senderos: 4
- Accesibilidad a menos de 100 metros de un núcleo de población: 5

Tras la realización del test ANOVA y comprobar que no existe normalidad se ha utilizado Kruskal – Wallis de nuevo (**figura 32**) y en este caso, de igual manera que sucedía con la vegetación sí que se observan diferencias significativas entre las diferentes categorías de accesibilidad. En concreto, las diferencias se encuentran entre las categorías 5,2 y 3 respecto a la 0. Esto se puede constatar de nuevo con *la corrección de Bonferroni* (**figura 33**) y quiere decir que el comportamiento la altura de la vegetación de las parcelas varía en función de si no tienen buena accesibilidad, lo cual es coherente, pues una parcela que no es accesible en ningún momento tendrá la influencia directa del ser humano lo que conlleva que, si el resto de condiciones ambientales son favorables, se produzca un crecimiento en la altura de la vegetación. El resto de categorías que también presentan significación son las de accesibilidad a menos de 60 metros de carreteras, de 40 metros de pistas y de menos de 100 metros desde un núcleo de población lo cual nuevamente es coherente, pues son las más restrictivas en cuanto a lejanía y nuevamente un indicativo de menor influencia del ser humano quedando las de accesibilidad a menos de 20 metros y desde zonas cultivadas con un comportamiento similar, pues ambas están muy próximas a las zonas de las parcelas abandonadas.

Prueba de Kruskal-Wallis /		Muestra	Frecuencia	Suma de rangos	Media de rangos	Grupos	
K (Valor observado)	36,114	5	3	259,000	86,333	A	
K (Valor crítico)	11,070	2	66	24295,000	368,106	A	
GL	5	3	512	194355,000	379,600	A	
valor-p (unilateral)	<0,0001	1	47	18600,000	395,745	A	B
alfa	0,050	4	35	16101,000	460,029	A	B
		0	140	69196,000	494,257		B

Figura 33: Test no paramétrico de Kruskal Wallis para accesibilidad y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

valores-p:		0	1	2	3	4	5
0	1	0,012	0,000	<0,0001	0,435	0,003	
1	0,012	1	0,532	0,648	0,214	0,025	
2	0,000	0,532	1	0,705	0,058	0,040	
3	<0,0001	0,648	0,705	1	0,047	0,029	
4	0,435	0,214	0,058	0,047	1	0,007	
5	0,003	0,025	0,040	0,029	0,007	1	

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 34: Corrección de Bonferroni para vegetación y percentil 99. Fuente: XLSTAT.

Con la altura realizada, se ha llevado a cabo el mismo análisis para la variación vertical del dosel vegetal (desviación típica), cuyos resultados son iguales a los observados en el percentil 99 y se encuentran en el **anexo**. Por lo tanto, en este dominio de paisaje la altura de la vegetación y la variabilidad vertical vienen muy determinadas por la vegetación (matorrales, mosaico agroforestal, pinares o cultivos leñosos), las Unidades fisio - geomorfológicas (vales, taludes suaves y plataformas) y la accesibilidad (sin accesibilidad a parcelas, o con accesibilidades que restringen). Este dominio tiene un comportamiento similar al anterior, aunque son más categorías de las variables explicativas las que intervienen y con una significación mayor.

6.4 Combinación de información LiDAR y Landsat

Tal y como se introdujo en la introducción, la información del óptico es susceptible de una serie de factores como por ejemplo la topografía, y mediante los neocanales generados a partir de las bandas Landsat no se puede comprender únicamente la estructura de la cobertura vegetal. Por ello en el presente apartado se pretende realizar una combinación entre la información tratada hasta ahora junto con la información obtenida tras el proceso metodológico realizado en el Trabajo Fin de Grado con el fin de observar si existe una correspondencia entre valores de NDVI y Verdor con las métricas LiDAR obtenidas.

El primero de los resultados tras el cruce de información (**figura 35**) es un gráfico de dispersión que pone en relación el percentil 99 con el NDVI y el Verdor. En el **anexo** se muestran los gráficos relacionados con la desviación típica y el NDVI y verdor.

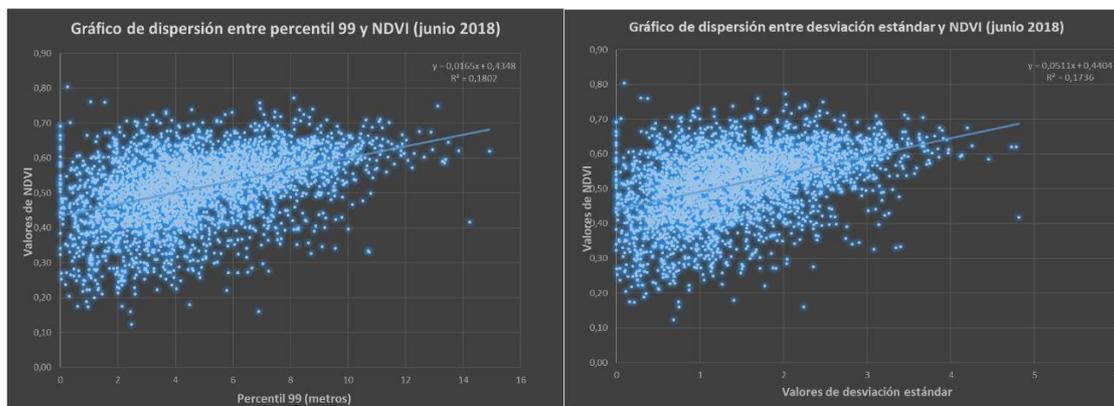


Figura 35: Gráficos de dispersión entre el percentil 99 (izda) y la desviación estándar (dcha) con el NDVI (junio 2018). Fuente: Realización propia.

Los resultados muestran como la información óptica y las métricas derivadas del tratamiento de datos LiDAR no muestran una correlación, es decir, un valor elevado de percentil 99 o de variación vertical del dosel vegetal (desviación estándar) no se traduce necesariamente en valores elevados de NDVI y viceversa, ocurriendo lo mismo con el verdor. Esto se puede comprobar también con los valores de R2 que son bajos ya que los valores del NDVI solo explican un 20% aproximadamente de las variaciones del percentil 99 o de la desviación estándar. Pero, pese a no existir una relación directa, se puede observar que en líneas generales los valores de percentil 99 o de desviación estándar se

sitúan en torno a valores de NDVI que van desde 0,2 (vegetación parcial junto a suelo desnudo) a 0,7 (cubierta vegetal densa) aproximadamente. Por esta razón, se ha optado por ver donde se sitúan, dentro de la “no relación”, los valores de percentil 99 y desviación estándar respecto al NDVI por dominios de paisaje. Para lograr este objetivo se han analizado los dominios de paisaje en función de la cantidad de parcelas existente para cada dominio poniendo los dominios en orden decreciente en cuanto al número de parcelas para que la superposición facilite la lectura del gráfico generado (**figura 36**).

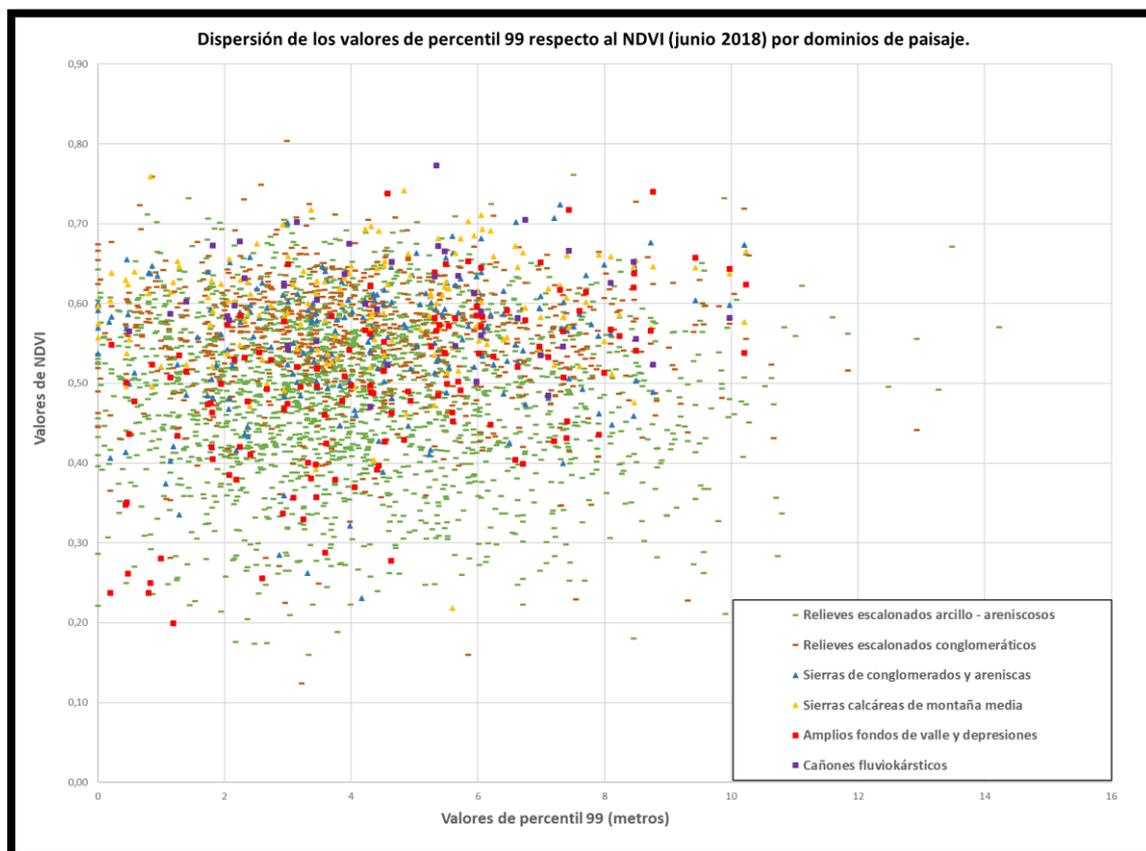


Figura 36: *Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.*

En el gráfico se puede comprobar como independientemente del dominio de paisaje los datos del percentil 99 se agrupan en torno a valores de NDVI elevados ya que, en 2018, el valor de referencia tomado, el NDVI en el conjunto de la comarca ya presentaba que ponían de manifiesto el proceso de revegetación que se había dado con el paso de los años en la comarca. Para ver cómo han variado estos datos de una manera más simplificada y como complemento a este gráfico, se ha realizado un cálculo de la media y la desviación típica del conjunto de parcelas de cada uno de los dominios de paisaje y mediante la **figura 37** se muestra como es el comportamiento de estos valores de percentil 99.

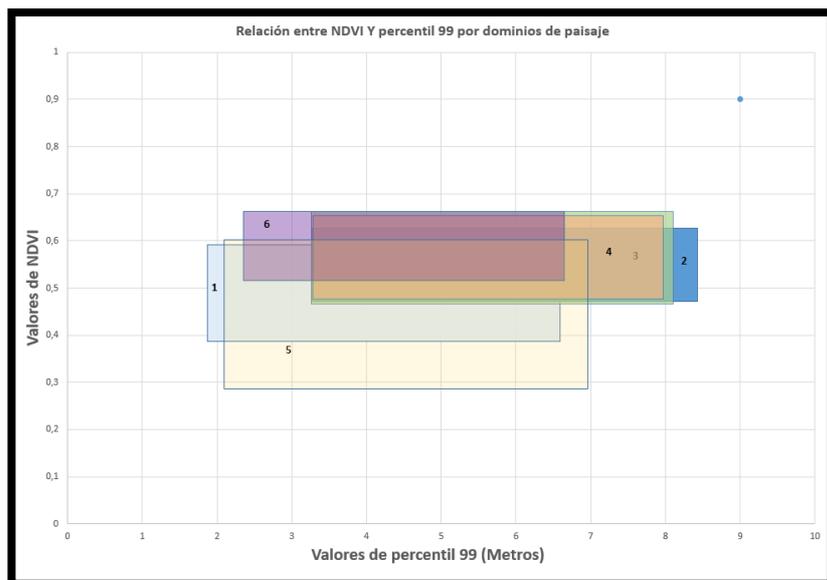
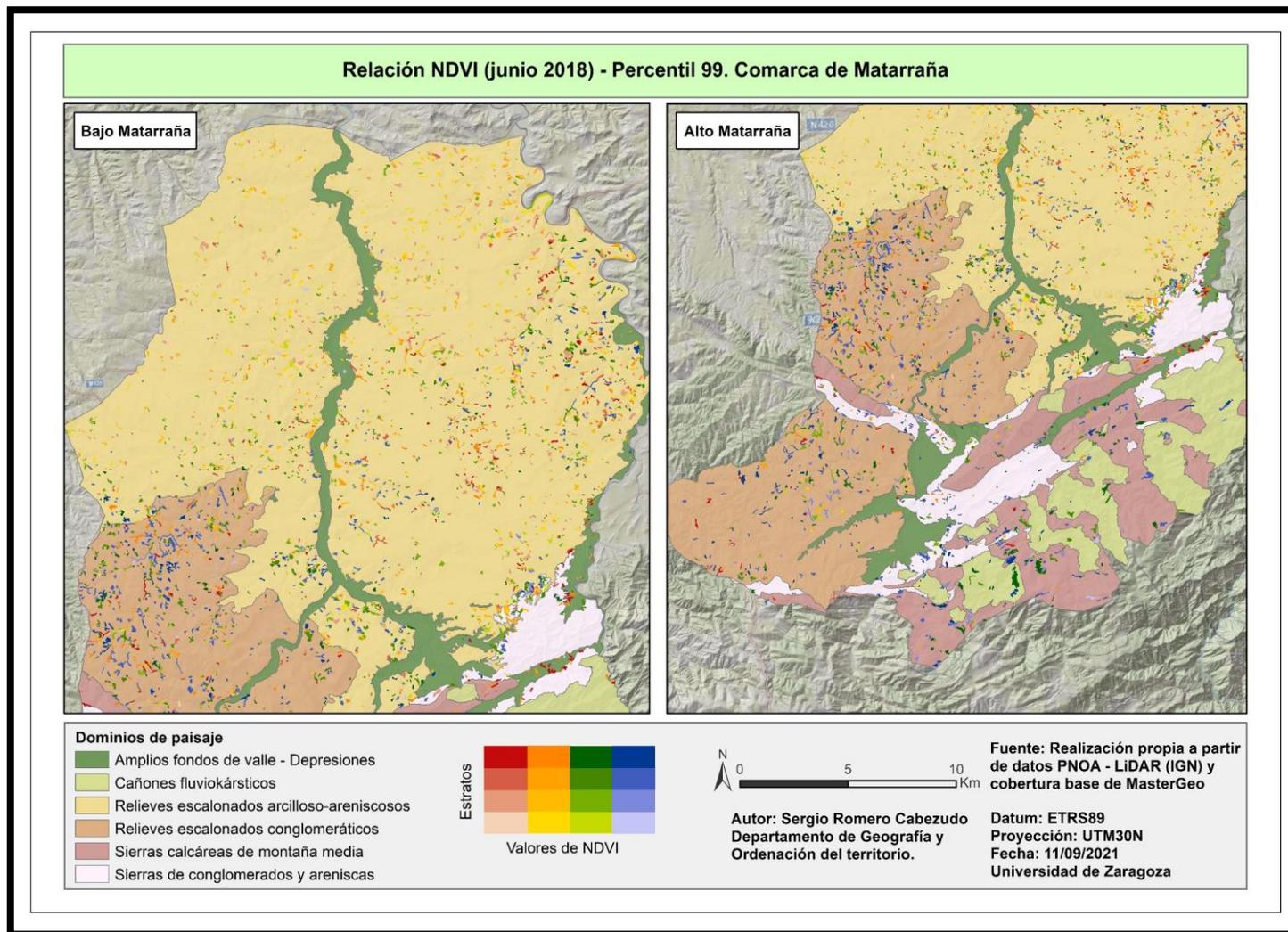


Figura 37: Posición de los valores de percentil 99 respecto al NDVI por dominios de paisaje.
Fuente: Realización propia.

En dicha figura como la categoría 1 referida al dominio de relieves escalonados arcillo – areniscosos, que es la que mayor superficie ocupa en el conjunto de la comarca, tiene unos valores de percentil 99 que varían entre 2 y 7 metros de altura y que sitúan sus valores de NDVI entre 0.4 y 0.6. Estos valores son coherentes pues los más bajos se corresponden con la zona norte del área de estudio, el bajo Matarraña donde se comprobaba en las cartografías que había valores bajos de percentil 99 y de variabilidad vertical de la cubierta vegetal. Los valores de 0.6 de NDVI para este dominio se encuentran en las zonas de pinar analizadas con anterioridad donde la variabilidad vertical de la cubierta vegetal y los valores de percentil 99 eran elevados debido al relieve en plataformas la accesibilidad a las parcelas moderadas y la presencia de vegetación que favorecía el crecimiento de la vegetación en las parcelas.

La categoría 2 que hace referencia a los relieves escalonados conglomeráticos es otra de las analizadas estadísticamente y en la que se apreciaban valores de percentil 99 elevados junto con altos valores de variabilidad vertical del dosel vegetal. Nuevamente los resultados son coherentes con valores de NDVI que se reparten en torno 0.5 – 0.6 mostrando vegetación con un vigor vegetal relevante e influida por nuevamente un relieve con plataformas, vales de fondo plano e influida por las propias comunidades vegetales de pinares mediterráneos y submediterráneos. El resto de categorías pertenecientes a las sierras de conglomerados y areniscas, sierras calcáreas y cañones fluviokársticos ofrecen también valores de percentil 99 elevados con los mayores valores de NDVI registrados en la comarca. Esto obedece a razones lógicas ya que estas parcelas se encuentran en zonas más accidentadas en cuanto al relieve, fueron las primeras en abandonarse y las que más tiempo han tenido para desarrollarse, obteniendo así valores de NDVI en torno a 0.7 e incluso 0.8 en algunos casos.

Para comprobar esto de una manera visual se ha realizado una cartografía con una leyenda de doble entrada en la que se relaciona el NDVI con los valores de percentil 99.



Cartografía 10: *Relación NDVI (Junio 2018) - Percentil 99. Comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.*

En cuanto a la **cartografía 10**, esta permite espacializar las figuras anteriores, para ello se han categorizado los valores de estratos (percentil 99) y de NDVI de la siguiente manera:

Percentil 99:

- Estratos herbáceos, subarbusivo y arbustivo (alturas 0 a 3 metros): Categoría 1.
- Estrato arborescente (altura 3 – 5 metros): Categoría 2.
- Estrato arbóreo 1 (alturas 5 a 7.5 metros): Categoría 3.
- Estrato arbóreo 2 (alturas 7.5 en adelante): Categoría 4.

NDVI:

- Valores de NDVI de 0 a 0.4: Categoría 1.
- Valores de NDVI de 0.4 a 0.5: Categoría 2.
- Valores de NDVI de 0.5 a 0.6: Categoría 3.
- Valores de NDVI de 0.6 en adelante: Categoría 4.

De esta manera se aprecia como en la zona del bajo Matarraña se encuentran valores de NDVI bajos con estratos arbóreos que tienen bajos valores de percentil 99, a excepción del dominio de relieves escalonados conglomeráticos y de la zona de pinar existente en los relieves escalonados arcillo areniscosos que fueron analizadas estadísticamente y que presentan ciertas particularidades. Se observa también, como conforme se avanza de norte a sur estos comienzan a crecer de manera progresiva obteniéndose los mayores valores de NDVI y percentil 99 en las zonas del alto Matarraña donde los procesos de revegetación han sido más constantes en el tiempo.

En conclusión, los valores de las métricas LiDAR de percentil 99 y variación vertical del dosel vegetal (desviación estándar) se relacionan de una manera lógica con la información del óptico obtenida en el estudio de 2019. De esta manera el alto Matarraña cuenta con un vigor vegetal máximo que se traduce en valores de percentil 99 elevados y desviaciones típicas moderadas que muestran la existencia de comunidades vegetales homogéneas en cuanto a los estratos ya que han tenido tiempo de desarrollarse sin la influencia de otros factores antrópicos y favorecidas por la existencia de comunidades vegetales de porte arbóreo existentes en las zonas de elevada altitud.

Por el contrario, la zona del bajo Matarraña ofrece valores destacados de NDVI, pero de un orden menor a los citados en el párrafo anterior lo que se traduce en valores de percentil 99 algo menos destacados y parcelas cuya variabilidad vertical del dosel vegetal varía enormemente en función de si hay zonas de cultivo próximas o de si existen áreas arbóreas o de mosaico agroforestal alrededor. Es en los dominios del bajo Matarraña (relieves escalonados arcillo – areniscosos y relieves escalonados conglomeráticos) donde se ha puesto el foco de análisis en varios focos pues estas zonas presentan valores muy elevados respecto al resto del bajo Matarraña, y como se comprobó en el apartado estadístico, las plataformas, los vales de fondo plano y la vegetación de pinar juegan un papel relevante en la ruptura de la monotonía de los valores de las diferentes métricas,

tanto LiDAR como de NDVI y TTC. Por esta razón estas áreas pueden requerir de actuaciones encaminadas a la recuperación de estas parcelas tan peculiares, pues situándose en zonas llanas, y obteniendo una revegetación tan destacada en términos de vigor vegetal, de altura, y de variabilidad de su dosel, pueden ser nocivas. Las razones de que puedan resultar nocivas residen en que en el caso de que se produjese un incendio destacado en el área, estas parcelas no actuarían como cortafuegos, sino que conectarían directamente con masas arbóreas próximas, y, además, al contar con una variabilidad de su dosel vertical elevada el fuego podría propagarse de una manera mucho más precipitada.

7. Discusión

En cuanto al tratamiento de los datos LiDAR, este ha sido especialmente demandante ya que el número de ficheros empleado para cada uno de los años estudiados es realmente elevado. Pese a ello el resultado ha sido óptimo y se ha conseguido generar para cada uno de los vuelos PNOA – LiDAR una superficie ráster de las métricas derivadas que tiene resultados lógicos, coherentes y libres de error. Los motivos por los que se optó por trabajar en “*Grid*” fueron por la propia naturaleza del estudio ya que realizar la obtención de métricas para cada una de las parcelas resultaba totalmente inoperativo, en este sentido algunos de los autores consultados en las primeras fases del desarrollo del proyecto trataron temas relacionados con la generación de archivos DTM, necesarios para el filtrado de los datos LiDAR y la obtención de métricas y como mediante diferentes filtros obtenían resultados de mayor o menor precisión (Mongus y Zalik, 2012, Sithole y Vosselman). Si bien el Trabajo Fin de Máster no va encaminado a la generación de modelos digitales del terreno, las consideraciones planteadas por estos autores en cuanto a cómo operar con los datos LiDAR fueron de vital importancia en la toma de decisión de trabajar con superficies continuas, y esto se ha materializado en las superficies ráster generadas sin las que no se podría haber realizado ninguno de los análisis citados en el Trabajo Fin de Grado.

En cuanto a las métricas LiDAR, estas no han sido muy numerosas, pero sí que se ha puesto especial cuidado en seleccionar las que fuesen útiles de cara a una representación a escala comarcal de la estructura de la cobertura vegetal. En este sentido los resultados son óptimos, llegando incluso a no utilizar exhaustivamente algunos de los estadísticos generados. Las razones de la selección de estas pocas métricas es que el estudio pretende mostrar de una manera generalizada la estructura y su distribución y esta puede ser perfectamente entendida si se hace un uso correcto combinado con otras variables explicativas o como se ha podido comprobar, con información espectral. Si el estudio se hubiese centrado en un lugar más reducido, o no se tuviera información espectral previa, otro enfoque podría haber sido trabajar a escala de detalle, realizando estudios a escala de árbol y obteniendo más métricas que permitiesen caracterizar al detalle la estructura vegetal a nivel de árbol o realizar otro tipo de estudios. En este sentido se han consultado autores que caracterizan las masas forestales cuyas métricas han sido útiles para la realización del proyecto y que han tenido éxito en áreas concretas de centro Europa donde se han realizado estudios a escala de árbol (Shi et al., 2018).

De esta manera, con unas métricas sencillas se ha podido generar una visión general de la comarca, áreas circunscritas a dominios de paisaje que presentaban particularidades y analizarlas estadísticamente en base a unas variables explicativas para finalmente obtener una visión integrada con los valores de los índices derivados del tratamiento de imágenes ópticas. En definitiva, se ha buscado realizar un análisis de la estructura vegetal sin perder el enfoque territorial y espacial.

Finalmente, uno de los principales objetivos del proyecto ha consistido en la combinación de la información LiDAR con la información derivada de las imágenes ópticas. En cuanto a los resultados, estos son coherentes si se representan mediante los gráficos realizados o mediante la cartografía de doble entrada empleada, pero pese a ello no se han encontrado relaciones estadísticas significativas. Esto, por un lado, puede considerarse positivo, pues si se hubiera realizado únicamente en el estudio de la evolución de la cobertura vegetal presentado en el Trabajo Fin de Grado, se hubiese llegado a la conclusión de que la cobertura vegetal ha crecido con el paso de los años de una manera generalizada y sin ninguna razón aparente. Sin embargo, la realización de este estudio demuestra como en un crecimiento continuo y paulatino existen contrastes en áreas que en apariencia podrían presentar valores de NDVI similares y cuya altitud y variación del dosel vegetal pueden jugar papeles relevantes en caso de que se produzcan incendios o en términos de calidad de paisajística.

Pero, por otro lado, sí que existen autores que han conseguido realizar estudios concluyentes estadísticamente al combinar los dos tipos de información. Los artículos consultados ponen de manifiesto la utilidad de la combinación de estas técnicas, aunque muchos de ellos utilizan imágenes ópticas de Landsat o Sentinel en áreas mucho más extensas que la presentada en este proyecto y con LiDAR satelital (Xiaoxiao Zhu et al., 2020). Otros autores que también han tenido éxito lo realizan a escala de detalle afirmando que existen correlaciones entre los diferentes tipos de datos (LaRue, EA et al., 2018). Algunos de estos artículos que han tenido éxito en sus planteamientos son los que han motivado la combinación de ambas informaciones en este proyecto pues en un inicio simplemente se quería caracterizar la estructura mediante datos LiDAR y pese a que no existan relaciones directas como en estos artículos citados, el resultado presenta una coherencia especial relevante para la ordenación territorial.

8. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Máster se ha conseguido aplicar con éxito una metodología de tratamiento de los datos LiDAR que ha posibilitado la obtención de métricas precisas de pequeñas parcelas a escala comarcal. De esta manera esta información se ha podido cartografiar mediante un entorno SIG y relacionar con otras variables. Por lo tanto, se ha conseguido cumplir uno de los objetivos del proyecto ya que gracias al trabajo en formato “*grid*” se ha conseguido llevar la información LiDAR de dos vuelos distintos a todas y cada una de las parcelas del área de estudio, y ya no solo eso, sino que al haber obtenido la superficie entera de la comarca esta información se podría utilizar para cualquier otro tipo de estudio.

En referencia a las métricas obtenidas mediante el tratamiento, se ha comprobado como con la obtención de un número no muy elevado de métricas LiDAR (tres en este caso) se puede hacer un análisis general de la estructura de la cubierta vegetal a nivel de comarca. Se cumple por lo tanto otro de los objetivos del proyecto, ya que solo con tres métricas bien planteadas para posteriormente, realizar una clasificación por estratos como la propuesta por Braun – Blanquet, J. (1979) se puede obtener una cantidad ingente de información totalmente válida para este tipo de análisis de carácter espacial y algo más general.

En relación a la representación cartográfica, se aprecia como en la comarca existe un gradiente norte – sur encontrándose las parcelas de menor altura y variabilidad del dosel vegetal en la zona del bajo Matarraña y ocurriendo lo contrario en las zonas del alto Matarraña. La combinación de estos datos con las variables explicativas ha posibilitado la identificación de dos lugares en el conjunto de la comarca en los estadísticos muestran valores fuera de lo común si se atiende al conjunto comarcal y en los que los cambios entre los diferentes vuelos PNOA para cada métrica LiDAR son excesivos por lo que realizando una combinación de esta información con otras variables explicativas ha posibilitado la comprensión de que factores territoriales juegan un papel determinante en el desarrollo de la vegetación en la comarca.

No obstante, tal y como se indica en la discusión, sería conveniente realizar investigaciones más precisas con datos LiDAR en parcelas seleccionadas a partir de los resultados estadísticos obtenidos en este trabajo y trabajar en ciertos dominios de paisaje en los que la vegetación, la distancia a las carreteras o el tipo de relieve juegan un papel determinante en la estructura. De esta manera, si en este proyecto se ha trabajado a escala de parcela o área, se podría optar en estos nuevos estudios por el trabajo a escala de árbol para la obtención de otros estadísticos como la altura máxima del árbol, el área de la copa o el área basal entre otros muchos.

En cuanto a la combinación de la información LiDAR y la derivada de las imágenes ópticas (Landsat) hay que destacar que no se han obtenido relaciones estadísticas precisas, pero la versatilidad de los SIG junto con un manejo de datos adecuado permite buscar relaciones entre ambos tipos de información. De esta manera, todo el análisis de la estructura que se ha realizado en el Trabajo Fin de Máster se mueve en torno a unos rangos de NDVI muy bien definidos, salvo ciertas excepciones. Estos resultados son plenamente coherentes, pues como se pudo comprobar en el trabajo Fin de Grado, la comarca de Matarraña ha tenido un proceso de revegetación muy destacado y por ello en la actualidad, mediante vuelos LiDAR – PNOA se observan alturas elevadas en parcelas abandonadas que en inicio se podría pensar que deberían tener portes más bajos y valores de NDVI menos destacados. Por lo tanto, si bien los dos tipos de información no muestran ningún tipo de correlación, su puesta en común y análisis es indispensable para obtener una información completa e integrada de la vegetación de la comarca.

Continuando con esta última idea, es necesario realizar dos consideraciones. Por un lado, los valores de NDVI, verdor o humedad han mostrado un proceso de

revegetación marcado y paulatino en el tiempo. Por otro lado, los datos LiDAR permiten atisbar cual es la realidad actual y palpable de esa dinámica temporal observada llegando a la conclusión de que las parcelas abandonadas, ahora tienen portes de vegetación considerables y que, en relación con las variables explicativas, estas se concentran en zonas de vales o plataformas, cerca de masas forestales como las de pinar mediterráneo y con poca accesibilidad respecto a núcleos de información o infraestructuras tal y como se ha ido comprobando a lo largo de la exposición de los resultados.

Esto pone en peligro el patrimonio paisajístico de la comarca, pues estas parcelas podrían actuar como cortafuegos y actualmente no lo son, y no solo eso, sino que tienen portes elevados, una cantidad de estratos en su interior destacable y se sitúan en zonas poco accesibles y cerca de masas de vegetación destacadas lo que haría que, en caso de un incendio de magnitudes destacables, la comarca sufriese en una severidad desmedida. En este sentido, el análisis de los resultados muestra dos grandes focos de actuación en las masas de pinar de los relieves escalonados arcillo – areniscosos y de los relieves escalonados conglomeráticos donde las parcelas abandonadas deberían ser puestas en uso y monitorizadas para evitar problemas mayores.

Finalmente, la realización de este estudio en otras comarcas del territorio aragonés, junto con la realización de inventarios florísticos, podría ser una interesante vía de actuación para ver si el proceso de revegetación observado es tan marcado como en la comarca de Matarraña y si la estructura de la cobertura vegetal obedece a los mismos patrones observados en el presente proyecto identificando así zonas prioritarias en el territorio aragonés sobre las que poner el foco de atención en materia de ordenación territorial.

9. Bibliografía

- A Huete, K Didan, T Miura, E.P Rodriguez, X Gao, L.G Ferreira, (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, Volume 83, Issues 1–2, Pages 195-213, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- B. Stark T, Zhao Y, ChenAn, (2016). Analysis of the effect of the bidirectional reflectance distribution function on remote sensing imagery accuracy from small unmanned aircraft systems. 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Arlington, VA USA (2016), pp. 1342-1350. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7502566>
- Benavente Serrano, J., Thomson Llisterri, T. (2003). Comarca del Matarraña.
- Braun – Blanquet, Josías (1964). Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. http://www.floramontiberica.org/entrada_Braun-Blanquet.htm
- Carroll, G.C. (1980). Forest canopies: Complex and independent subsystems. <https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub1710.pdf>
- Chandan Mostafiz, Ni-Bin Chang, (2018). Tasseled cap transformation for assessing hurricane landfall impact on a coastal watershed, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 73, Pages 736-745, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.015>.

- Chao Chen, Juan Bu, Yuhuan Zhang, Yue Zhuang, Yanli Chu, Jiachen Hu, Biyun Guo, (2019). The application of the tasseled cap transformation and feature knowledge for the extraction of coastline information from remote sensing images, *Advances in Space Research*, Volume 64, Issue 9, 2019, Pages 1780-1791, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.032>.
- Chuvienco Salinero, E. (1996). Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: Análisis cuantitativo y representación cartográfica. *Serie geográfica* 1996, vol 6, pp. 131 – 147.
- Chuvienco Salinero, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- Chuvienco Salinero, E. (2010). *Teledetección ambiental*. Madrid: Ariel.
- Domen Mongus, Borut Žalik, (2012). Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 67, Pages 1-12, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.10.002>.
- Edward P. Glenn, Alfredo R. Huete, Pamela L. Nagler, Stephen G. Nelson, (2008). Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. <https://doi.org/10.3390/s8042136>.
- Elizabeth A. LaRue, Jeff W. Atkins, Kyla Dahlin, Robert Fahey, Songlin Fei, Chris Gough, Brady S. Hardiman, (2018). Linking Landsat to terrestrial LiDAR: Vegetation metrics of forest greenness are correlated with canopy structural complexity, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 73, Pages 420-427, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.001>.
- Eric P Crist (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data, *Remote Sensing of Environment*, Volume 17, Issue 3, 1985, Pages 301-306, ISSN 0034-4257. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6).
- Eric P. Crist, Richard C. Cicone, (1984). A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data-The TM Tasseled Cap. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4157507>
- F. Baret, G. Guyot. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, Volume 35, Issues 2–3, 1991, Pages 161-173, ISSN 0034-4257. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U).
- George Sithole, George Vosselman, Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 59, Issues 1–2, 2004, Pages 85-101, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>.
- Guang Zheng, L. Monika Moskal, (2019). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Remote Sensing and Geospatial Analysis*. Laboratory and Precision Forestry Cooperative, College of Forest Resources, University of Washington, Box 352100, Seattle, Washington, 98195-2100, USA. <https://doi.org/10.3390/s90402719>.
- Hao Tang, Xiao-Peng Song, Feng A. Zhao, Alan H. Strahler, Crystal L. Schaaf, Scott Goetz, Chengquan Huang, Matthew C. Hansen, Ralph Dubayah, (2019). Definition and measurement of tree cover: A comparative analysis of field-, lidar- and landsat-based tree cover estimations in the Sierra national forests, USA, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 268, Pages 258-268, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.024>.
- Inian Moorthy, John R. Miller, Jose Antonio Jimenez Berni, Pablo Zarco-Tejada, Baoxin Hu, Jing Chen, (2011). Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree

- crown architecture using terrestrial laser scanning data, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 151, Issue 2, Pages 204-214, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.005>.
- J. Estornell, E. Hadas, J. Martí, I. López-Cortés. (2021). Tree extraction and estimation of walnut structure parameters using airborne LiDAR data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 96, 2021, 102273, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102273>
- James R. Irons, John L. Dwyer, Julia A. Barsi, (2012) The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission, *Remote Sensing of Environment*, Volume 122, Pages 11-21, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>.
- lidar (light detection and ranging) e imágenes de satélite
- M.D. Lowman, H.B. Rinker. (2004). *Forest canopies*. Elsevier Academic Press, California, USA. <https://www.sciencedirect.com/book/9780124575530/forest-canopies>
- M.S. Hoe, C.J. Dunn, H. (2018). Temesgen Multitemporal LiDAR improves estimates of fire severity in forested landscapes. *Int. J. Wildland Fire*, 27. https://www.researchgate.net/publication/327180392_Multitemporal_LiDAR_improves_estimates_of_fire_severity_in_forested_landscapes
- Matthew C. Hansen, Thomas R. Loveland, A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, (2012). Volume 122, Pages 66-74, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>.
- Montealegre Gracia, AL. (2017). *Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo*, Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/61353/files/TESIS-2017-037.pdf>
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T. Tanase, M., de la Riva, J. (2014). Forest fire severity assessment using ALS data in a Mediterranean environment. *Remote Sensing*, 6: 4240-4265. doi:10.3390/rs6054240.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. 2016. Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest. *Forestry*, 89 (4): 373-382. doi:10.1093/forestry/cpw008
- P.J. Zarco-Tejada, R. Diaz-Varela, V. Angileri, P. Loudjani, (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods, *European Journal of Agronomy*, Volume 55, Pages 89-99, ISSN 1161-0301, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>.
- Pascual Castaño, C. (2006). *Análisis de la estructura forestal mediante teledetección*
- Ric Sorinas, O, Ibarra Benlloch, P. (2015). La cartografía de cultivos abandonados y de selección de áreas prioritarias de recuperación como instrumento eficaz del proyecto Banco de tierras de la Comarca del Matarraña. En de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación: 1193-1201*, Universidad de Zaragoza-AGE.
- Robert J. McGaughey, (2008) FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. https://w3.ual.es/GruposInv/ProyectoCostas/FUSION_manual.pdf
- Romero Cabezudo, Sergio. (2019). *Análisis ambiental y detección de cambios en el recubrimiento vegetal de la comarca del Matarraña mediante teledetección y SIG: Dinámica multitemporal en los campos abandonados (1986/2018)*, Universidad

- de Zaragoza. <https://zagan.unizar.es/record/87969/files/TAZ-TFG-2019-4355.pdf>
- Royé, D., & Serrano Notivoli, R. (2019). *Introducción a los SIG con R* (1a. ed.).
- Shi Pu, Martin Rutzinger, George Vosselman, Sander Oude Elberink, Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies, (2011) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 66, Issue 6, Supplement, Pages S28-S39, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.08.006>.
- Shouyang Liu, Fred Baret, Mariem Abichou, Fred Boudon, Samuel Thomas, Kaiguang Zhao, Christian Fournier, Bruno Andrieu, Kamran Irfan, Matthieu Hemmerlé, Benoit de Solan, (2017). Estimating wheat green area index from ground-based LiDAR measurement using a 3D canopy structure model, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 247, 2017, Pages 12-20, ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.007>.
- Thoreau Rory Tooke, Nicholas C. Coops, Jessica Webster, Predicting building ages from LiDAR data with random forests for building energy modeling, *Energy and Buildings*, Volume 68, Part A, 2014, Pages 603-610, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.004>.
- X.P. Song, M.C. Hansen, S.V. Stehman, P.V. Potapov, A. Tyukavina, E.F. Vermote, J.R. Townshend, (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560 (2018), pp. 639-643. <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0411-9>
- Xiaoxiao Zhu, Cheng Wang, Sheng Nie, Feifei Pan, Xiaohuan Xi, Zhenyue Hu, (2020). Mapping forest height using photon-counting LiDAR data and Landsat 8 OLI data: A case study in Virginia and North Carolina, USA, *Ecological Indicators*, Volume 114, 06287, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106287>
- Xinlian Liang, Ville Kankare, Juha Hyypä, Yunsheng Wang, Antero Kukko, Henrik Haggrén, Xiaowei Yu, Harri Kaartinen, Anttoni Jaakkola, Fengying Guan, Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, Pages 63-77, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>.
- Yifang Shi, Tiejun Wang, Andrew K. Skidmore, Marco Heurich, (2018). Important LiDAR metrics for discriminating forest tree species in Central Europe, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 137, Pages 163-174, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.002>.

10. Anexo

valores-p:						
	1	2	3	4	5	6
1	1	0,944	0,972	0,892	0,903	0,882
2	0,944	1	0,530	0,172	0,822	0,632
3	0,972	0,530	1	0,387	0,471	0,172
4	0,892	0,172	0,387	1	0,212	0,013
5	0,903	0,822	0,471	0,212	1	0,909
6	0,882	0,632	0,172	0,013	0,909	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 38: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica), Unidades fisio – geomorfológicas. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

valores-p:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0,592	0,157	0,273	0,411	0,145	0,047	0,094	0,247
2	0,592	1	0,960	0,894	0,315	0,960	0,818	0,522	0,425
3	0,157	0,960	1	0,364	0,053	0,998	0,385	0,318	0,389
4	0,273	0,894	0,364	1	0,087	0,286	0,000	0,197	0,338
5	0,411	0,315	0,053	0,087	1	0,050	0,021	0,035	0,157
6	0,145	0,960	0,998	0,286	0,050	1	0,306	0,312	0,388
7	0,047	0,818	0,385	0,000	0,021	0,306	1	0,436	0,438
8	0,094	0,522	0,318	0,197	0,035	0,312	0,436	1	0,637
9	0,247	0,425	0,389	0,338	0,157	0,388	0,438	0,637	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0014

Figura 39: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica), Vegetación y usos de suelo. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

valores-p:						
	0	1	2	3	4	5
0	1	0,425	0,163	0,215	0,505	0,004
1	0,425	1	0,419	0,696	0,945	0,008
2	0,163	0,419	1	0,522	0,569	0,022
3	0,215	0,696	0,522	1	0,869	0,009
4	0,505	0,945	0,569	0,869	1	0,012
5	0,004	0,008	0,022	0,009	0,012	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 40: Corrección de bonferroni para relieves escalonados arcillo – areniscosos (desviación típica) - Accesibilidad. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

valores-p:								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	<0,0001	<0,0001	0,584	0,000	<0,0001	0,171	<0,0001
2	<0,0001	1	0,037	0,173	0,235	0,057	<0,0001	0,332
3	<0,0001	0,037	1	0,362	0,896	0,937	<0,0001	0,015
4	0,584	0,173	0,362	1	0,359	0,373	0,871	0,094
5	0,000	0,235	0,896	0,359	1	0,868	0,000	0,073
6	<0,0001	0,057	0,937	0,373	0,868	1	<0,0001	0,019
7	0,171	<0,0001	<0,0001	0,871	0,000	<0,0001	1	<0,0001
8	<0,0001	0,332	0,015	0,094	0,073	0,019	<0,0001	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0018

Figura 41: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - vegetación. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

valores-p:						
	1	2	3	4	5	6
1	1	0,264	0,117	0,190	0,458	0,255
2	0,264	1	0,001	0,510	0,406	0,910
3	0,117	0,001	1	0,838	0,042	<0,0001
4	0,190	0,510	0,838	1	0,283	0,522
5	0,458	0,406	0,042	0,283	1	0,365
6	0,255	0,910	<0,0001	0,522	0,365	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 42: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

valores-p:						
	0	1	2	3	4	5
0	1	0,005	0,000	<0,0001	0,438	0,002
1	0,005	1	0,597	0,774	0,148	0,025
2	0,000	0,597	1	0,662	0,043	0,036
3	<0,0001	0,774	0,662	1	0,036	0,025
4	0,438	0,148	0,043	0,036	1	0,006
5	0,002	0,025	0,036	0,025	0,006	1

Nivel de significación corregido de Bonferroni: 0,0033

Figura 43: Corrección de bonferroni para relieves conglomeráticos (desviación típica) - Accesibilidad. Fuente: Realización propia mediante XLSTAT.

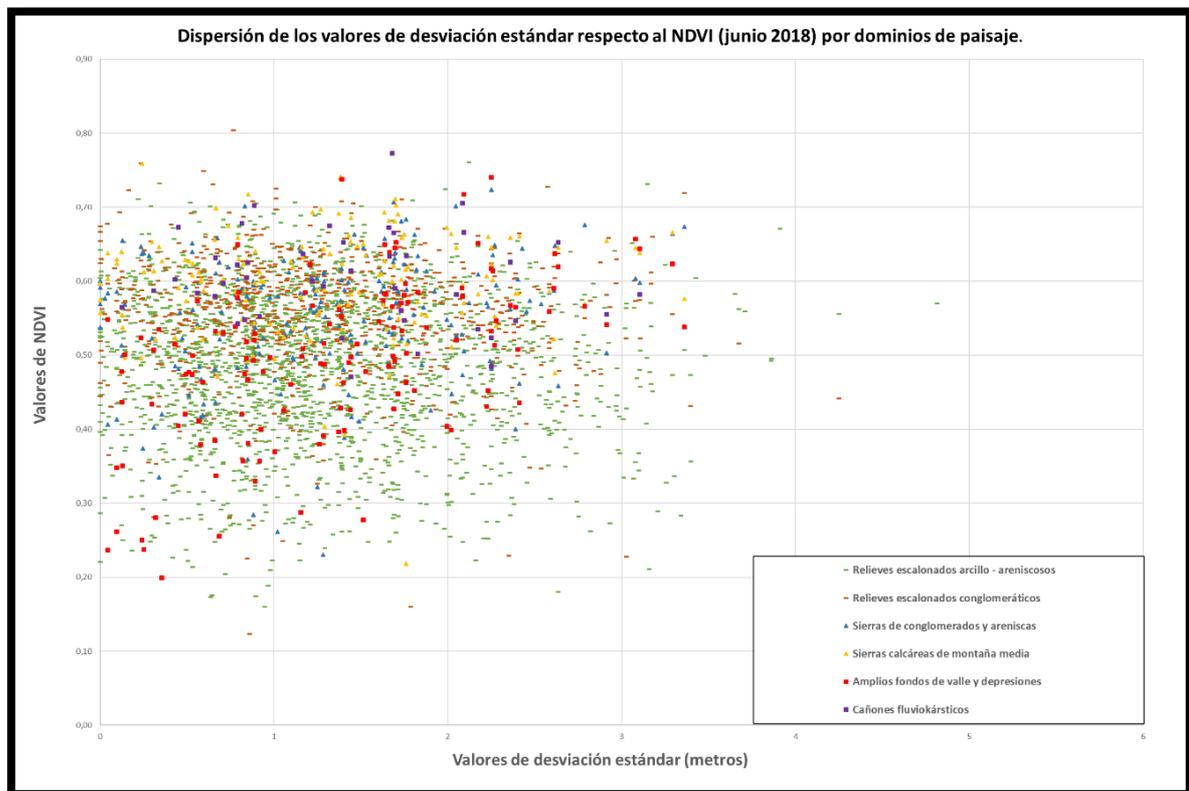


Figura 44: Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.

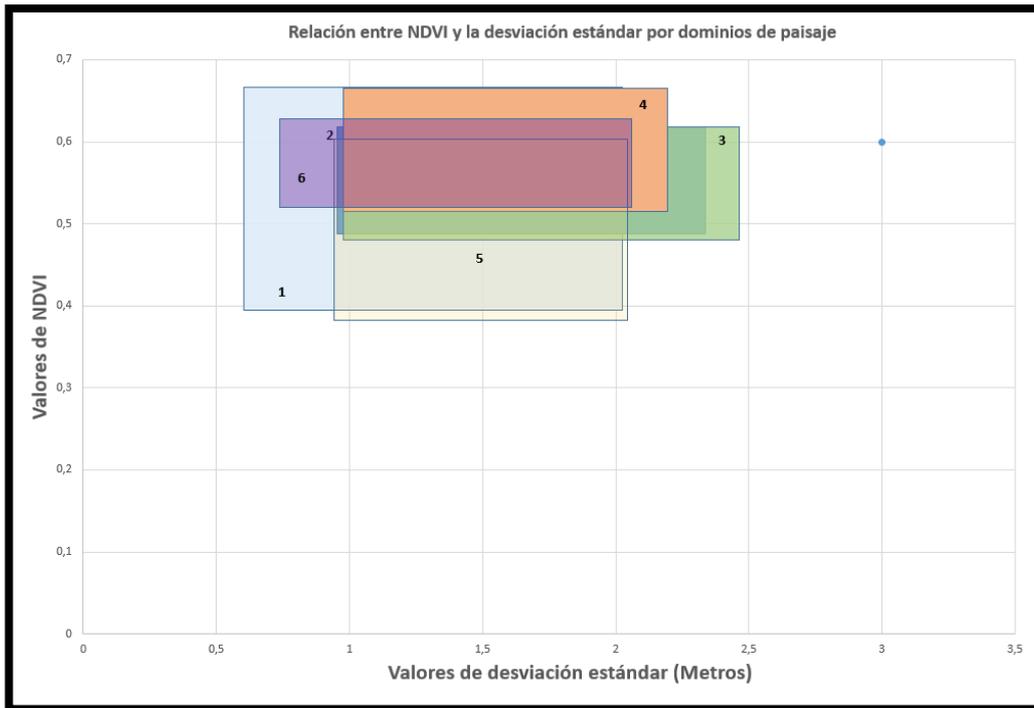


Figura 45: Posición de los valores de desviación estándar respecto al NDVI por dominios de paisaje. Fuente: Realización propia.

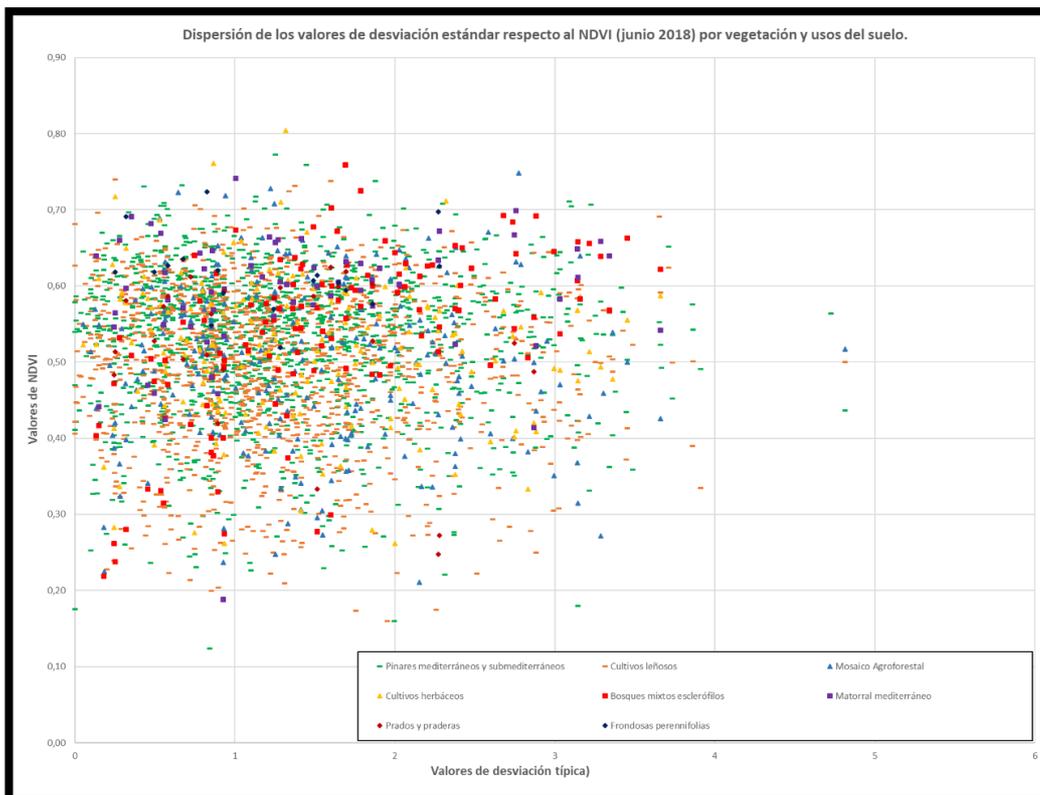


Figura 46: Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) - vegetación y usos del suelo. Fuente: Realización propia.

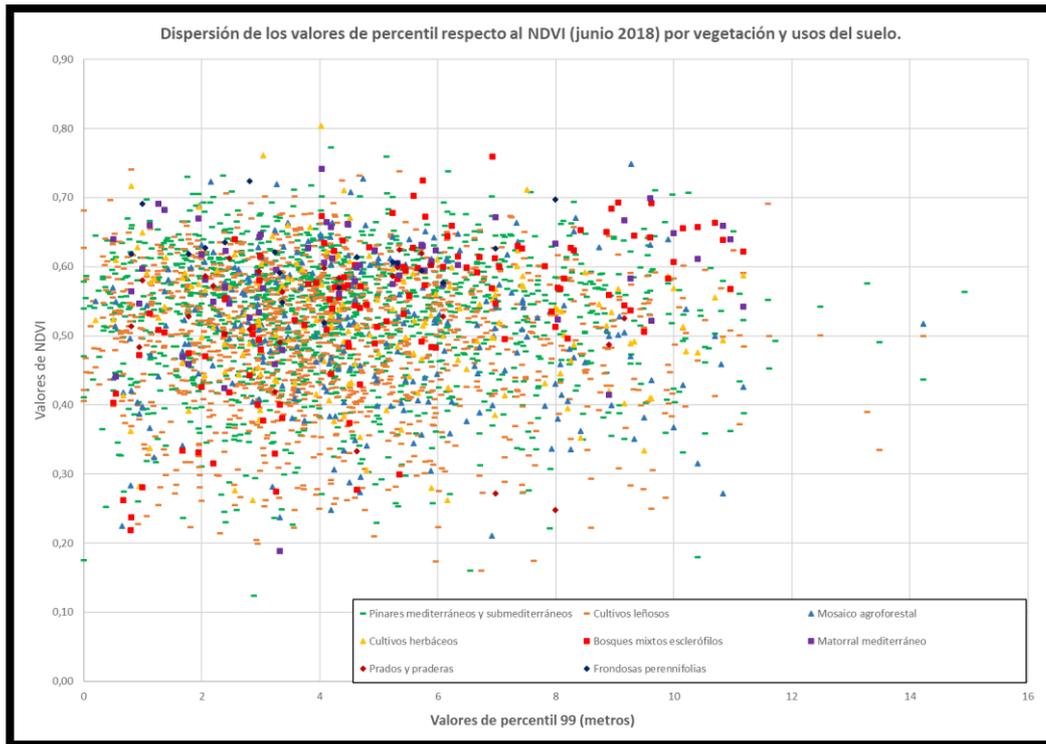


Figura 47: *Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) - vegetación y usos del suelo. Fuente: Realización propia.*

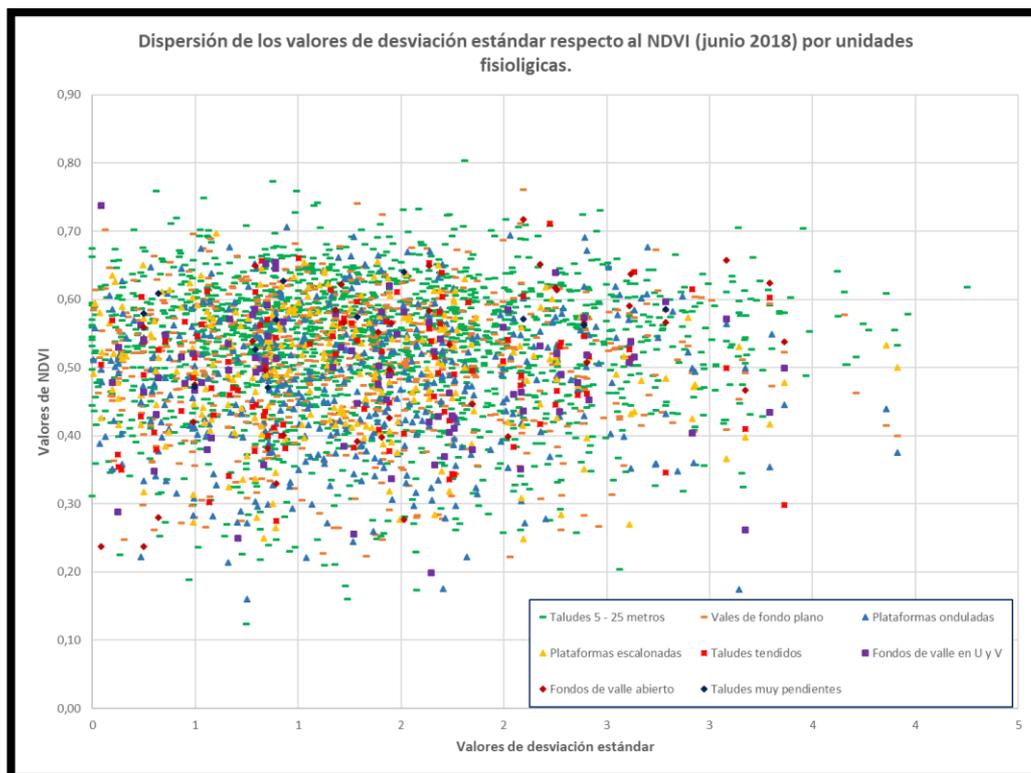


Figura 48: *Dispersión de los valores de desviación estándar respecto al NDVI (junio 2018) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia.*

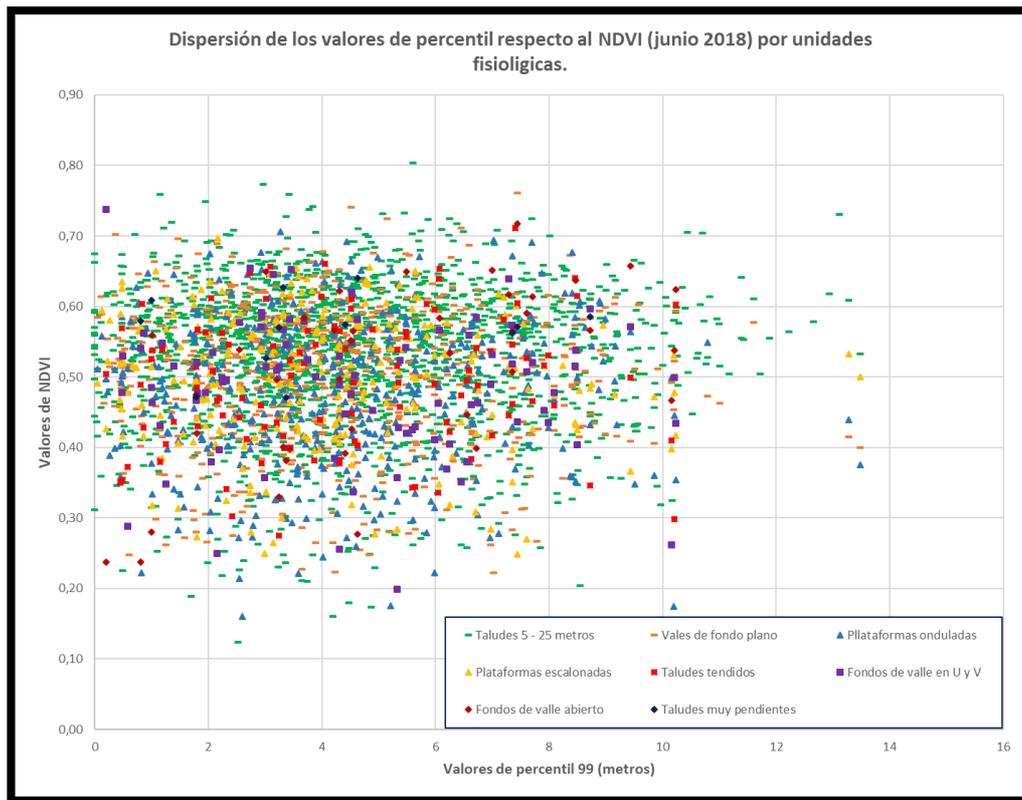
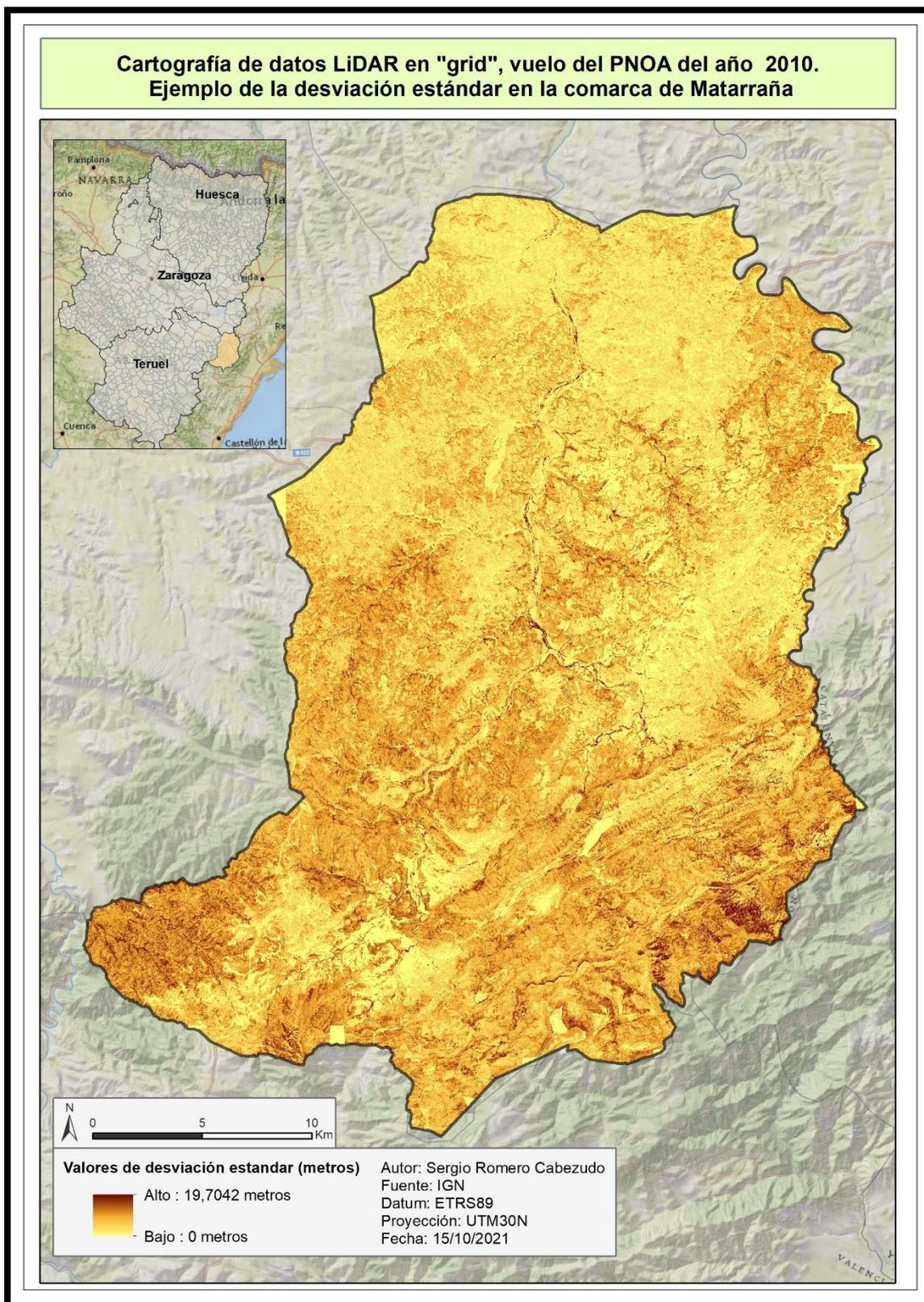
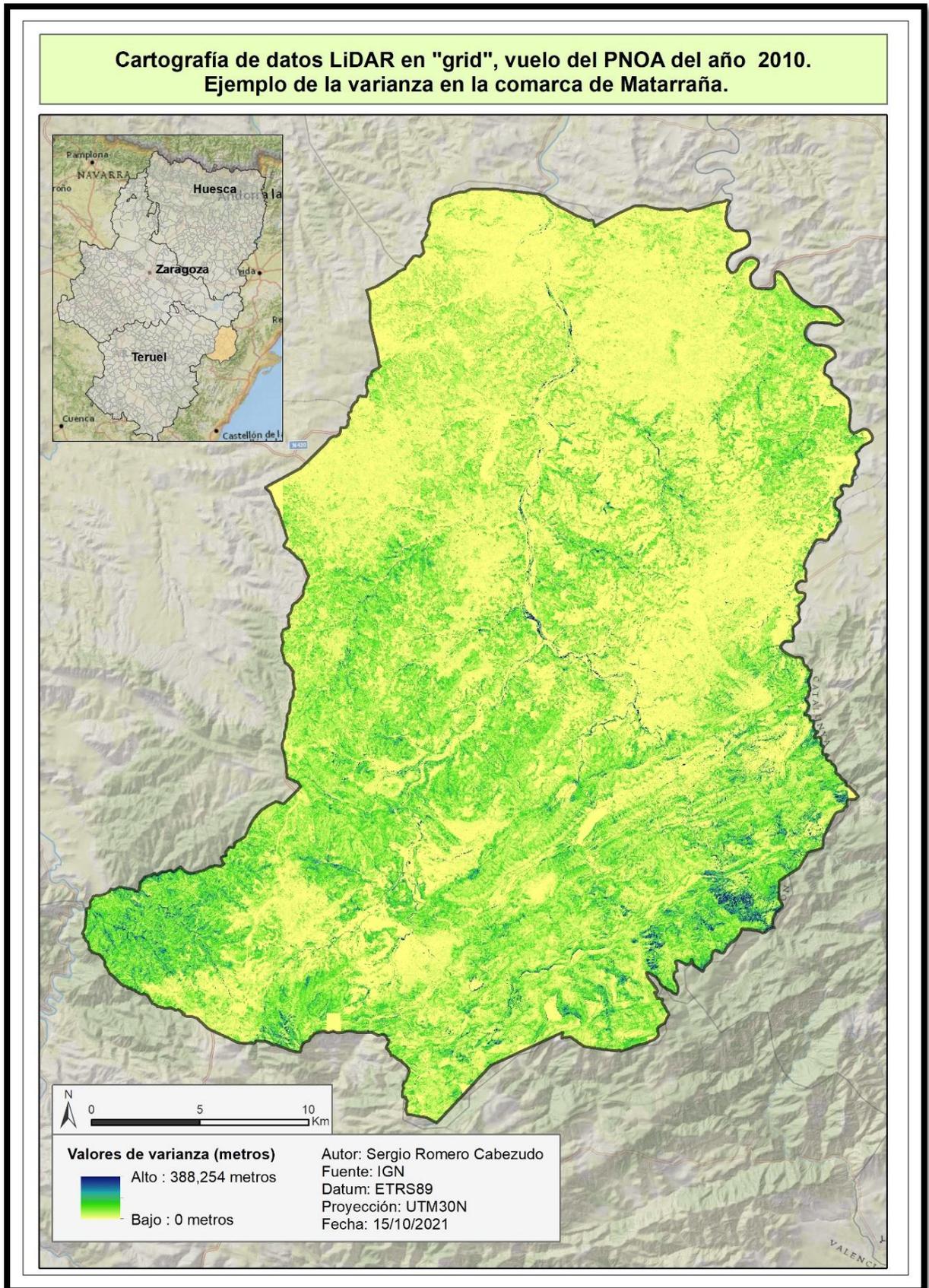


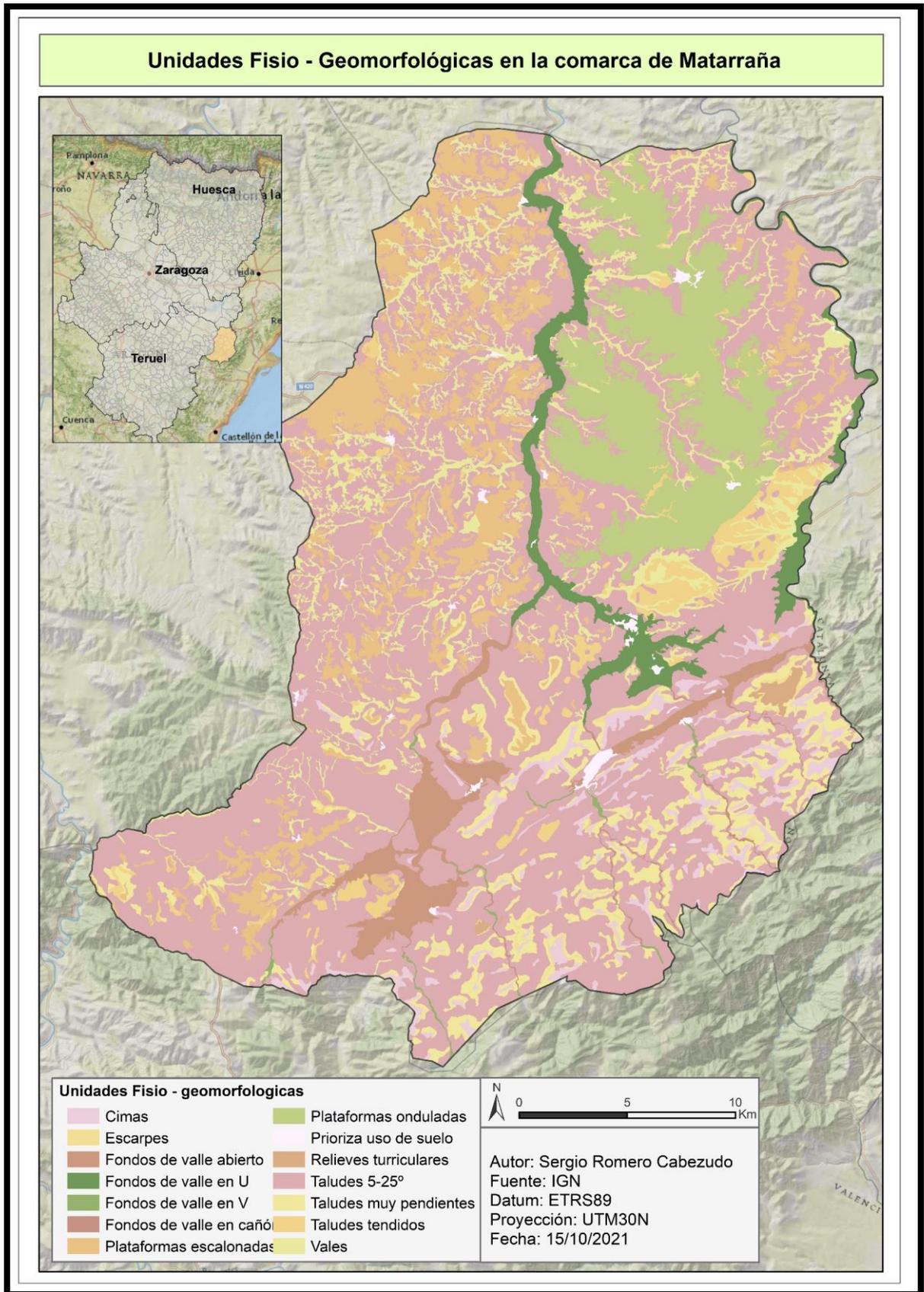
Figura 49: *Dispersión de los valores de percentil 99 respecto al NDVI (junio 2018) - Unidades fisio - geomorfológicas. Fuente: Realización propia.*



Cartografía 11: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo del PNOA del año 2010. Ejemplo de la desviación estándar en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.



Cartografía 12: Cartografía de datos LiDAR en "grid", vuelo del PNOA del año 2010. Ejemplo de la varianza en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.



Cartografía 13: *Unidades físico - geomorfológicas en la comarca de Matarraña. Fuente: Realización propia.*