

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL GEO-PARQUE MONTAÑAS DO COUREL MEDIANTE LIDAR E IMÁGENES SENTINEL-2

Marta Gayo Febrero

***Director: Juan de la Riva Fernández
Codirector: Víctor Andrés Visús***

**Máster Universitario en
Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Septiembre de 2024



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Este trabajo de fin de máster se centra en la caracterización de la vegetación del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel mediante el uso integrado de datos LiDAR e imágenes Sentinel-2. El estudio emplea datos LiDAR-PNOA de la segunda cobertura (2015-2021) y datos LiDAR de alta resolución obtenidos mediante vuelos con dron sobre varias parcelas seleccionadas por su representatividad de los diferentes ambientes forestales existentes en área de estudio. Se utilizan técnicas avanzadas de procesamiento de datos LiDAR para extraer métricas como el percentil 99 de altura, el porcentaje de cubrimiento y la varianza, con el fin de obtener información detallada sobre la estructura vertical y horizontal del dosel forestal. Complementariamente, se analizan imágenes Sentinel-2 aplicando la transformación Tasseled Cap para obtener información sobre brillo, verdor y humedad de la vegetación. El proceso metodológico también incluye la generación de modelos digitales de elevación, cálculo de métricas forestales y análisis estadístico para el estudio e interpretación de los datos. Este trabajo busca caracterizar la diversidad de ambientes vegetales del Geoparque, así como, de forma secundaria, identificar el estado de los bosques maduros. La integración de datos de teledetección de diferentes fuentes permite una caracterización precisa y detallada de la estructura, composición y distribución espacial de la vegetación del Geoparque, resultados que podrían ser útiles para la gestión y conservación de esta área en el futuro.

Palabras Clave: Geoparque, estructura forestal, Sentinel-2, LiDAR, cobertura vegetal.

Abstract

This master's thesis focuses on the characterization of the vegetation of the Courel Mountains UNESCO Global Geopark through the integrated use of LiDAR data and Sentinel-2 images. The study uses LiDAR-PNOA data from the second coverage (2015-2021) and high-resolution LiDAR data obtained through drone flights over several plots selected for their representativeness of the different forest environments existing in the study area. Advanced LiDAR data processing techniques are used to extract metrics such as the 99th percentile of height, percentage of cover and variance, in order to obtain detailed information on the vertical and horizontal structure of the forest canopy. Additionally, Sentinel-2 images are analyzed by applying the Tasseled Cap transformation to obtain information on vegetation brightness, greenness and humidity. The methodological process also includes the generation of digital elevation models, calculation of forest metrics and statistical analysis for the study and interpretation of the data. This work aims to characterize the diversity of plant environments in the Geopark, as well as, secondarily, to identify the status of mature forests. The integration of remote sensing data from different sources allows for a precise and detailed characterization of the structure, composition and spatial distribution of the Geopark's vegetation, results that could be useful for the management and conservation of this area in the future.

Key Words: Geopark, forest structure, Sentinel-2, LiDAR, vegetation cover.

Índice de contenidos

1.	Introducción y justificación	pág. 1
2.	Hipótesis y objetivos	pág. 2
3.	Área de estudio	pág. 2
4.	Material y métodos.....	pág. 5
4.1.	Características generales LiDAR.....	pág. 5
4.1.1.	Datos LiDAR-PNOA	pág. 6
4.1.2.	Datos LiDAR UAV.....	pág. 7
4.1.3.	Tratamiento de los datos LiDAR.....	pág. 8
4.2.	Características generales de Sentinel-2	pág. 10
4.2.1.	Tratamiento de las imágenes Sentinel-2	pág. 11
4.3.	Otros materiales	pág. 12
5.	Resultados y discusión	pág. 13
5.1.	Caracterización estructural de la vegetación	pág. 21
6.	Conclusiones	pág. 22
7.	Agradecimientos	pág. 23
8.	Bibliografía	pág. 24
9.	Anexos	pág. 26
9.1.	Otros productos cartográficos generados	pág. 26
9.2.	Gráficos derivados de la información óptica	pág. 30
9.3.	Cartografías de las parcelas de estudio	pág. 31

Índice de figuras

Figura 1.	<i>Souto de Saceda (izq.) y Río Ferreiriño (drch.) (27/07/2023)</i>	pág. 5
Figura 2.	Sistema LiDAR aerotransportado. Fuente: Vosselman y Maas (2010) ...	pág. 6
Figura 3.	Comportamiento de los pulsos LiDAR en la vegetación. Fuente: Vosselman y Maas (2010)	pág. 7
Figura 4.	Mapa de máxima actualidad de datos LiDAR-PNOA disponibles. Fuente: IGN	pág. 7
Figura 5.	Trabajo de campo (26/07/2023)	pág. 8
Figura 6.	Gráfico de sectores, porcentaje de ocupación de cada formación forestal sobre la superficie total del Geoparque Montañas do Courel. Fuente: IFN, IFGC y LiDAR-PNOA.....	pág. 16
Figura 7.	<i>Boxplot de la distribución del P99 por formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA</i>	pág. 17
Figura 8.	<i>Boxplot del porcentaje de cubrimiento por formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA.</i>	pág. 18
Figura 9.	<i>Boxplot de la distribución de la pendiente en cada formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA.</i>	pág. 19
Figura 10.	<i>Aciñeiral de Cruzul (27/07/2023).</i>	pág. 19

Índice de tablas

Tabla 1. Disposición de los bosques en función al tipo de sustrato. Fuente: Ballesteros et al., 2018	pág. 4
Tabla 2. Especificaciones técnicas de la 2ª cobertura LiDAR-PNOA. Fuente:IGN .	pág. 8
Tabla 3. Relación de las parcelas sobrevoladas y tipo de cubierta	pág. 9
Tabla 4. Estructura de las líneas de código empleados en FUSION/LDV para el procesamiento de datos LiDAR. Fuente: McGaughey, 2023.....	pág. 11
Tabla 5. Características de las bandas del sensor MSI de Sentinel-2A. Fuente: ESA, 2024	pág. 12
Tabla 6. Coeficientes Sentinel para el cálculo de TSC. Fuente: Shi y Xu, 2019 ...	pág. 12
Tabla 7. Descripción de las principales formaciones forestales del Geoparque. Fuente: IFN y Ballesteros et al., 2018.....	pág. 13
Tabla 8. Ocupación de cada formación forestal en el Geoparque	pág. 16

Índice de cartografías

Cartografía 1. Mapa de contexto del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel y parcelas de estudio	pág. 2
Cartografía 2. Distribución de las principales coberturas forestales del Geoparque Montañas do Courel. Fuente: IFN y IFCG.....	pág. 15
Cartografía 3. Mapa del P99 de la altura de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura)	pág. 20
Cartografía 4. Mapa del porcentaje de cubrimiento de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: Li-DAR-PNOA (2ª cobertura).	pág. 21
Cartografía 5. Mapa de la varianza en la altura de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura).	pág. 26
Cartografía 6. Mapa de las orientaciones en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura).	pág. 27
Cartografía 7. Verdor (TCT) Geoparque Montañas do Courel (2016). Fuente: Sentinel-2	pág. 29
Cartografía 8. Humedad (TCT) Geoparque Montañas do Courel (2016). Fuente: Sentinel-2	pág. 29
Cartografía 9. P99 y porcentaje de cubrimiento- Río Ferreiriño Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA	pág. 31
Cartografía 10. P99 y porcentaje de cubrimiento- Souto do Vilar Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.....	pág. 32
Cartografía 11. P99 y porcentaje de cubrimiento- Val das Mouras Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.....	pág. 33
Cartografía 12. P99 y porcentaje de cubrimiento- Banda caliza de Vilasivil Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA	pág. 34
Cartografía 13. P99 y porcentaje de cubrimiento- Devesa de Rogueira Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.....	pág. 35
Cartografía 14. P99 y porcentaje de cubrimiento- Souto de Saceda Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.....	pág. 36
Cartografía 15. P99 y porcentaje de cubrimiento- Acíñeiral de Cruzul Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.....	pág. 37

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La relevancia del estudio de la estructura vegetal en el contexto de investigaciones ambientales es de vital importancia, no solo para conocer su estado y características sino también por su relación con el medio e implicación en otros procesos naturales (Ibarra y Yetano, 1989). Por otra parte, estas investigaciones sirven también de base para el desarrollo de una planificación territorial en equilibrio con el medio (Ibarra y Yetano, 1989), así como, para el diseño de estrategias de gestión de los recursos forestales de una forma sostenible y adecuada (Montealegre, 2017).

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) busca realizar una investigación sobre la caracterización de la estructura forestal en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel. La definición de esta área de estudio se debe a la gran diversidad natural que presenta, una combinación de ambientes atlánticos y mediterráneos, que junto a sus particulares características geológicas, se constituye como un espacio de gran valor patrimonial y paisajístico (Ballesteros, et al. 2018). Comenzamos, primer lugar, acercando la definición del concepto central del estudio: la estructura vegetal. Pascual Castaño (2006:1) la describe como “la distribución espacial del tamaño, edad y especies de la vegetación, tanto viva como muerta”. Además, la comprensión de la estructura vegetal es de gran relevancia para el análisis de la biodiversidad y la dinámica forestal y que, al mismo tiempo, nos ofrece información clave sobre la composición y el funcionamiento de los ecosistemas.

En este sentido, una caracterización precisa de la estructura forestal no solo permite evaluar el estado actual de los bosques, sino que también proporciona una base sólida para su conservación y gestión sostenible, factores esenciales en un entorno tan complejo y valioso como el de las Montañas do Courel.

A este respecto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se posicionan como una herramienta fundamental para el tratamiento, análisis, visualización y representación de información espacial (Sánchez et al., 1999). En la actualidad, ocupan un lugar, cada vez, más importante en el estudio y análisis del territorio, facilitando la comprensión de patrones espaciales mediante la visualización y análisis detallado de información espacial (O'Neill et al., 1997). En el ámbito concreto de los estudios ambientales, como la gestión de los recursos naturales, la conservación de la biodiversidad, la evaluación de riesgos naturales o la gestión y estudio de los recursos forestales, los SIG se posicionan como la herramienta más adecuada para su ejecución desarrollando un papel fundamental desde las últimas décadas (Sánchez et al. 1999).

Asimismo, la teledetección ha ido consolidándose desde los años 70 como una herramienta clave en el análisis espacial, ganando especialmente relevancia a finales del siglo, cuando su aplicación en la investigación científica se extendió (Chuvienco, 2008). Esta tecnología permite la obtención de datos sobre amplias áreas sin necesidad de contacto directo con el objeto de estudio, lo que la convierte en una técnica no intrusiva (Chuvienco, 2008). Los sensores remotos, tanto activos como pasivos, juegan un papel esencial en la adquisición de información: los activos emiten un haz de energía y analizan el retorno, mientras que los pasivos captan la energía solar reflejada por la superficie (Chuvienco, 2008). Por otra parte, su capacidad para monitorizar zonas de difícil acceso y proporcionar información espacial de gran precisión y actualidad ha facilitado enormemente el estudio y la gestión de los espacios forestales (Kuenzer et al., 2014), ofreciendo además una alternativa más rápida y económica que los métodos tradicionales, al reducir tanto los costos como el tiempo requerido para la recopilación de datos (Koch, 2013).

Así pues, para el desarrollo de la investigación se optó por el uso combinado de sensores ópticos activos, como el LiDAR, y teledetección pasiva, puesto que nos ofrecen métodos eficientes para evaluar la dinámica de la vegetación en una zona específica. Esta integración permite obtener datos tanto sobre

la composición de la cubierta vegetal como sobre su estructura, lo que nos ofrece una visión más completa y precisa del estado y comportamiento de la vegetación en el área de estudio. Mediante la tecnología LiDAR se pudieron extraer diferentes métricas sobre el dosel forestal, mientras que de la teledetección óptica se obtuvo el índice de Tasseled Cap (TCT), derivando así un nuevo conjunto de bandas (Mostafiz and Chang, 2018).

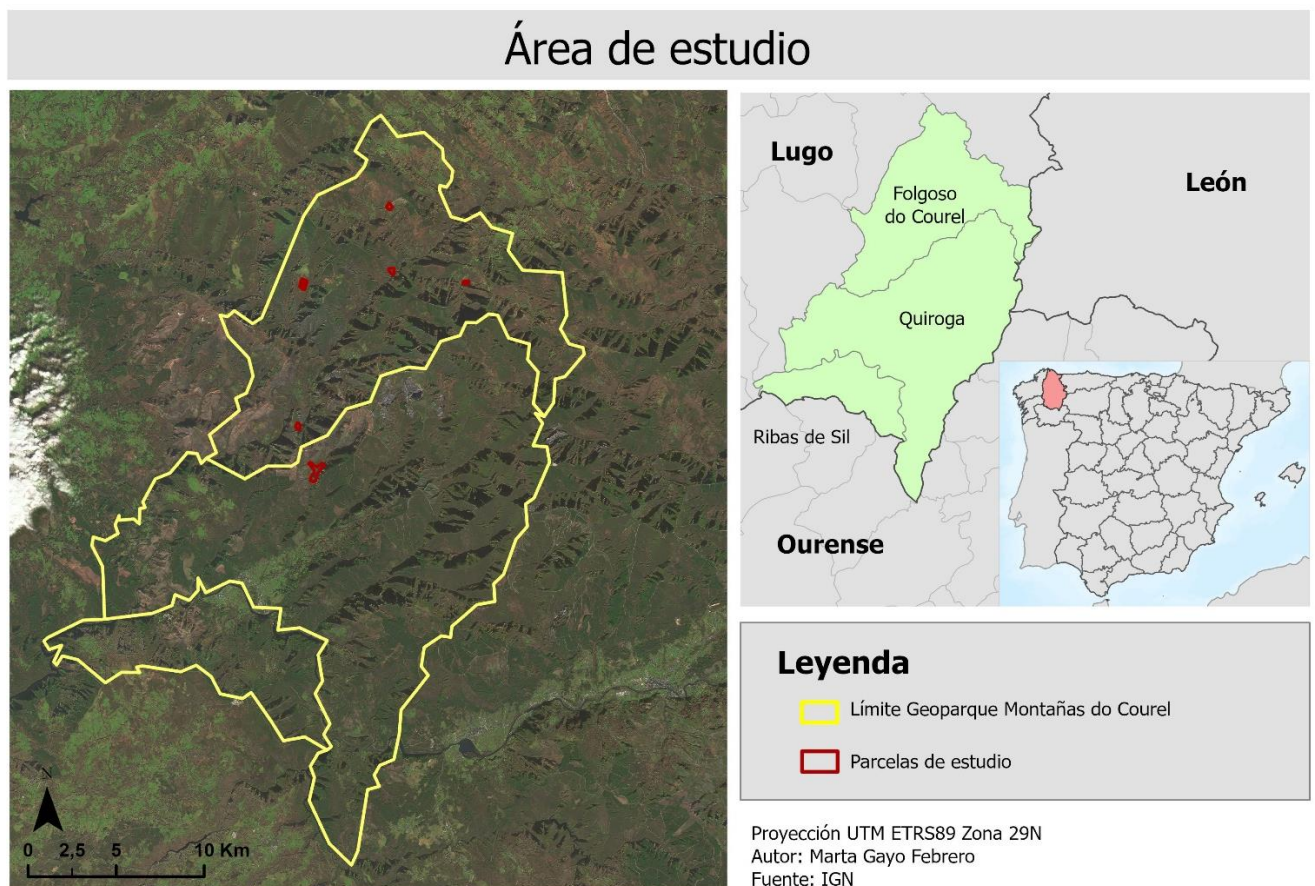
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El principal objetivo del presente trabajo es obtener una caracterización de la diversidad de ambientes vegetales del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel mediante el uso de técnicas avanzadas de teledetección. Para ello, se integrarán datos LiDAR, pertenecientes al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), e información óptica proveniente de imágenes Sentinel-2. Esta combinación permitirá realizar una caracterización precisa y detallada de la vegetación en términos de estructura, composición y distribución espacial dentro del geoparque.

Al mismo tiempo, se han trazado una serie de objetivos específicos, que ayudarán a la consecución del objetivo principal y a obtener una comprensión más profunda de la vegetación del área de estudio:

- Realizar un análisis estadístico de la estructura del dosel vegetal a través de la selección de métricas y variables derivadas de los datos LiDAR.
- Identificar y evaluar el estado de los bosques maduros.

3. ÁREA DE ESTUDIO



Cartografía 1. Mapa de contexto del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel y parcelas de estudio.

El Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas de O Courel se sitúa en el extremo noroccidental de la Península Ibérica. Este ocupa, concretamente, la margen SE de la provincia de Lugo, definiendo la frontera con Ourense, al sur, y con León al este (Cartografía 1). El parque abarca 578km², incluyendo, de norte a sur, los municipios de: Folgoso do Courel, Quiroga y Ribas de Sil.

Se trata de un espacio singular, en comparación al resto de ambientes que podemos encontrarnos en la comunidad gallega, especialmente por su importante patrimonio geológico. Este espacio se caracteriza por desarrollar, en un espacio no muy extenso, una gran diversidad biológica y geomorfológica (Pérez Alberti, 2001). Esta excepcionalidad viene condicionada principalmente por cuatro grandes factores: climáticos, topográficos, humanos y geológicos.

En términos biogeográficos, este espacio se encuentra en una zona de transición entre dos dominios bioclimáticos: el Atlántico y el Mediterráneo, es decir, en un ecotono. Esta condición hace que en un espacio reducido podamos encontrar características, climáticas, geológicas o vegetales, propias de ambas regiones (Pérez Alberti, 1982). La temperatura media anual es de en torno a 8°C y las precipitaciones superan los 1200mm (Martínez Cortizas y Pérez Alberti, 1999). No obstante, en la zona de los valles se extiende un microclima típicamente mediterráneo, que ha permitido el cultivo de algunas especies como viñedos u olivares.

El relieve resultante es una combinación de valles y sierras, con una disposición N-S, resultado de la Orogenia Alpina, durante Cenozoico. Existen importantes desniveles, de hasta 1400m, donde la máxima altitud que podemos encontrar es de 1641m (Pico Formigueiros). Durante el Cuaternario el glaciarismo y la red fluvial fueron los principales actores de modelaje del paisaje, creando valles y terrazas. Al sur, el encajamiento del Rio Sil, conformó un valle de 30km de longitud con una orientación E-O y que funciona como corredor natural con el interior peninsular, sirviendo como principal vía de comunicación tanto para la fauna como para el ser humano, además de favorecer el paso de especies de flora típicamente mediterráneas (Pérez Alberti, 2019). El ser humano ha sido uno de los agentes de mayor influencia en el territorio, el cual ha tenido presencia desde tiempo atrás. Un aspecto fundamental para comprender como, a través de los aprovechamientos y usos del suelo, se modela su paisaje y estructura. Este ha sido el caso de las actividades relacionadas con la extracción de minerales que tuvieron presencia desde la llegada de los humanos a este espacio, así como, del aprovechamiento forestal a través de la expansión y origen de los soutos (bosques de castaños) (Ballesteros et al., 2018).

El sustrato geológico está formado por una gran variedad de materiales (pizarras, esquistos, cuarcitas, calizas, mármoles...), que influyen en gran medida en la formación de los suelos y las formas de relieve que podemos encontrarnos (Pérez Alberti, 2019). Así mismo, su interacción con otros factores, ya citados, son los que verdaderamente condicionan las características del suelo. Como resultado de su combinación podremos tener suelos más ácidos o básicos, que serán determinantes para desarrollar un tipo de vegetación u otro.

La gran variedad y adaptabilidad de especies que podemos encontrar en el Geoparque representa en torno al 40% de todas las especies presentes en Galicia (Ballesteros et al., 2018). Este es el resultado directo de la relación y combinación entre los cuatro factores ya explicados. Teniendo en cuenta la vegetación, podemos diferenciar principalmente estos ambientes: las devesas, los matorrales, bosques mixtos, de ribera, los pinares, alcornocales, robledales, soutos o encinares, entre otros.

Las devesas son los bosques propios de esta zona, destacan por ser áreas de gran biodiversidad que concentran un elevado número de especies. Principalmente, están formados por robles (*Quercus robur* y *Quercus petraea*) y castaños (*Castanea sativa*), según aumenta progresivamente la altura y el frío podemos encontrar otras especies como tejos (*Taxus baccata*) o acebos (*Ilex aquifolium*), ambos de tipo perenne, y serbales (*Sorbus aucuparia*), de tipo caduca. Sin embargo, estas masas no son las mejor

conservadas actualmente, solo podemos encontrar estos bosques autóctonos en áreas de difícil acceso, como en laderas muy abruptas con orientaciones al norte, donde la acción humana no ha tenido un impacto importante.

Los bosques de castaños (*Castanea sativa*), conocidos como soutos, tienen una importante presencia en el geoparque. Su desarrollo estuvo muy condicionado a la actividad humana, quien acostumbraba a cultivarlos en el entorno de las aldeas para proveerse de alimento y como una forma de mantener limpios de vegetación los sotobosques. Esta práctica es tan antigua que actualmente es habitual encontrarse muchos ejemplares que llegan ya al centenario (Ballesteros et al., 2018). Por otra parte, los bosques de ribera, vinculados a los márgenes de los cursos fluviales y compuestos, principalmente, por alisos (*Alnus glutinosa*) y fresnos (*Fraxinus excelsior*) tienen también una importante representación. Así mismo, en las áreas más elevadas es habitual encontrar zonas de matorral y pastos, donde dominan especies herbáceas y arbustivas como brezales rojos, piornales o retamas.

Tabla 1. Disposición de los bosques en función al tipo de sustrato. Fuente; Ballesteros et al., 2018

<i>Especies en suelos básicos</i>	Especies sin preferencia de sustrato	Especies en suelos ácidos
Hayedos (<i>Fagus sylvatica</i>)	Castaños (<i>Castanea sativa</i>)	Bosques de abedul (<i>Betula alba</i>)
Encinares (<i>Quercus rotundifolia</i>)	Bosques mixtos de tejo (<i>Taxus baccata</i>), acebo (<i>Ilex aquifolium</i>), serbal (<i>Sorbus aucuparia</i>)...	Bosques de rebollo (<i>Quercus pyrenaica</i>)
	Bosques mixtos de fresno (<i>Fraxinus excelsior</i>), avellano (<i>Corylus avellana</i>), olmo (<i>Ulmus glabra</i>), sauce capruno (<i>Salix caprea</i>)...	Robledales (<i>Quercus robur</i> y <i>Quercus petraea</i>)
		Bosques de alisos (<i>Alnus glutinosa</i>)
		Bosques de alcornoques (<i>Quercus suber</i>)

Al mismo tiempo, se han seleccionado seis parcelas de estudio situadas en diferentes zonas del Geoparque, con el objetivo de representar la variedad de cubiertas presentes en el área. De estas parcelas, todas se encuentran dentro de los límites del Geoparque, a excepción del encinar de Cruzul. Esta distribución geográfica asegura una adecuada representación de la diversidad de ecosistemas que caracterizan esta área.

- **Río Ferreiriño.** Esta parcela se encuentra en las proximidades del emblemático pliegue de Campodola-Leixazós, declarado Monumento Natural en 2012 y símbolo del Geoparque. Se trata de un ejemplo de bosque maduro muy encajado que se desarrolla en el valle trazado por el propio río, en una zona de barrancos con más de 400m de desnivel (Ballesteros et al., 2018) (fig. 1).
- **Souto do Vilar.** En las inmediaciones de la aldea do Vilar, destaca por sus bosques de castaños, es un ejemplo de la relevancia de la actividad humana en esta zona.
- **Souto de Saceda.** Al igual que el anterior se trata de otro bosque de castaños o souto, en este caso, situado al noroeste de los límites del Geoparque (fig. 1).
- **Val das Mouras (Mercurín).** Se trata de uno de los pocos ejemplos de afloramiento de calizas en el Geoparque, se caracteriza principalmente por sus formaciones exokársticas, como lapiaces,

además de cuevas, conductos y cañones subterráneos. Aunque en esta área destacan los bosques de castaños, la parcela sobrevolada está dominada por una formación de encinas.

- **Devesa da Rogueira.** Está situada en un antiguo circo glaciar, más concretamente en la ladera de sombra de Pico Formigueiros. Se trata de los pocos ejemplos en los que se conservan los bosques genuinos propios de la Galicia Oriental. Esta formación ocupa un espacio de apenas 310 Ha en el que se han delimitado 21 tipos de bosques diferentes (Gutián et al., 2013). Esta diversidad de especies vegetales viene condicionada por dos factores principales: la heterogeneidad litológica, que favorece la formación de una gran variedad de suelos, y la diversidad de ambientes derivada de los pronunciados desniveles. En conjunto, todo ello hace que esta devesa sea considerada una de las áreas de mayor biodiversidad de Galicia (Ballester et al., 2018).
- **Banda caliza de Vilasivil.** Esta parcela está ubicada en la zona más septentrional del Geoparque, en las proximidades de la aldea de Vilasivil. Se trata de un caso particular en el que se puede apreciar cómo el sustrato, compuesto por calizas, mármoles y suelos preferentemente básicos, condiciona las especies de vegetación que se desarrollan, en este caso, hayas y encinas en formaciones de baja densidad.
- **Encinar de Cruzul.** Esta parcela está situada en el municipio de Becerreá, que se encuentra fuera de los límites del Geoparque, pero en sus proximidades, en torno a 15km hacia el norte. Esta área es significativa porque ilustra la introducción de especies propias de regiones mediterráneas que coexisten con otras típicamente atlánticas. Además, supone un buen ejemplo de la diversidad de ambientes que existen y se pueden encontrar en el Geoparque.



Figura 1. Souto de Saceda (izq.) y Río Ferreiriño (drch.) (27/07/2023)

4. MATERIAL Y MÉTODOS

A lo largo de este apartado se detalla el procedimiento metodológico empleado para la consecución de los objetivos propuestos. Primero, describiendo el procesamiento y empleo de los datos LiDAR para la obtención de diferentes métricas que permitan caracterizar la vegetación del Geoparque Montañas do Courel y, posteriormente, su combinación con la información óptica.

4.1. Características generales LiDAR

El LiDAR (*Light Detection And Ranging*) es una tecnología de teledetección activa que opera mediante la emisión de pulsos láser y la posterior recepción de las señales reflejadas. Este sistema se basa

en la medición precisa del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y su retorno o eco al sensor, lo que permite calcular la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. A través de un fotodiodo se recoge la radiación devuelta por los objetos, generalmente en la banda del infrarrojo cercano, y de un telémetro la distancia existente entre el sensor y la superficie. El resultado es una representación fiel y muy detallada de la superficie terrestre en forma de una nube de puntos tridimensional y georreferenciada, con una gran precisión en las coordenadas XYZ de cada retorno (Baltsavias, 1999). En la obtención de esta información, sobre la orientación y posición los sensores LiDAR aerotransportados cuentan con un receptor GPS para obtener la altura y posicionamiento, bien en tiempo real o bien en postproceso, y una IMU (Unidad Inercial) encargada de registrar la trayectoria y los principales movimientos del sensor (giro, alabeo y cabeceo). En la figura 2 se muestran los principales componentes y funcionamiento de un sistema LiDAR aerotransportado (Vosselman y Maas, 2010).

Las distintas tipologías de LiDAR varían en función de las especificaciones del sensor, tales como el tamaño de la huella, la frecuencia de escaneo y emisión de pulsos o el ángulo de escaneo entre otras, así como de la plataforma empleada, ya sea terrestre, satelital, aerotransportada o UAV. La elección del tipo de sensor más adecuado dependerá de la aplicación específica a la que se destine (estudios topográficos, batimétricos, forestales...), al mismo tiempo que de los objetivos y particularidades del estudio.

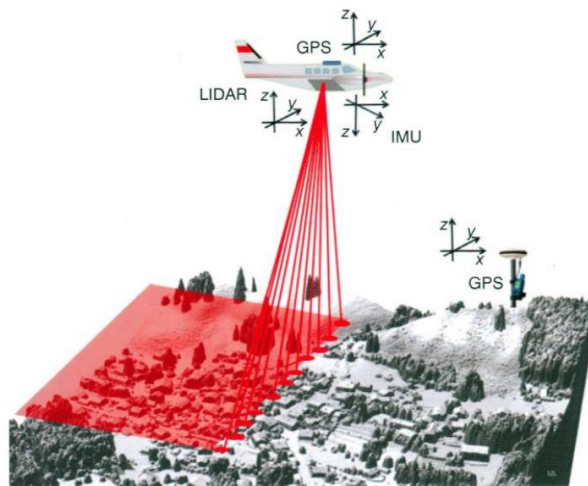


Figura 2. Sistema LiDAR aerotransportado. Fuente: Vosselman y Maas (2010)

En el análisis de la vegetación, y más específicamente en el estudio de la estructura de masas forestales, la tecnología LiDAR se posiciona como una gran opción dado el gran potencial que ofrece. Los pulsos láser emitidos tienen la capacidad de penetrar entre la vegetación y alcanzar el suelo, ofreciéndonos información detallada del dosel forestal, gracias a la capacidad del sensor de captar múltiples retornos (Kraus y Pfeifer, 1998) (fig. 3). A partir de los ecos captados es posible crear un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) de gran precisión que posteriormente servirá para normalizar las alturas de la nube de puntos (García et al., 2012 *apud*. Montealegre et al., 2016). Este proceso permite obtener un modelo del dosel del que se pueden derivar otros parámetros de gran utilidad para la caracterización y análisis forestal (González Ferreiro et al., 2012).

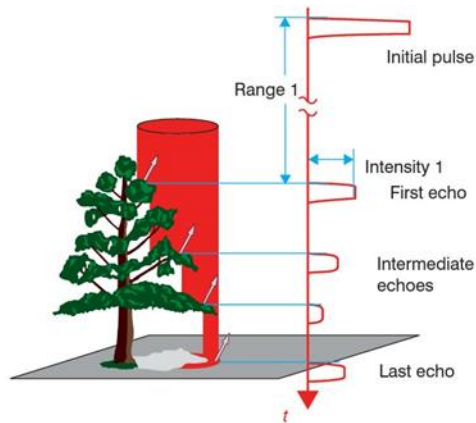


Figura 3. Comportamiento de los pulsos LiDAR en la vegetación. Fuente: Vosselman y Maas (2010)

4.1.1. Datos LiDAR-PNOA

En este trabajo se emplean los datos LiDAR-PNOA, del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Se trata de un proyecto colaborativo en el que participan diferentes administraciones públicas y autonómicas que se inicia en el año 2009 (PNOA, 2024). Su principal objetivo es la obtención de información altimétrica de gran precisión, periódica y homogénea para todo el conjunto del territorio español, que pueda ser de utilidad en el abordaje de diferentes estudios, así como, en la obtención de MDEs de gran precisión. Al mismo tiempo, cabe destacar que este tipo de información geoespacial es considerada como datos básicos de referencia por la directiva INSPIRE (PNOA, 2024).

En la actualidad, este proyecto consta ya de tres coberturas: la primera realizada entre los años 2009-2015, la segunda entre 2015-2021 y, finalmente, la tercera todavía en desarrollo, iniciada en 2022 y planificada para completarse en el año 2025. Pese a que el proceso de captura de datos de la tercera cobertura ya se ha iniciado los datos aún no están disponibles. En este contexto, los datos LiDAR empleados en el presente trabajo son los correspondientes a la segunda cobertura del proyecto PNOA, accesibles en el Centro Nacional de Información del Instituto Geográfico Nacional (CNIG-IGN) para la zona Galicia Este, los datos disponibles de mayor actualidad (fig.4). En concreto, este vuelo (GAL-E) fue iniciado en agosto de 2016 y finalizado en febrero de 2017, se trata de ficheros de nubes de puntos ya clasificadas y georreferenciadas en ficheros LAZ de 2x2 km de extensión, con una densidad de cobertura de 0,5 puntos/m² y un error en altimetría inferior a 20 cm.



Figura 4. Máxima actualidad de datos PNOA –LiDAR disponibles. Fuente: IGN

A continuación, en la siguiente tabla (Tabla 2) se resumen las características y especificaciones técnicas del vuelo LiDAR y las nubes de puntos empleadas. Para cubrir la totalidad del área de estudio se descargaron 374 archivos.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la 2º cobertura LiDAR-PNOA. Fuente: IGN

Características	Vuelo GAL-E PNOA 2016
Sensor	LEICA ALS80
Densidad de puntos	0,5 puntos/m ²
Campo de visión transversal (FOV)	Máximo 50° efectivos
Sistema geodésico de referencia	ETRS89
Proyección cartográfica y huso	UTM zona 29N
Tipo de altitud	Ortométrica
Distribución de las hojas	2x2 km
Precisión general altimétrica	RMSEz ≤ 20 cm
Precisión general planimétrica	RMSE _{x, y} ≤ 30 cm

4.1.2. Datos LiDAR UAV

Los datos LiDAR obtenidos a partir del trabajo de campo adquieren una especial relevancia, dado que complementan los datos de teledetección aerotransportada y satelital. Durante los días 26 y 27 de julio de 2023, se llevaron a cabo las observaciones y la toma de datos en campo, centradas en la obtención de información a una escala más detallada sobre la estructura de la vegetación en el Geoparque Montañas de O Courel (fig. 5). Inicialmente, para asegurar una representatividad adecuada de la diversidad de coberturas vegetales presentes en el área de estudio, se seleccionaron seis enclaves forestales diferentes escogidos por su heterogeneidad y representatividad en cuanto a tipos de vegetación más característicos del área de estudio (tabla 3 y 7). Se decidió incorporar una séptima parcela al conjunto con el fin de mejorar la ejemplificación de los ambientes.



Figura 5. Trabajo de campo (26/07/2023)

La toma de datos se realizó mediante un cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK, equipado con un sensor LiDAR Zenmuse, un sistema avanzado que permite la captura precisa de información tridimensional de alta resolución. El uso de esta tecnología LiDAR aérea, complementada con la georreferenciación corregida en tiempo real (RTK Real Time Kinematic), proporcionó datos detallados de la superficie y de la estructura vertical de las masas forestales, permitiendo detectar tanto el dosel como el sotobosque.

Todos los vuelos se realizaron siguiendo los protocolos de planificación y seguridad requeridos (vuelo en VLOS).

La selección del dron DJI Matrice 300 RTK permitió operar en terrenos forestales de difícil acceso y de grandes desniveles. Los datos recogidos con el sensor fueron procesados posteriormente para generar nubes de puntos de alta densidad (una media de 600 puntos/m²), las cuales se pueden utilizar para elaborar modelos digitales de elevación (MDE), modelos del dosel vegetal o para la generación de métricas específicas que ayuden a la caracterización de la vegetación del Geoparque Montañas do Courel. El procesamiento en estos datos es el mismo que el descrito para el tratamiento de la información PNOA.

Tabla 3. Relación de las parcelas sobrevoladas y tipo de cubierta

Parcela	Tipo de cubierta
Río Ferreiriño	Bosque de ribera y mixto
Souto do Vilar	Castañar
Souto de Saceda	Castañar
Val das Mouras (Mercurín)	Hayas y encinas
Vilasivil	Hayas y encinas
Acíñeiral de Cruzul	Encinar
Devesa de Rogueira	Bosque maduro

4.1.3. Tratamiento de los datos LiDAR

Previamente a profundizar en el tratamiento de los datos para la obtención de las métricas y estadísticos, es importante señalar que se han llevado a cabo un conjunto de pasos previos con el objetivo de evitar distorsiones o errores en los posteriores resultados derivados de las clasificaciones realizadas por el PNOA u otras inexactitudes relacionadas con las alturas de los puntos de suelo.

El primer paso consiste en la transformación de los archivos, descargados desde el CNIG, en formato LAZ a su extensión descomprimida LAS para así poder trabajar y visualizar las nubes de puntos. Para ello se empleó el software “*TcLasConverter*”, distribuido por el Gobierno de Navarra, que nos permite la descompresión de los archivos a formato LAS de forma sistemática escogiendo las clases a exportar y pudiendo definir el sistema de coordenadas para los archivos de salida. En este caso, se han exportado todas las clases a excepción de la 7 y la 12, correspondientes al ruido (“*noise*”) y al solape entre pasadas (“*overlap*”) respectivamente. De esta forma conseguimos eliminar los puntos con dicha clasificación y evitar errores en los procesos posteriores. Una vez superado este proceso, a través del software FUSION/LDV se emplea la herramienta “*Groundfilter*” para filtrar los puntos correspondientes al suelo, con el fin de crear un modelo digital de elevaciones con el que, a continuación, se normalizarán las alturas de la nube de puntos.

A lo largo de todo el proceso se han ido generando archivos batch, con la finalidad de automatizar y agilizar el proceso. En todos ellos se incluyen los comandos necesarios para que el software FUSION/LDV ejecute de automáticamente las instrucciones dadas. Los archivos batch (con extensión .bat) son archivos de texto que se ejecutan directamente en la consola de comandos de Windows (CMD) iniciando de forma secuencial las instrucciones programadas. Esta estrategia no solo simplifica el manejo de grandes conjuntos de datos, sino que también mejora la eficiencia y consistencia en la aplicación de los diferentes procedimientos analíticos, permitiendo una integración más fluida en el flujo de trabajo del proyecto.

El comando “*GroundFilter*” extrae los datos pertenecientes al terreno, este basea su clasificación en el algoritmo de filtrado desarrollado por Kraus y Pfeifer (1998), el cual incorpora elementos en la

predicción lineal propuesta por Kraus y Mikhail en 1972 (González-Ferreiro et al. 2013). Este enfoque permite una mayor precisión en la generación de modelos continuos de superficies, optimizando el filtrado de los datos para su posterior análisis. Su línea de código se construye incluyendo el valor W de la ecuación de pesos, el directorio de salida de los ficheros LAS filtrados, así como, el correspondiente a la nube puntos a filtrar. El resultado es un archivo que únicamente contiene los puntos clasificados como suelo.

A partir de los datos LiDAR derivados del filtrado (resultado de la herramienta “*GroundFilter*”), archivos que contienen exclusivamente información sobre el terreno, se genera el modelo digital de elevaciones. La herramienta empleada en este caso es “*GridSurfaceCreate*”, también del entorno de FUSION/LDV. En este caso es necesario introducir los ficheros LAS resultado del filtrado del paso anterior, un directorio de salida para los archivos que se generarán una vez se ejecute, también es necesario incorporar argumentos que determinen el sistema de coordenadas o el tamaño de celdas para la creación del MDE. Referente a esto último, se optó por un tamaño de píxel de 10m para que el análisis y combinación de datos fuese más sencilla, teniendo en cuenta la incorporación de información óptica de Sentinel 2. El archivo de salida tiene extensión .dtm, pero esta puede ser transformada empleando otras funciones disponibles en el entorno como “*dtm2tif*”.

El cálculo de las estadísticas se ejecutó una vez realizado todos los pasos previos de preparación de los datos LiDAR. La función de FUSION/LDV empleada fue “*GridMetrics*”, esta nos devuelve una serie de estadísticas de una nube de puntos, pero en formato grid, es decir, en una malla ráster continua, de la que podemos decidir el tamaño de celda. Cada píxel contiene la información estadística del conjunto de puntos que se encuentran en su interior. En concreto, para ejecutar esta herramienta, se debe definir el MDE (en formato .dtm) creado anteriormente, las nubes de puntos iniciales (archivos LAS sin ruido ni solape) y la resolución del archivo de salida. En este caso, no es necesario realizar una operación concreta para crear un modelo digital de elevaciones normalizado, sino que al ejecutar esta operación se realizará de forma automática. Como resultado se genera un archivo CSV que será transformado en un ráster para poder visualizarlo en un entorno SIG y poder realizar operaciones con él, a través del comando “*CSV2grid*”.

Esta herramienta transforma las estadísticas contenidas en el archivo CSV resultado del “*GridMetrics*” por un archivo ráster. Para ello, es necesario especificar la ruta de salida para los ráster que se van a generar y el número al que corresponde a la columna del estadístico que nos interesa extraer, esta información está disponible en el manual de uso del software de FUSION/LDV.

Las métricas extraídas de los datos LiDAR para este estudio incluyeron el percentil 99, el porcentaje de cubrimiento y la varianza, las cuales aportan información clave sobre la estructura del dosel forestal. El percentil 99 se utilizó para estimar la altura máxima de la vegetación, permitiendo caracterizar la distribución vertical del dosel. El porcentaje de cubrimiento se refiere a la proporción de superficie cubierta por vegetación en relación con el área total, proporcionando una medida de la densidad del dosel. Finalmente, la varianza se empleó para analizar la variabilidad en la altura de los retornos LiDAR, lo que permitió evaluar la heterogeneidad estructural de la vegetación en el área de estudio. Estas métricas, en conjunto, ofrecen una visión detallada de la configuración vertical y horizontal del bosque, lo que resulta fundamental para la caracterización de la cubierta vegetal.

Tabla 4. Estructura de las líneas de código empleados en FUSION/LDV para el procesamiento de datos LiDAR. Fuente: McGaughey, 2023

Comandos (McGaughey, 2023)	Herramientas
<i>GroundFilter [switches] outputfile cellsize datafile1 datafile2 ...</i>	Filtrado de los puntos correspondientes al suelo.
<i>GridSurfaceCreate [switches] surfacefile cellsize xyunits zunits coordsys zone horizontum vertdatum datafile1 datafile2...</i>	Creación de un MDE.
<i>GridMetrics [switches] groundfile height-break cellsize outputfile datafile1 [datafile2 ... datafileN]</i>	Extracción de las métricas de la nube de puntos.
<i>CSV2GRID [switches] inputfile column outputfile</i>	Rasterización de las métricas de interés. <ul style="list-style-type: none"> - P99: columna 38. - Varianza: columna 11. - Cubrimiento: columna 49.

Los ráster generados fueron combinados en un mosaico mediante la herramienta "*mosaic to new raster*", dentro del software ArcMap, que permite unificar múltiples capas en un único archivo continuo. Posteriormente, se aplicó la herramienta "*extract by mask*", del mismo entorno, para recortar ráster resultante y ajustarlo a la extensión de los límites geográficos del geoparque. Finalmente, a través de la herramienta "*Zonal Statistics as a Table*" de ArcMap y mediante el software de RStudio se combinaron las capas vectoriales de coberturas con la información ráster de las métricas extraídas de LiDAR y de la transformación Tasseled Cap de la que se extrajeron las principales estadísticas (medias, desviación estándar...) y que posteriormente se emplearán para la caracterización y análisis de la vegetación.

4.2. Características generales de Sentinel-2

En este trabajo también se emplearon imágenes satelitales correspondientes a la constelación Sentinel-2. Estas se incluyen en el programa europeo de la ESA (Agencia Espacial Europea) "*Copernicus*" y cuya descarga y acceso es gratuita. Se trata de una constelación formada por dos satélites: Sentinel-2A, en órbita desde junio de 2015, y Sentinel 2-B lanzado en marzo de 2017. Ambos tienen una órbita helio-sincrónica a 786 km, una anchura de barrido de 290 km² y una inclinación de 98,62° (ESA, 2024). Con el par de satélites, que operan simultáneamente, se consigue una cobertura total de la superficie terrestre en periodos de revisita de 5 días y de 2 a 3 días en latitudes medias, lo que nos ofrece una alta frecuencia temporal en la disponibilidad de datos. Dentro de las principales aplicaciones a las que se destina se encuentran los estudios y análisis de vegetación y de coberturas del suelo.

Ambos satélites están equipados con un sensor multiespectral MSI ("*Multispectral Instrument*") de alta resolución espacial, capaz de captar información en 13 bandas espectrales que van desde el rango visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Tabla 5).

Tabla 5. Características de las bandas del sensor MSI de Sentinel-2A. Fuente: ESA, 2024

Banda	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial
B1 Coastal aerosol	442.7	60
B2 Blue	492.7	10
B3 Green	559.8	
B4 Red	664.6	
B5 Red Edge 1	704.1	
B6 Red Edge 2	740.5	20
B7 Red Edge 3	782.8	10
B8 NIR 1	832.8	
B8bis NIR 2	864.7	
B9 Water Vapour	945.1	60
B10 SWIR Cirrus	1373.5	20
B11 SWIR 1	1613.7	
B12 SWIR 2	2202.4	

Las imágenes Sentinel-2 se seleccionaron considerando dos criterios fundamentales: la ausencia de nubes y la proximidad temporal a la captura de los datos LiDAR, tanto del proyecto PNOA para la escala del geoparque, como de los vuelos con dron para el análisis detallado de las parcelas. Así pues, las fechas seleccionadas corresponden al 19 de julio de 2016, para LiDAR-PNOA, y al 13 de julio de 2023, para las parcelas.

4.2.1. Tratamiento de las imágenes Sentinel-2

La transformación Tasseled Cap es una técnica de teledetección ampliamente utilizada para el estudio de la vegetación, que consiste en la combinación lineal de las bandas originales para la obtención de otras nuevas que realcen ciertos rasgos que resulten de interés (Chuvieco, 2008). Se distinguen tres componentes diferentes: brillo (*brightness*) que muestra los cambios en la reflectividad total, verdor (*greenness*) en relación con la vegetación y, por último, la humedad (*wetness*) ligada al contenido de agua (Chuvieco, 2008).

El cálculo Tasseled Cap (TCT) se realiza a través de la aplicación de unos coeficientes previamente definidos y calculados específicamente para cada sensor. Los parámetros empleados para la transformación TCT para las imágenes del sensor MSI de Sentinel-2 es la propuesta por Shi y Xu (2019) y recogida en la tabla 6. En este caso, se emplean imágenes de reflectancia en el sensor, es decir al techo de la atmósfera (TOA - “*Top of Atmosphere*”) que corresponden con el Nivel 1C, escenas de 100km con una proyección UTM WGS84, y que posteriormente se han corregido radiométricamente (Shi y Xu, 2019).

Tabla 6. Coeficientes Sentinel para el cálculo de TSC. Fuente: Shi y Xu, 2019

TCT	B2 - Azul	B3 - Verde	B4 - Rojo	B8 – NIR1	B11 – SWIR1	B12 – SWIR2
Brillo	0,3510	0,3813	0,3437	0,7196	0,2396	0,1949
Verdor	-0,3599	-0,3533	-0,4734	0,6633	0,0087	-0,2856
Humedad	0,2578	0,2305	0,2305	0,1071	-0,7611	-0,5308

$$((\text{Coef}_x) * B2) + ((\text{Coef}_x) * B3) + ((\text{Coef}_x) * B4) + ((\text{Coef}_x) * B8) + ((\text{Coef}_x) * B11) +$$

Fórmula

$$((\text{Coef}_x) * B12)$$

Coef_x valor del coeficiente correspondiente a la banda a utilizar

A través de la calculadora ráster (“*Raster Calculator*”), mediante el software ArcGIS, se han realizado todas las operaciones necesarias para derivar el índice TCT para cada una de las escenas seleccionadas.

4.3. Otros materiales

En el proceso metodológico, a la vez que, para el análisis e interpretación de los resultados, se incorporaron otros materiales y fuentes de información complementarias que ayudaron a completar la caracterización y análisis de las cubiertas. Por una parte, se empleó el Inventario Forestal Nacional (IFN4) y el Inventario Forestal Continuo de Galicia (IFCG) que contienen información espacial de la distribución y ocupación forestal, ambas de libre acceso. La principal diferencia entre estas es la periodicidad de la información y la escala de trabajo, mientras que el IFN ofrece información nacional cada diez años, el IFCG lo hace a una escala regional, con una mayor precisión con datos más actualizados. Se optó por realizar una simplificación y homogenización de la leyenda para facilitar el trabajo y la caracterización de las cubiertas. En síntesis, se ha decidido reducir las clases a las formaciones más comunes y características del geoparque, recogidas en la tabla 7.

Tabla 7. Descripción de las principales formaciones forestales del Geoparque. Fuente: IFN y Ballesteros et al., 2018

Formación forestal	Descripción
Bosque mixto	Formaciones propias de ambientes atlánticos (<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Ulmus glabra</i> , <i>Salix caprea</i> ...).
Bosque de ribera	Formaciones en el entorno de ríos (<i>Populus alba</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Fraxinus spp</i> ...)
Alcornocal	Formaciones de <i>Quercus suber</i> , propia de ambientes mediterráneos
Abedular	Formaciones de <i>Betula alba</i>
Encinar	Formaciones de <i>Quercus rotundifolia</i> , especie propia de ambientes mediterráneos
Melojar o rebolledo	Formaciones de <i>Quercus pyrenaica</i>
Castañar o soutos (gl.)	Formaciones de <i>Castanea sativa</i>
Matorral	Formaciones arbustivas (<i>Ulex europaeus</i> , <i>Erica spp.</i> , <i>Cistus spp</i> ...)
Robledal	Formaciones de <i>Quercus robur</i> y <i>Quercus petraea</i>
Pinar de radiata	Formaciones de <i>Pinus radiata</i>
Pinar albar	Formaciones de <i>Pinus sylvestris</i>
Pinar de pinaster	Formaciones de <i>Pinus pinaster</i>

Por otra parte, del MDE derivado de los datos LiDAR-PNOA también se han extraído otras dos capas de información topográfica para complementar a las ya citadas. El paquete de herramientas “*Spatial Analyst*” del entorno de ArcGIS nos permite generar una capa de pendientes, a través de la herramienta “*Slope*”, y también de orientaciones a través de la herramienta “*Aspect*”. En este caso, estas dos capas serán integradas al análisis de los resultados para la caracterización de la vegetación.

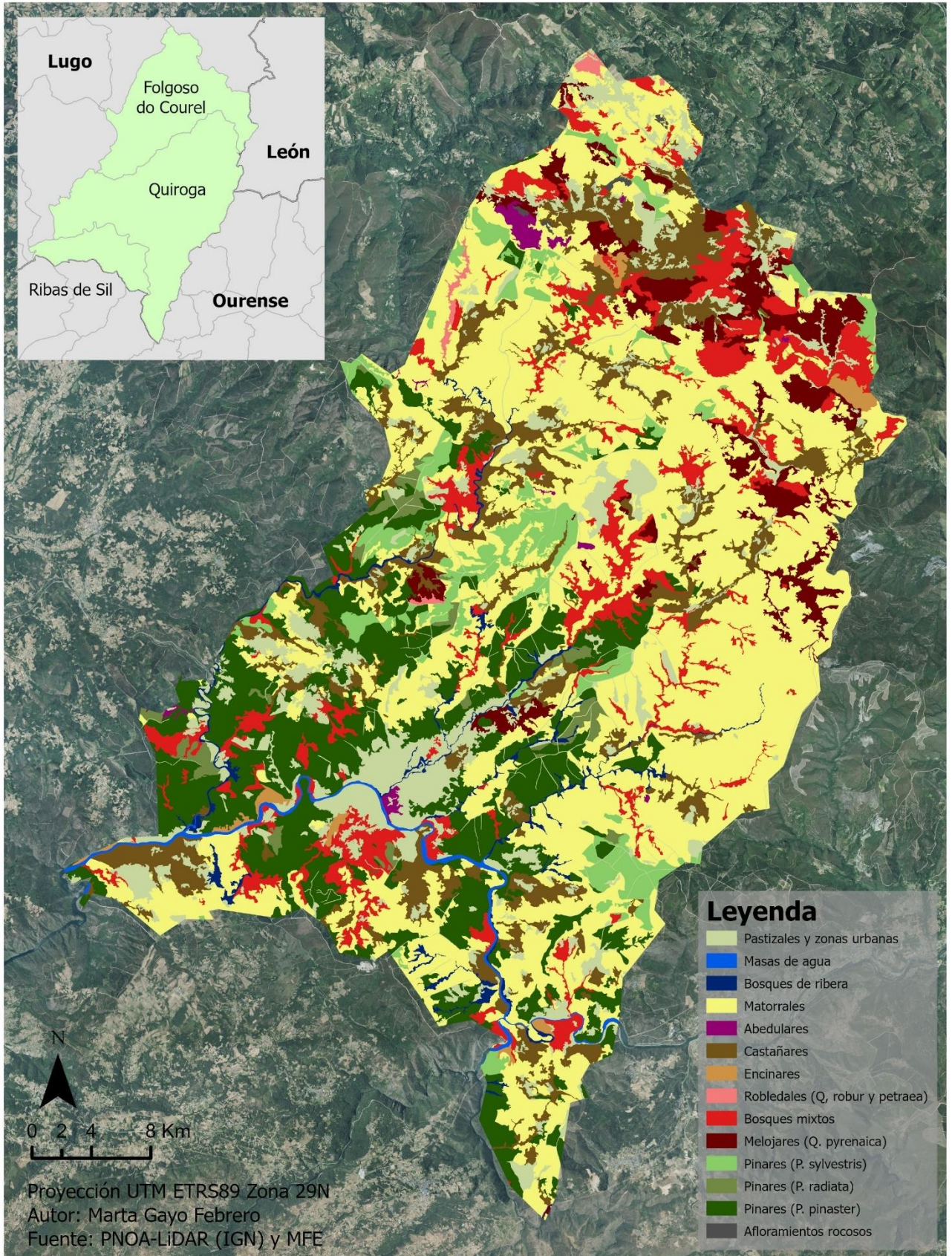
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El enfoque de los resultados sigue dos líneas, en primer lugar, se realizará una aproximación a la situación general de la cubierta vegetal de toda el área del Geoparque, con el objetivo de conseguir su caracterización. En segundo lugar, se acercarán los resultados a nivel local de las parcelas seleccionadas para el estudio. En ambas, se incluyen una serie de gráficos y cartografías que han sido derivados del proceso metodológico descrito en los anteriores apartados, es decir, del tratamiento de la nube de puntos LiDAR y de la información óptica.

En la caracterización estructural de la vegetación se ha empleado la información derivada de los datos LiDAR, concretamente las tres variables seleccionadas: el percentil 99, el porcentaje de cubrimiento y la varianza. El percentil 99 está relacionado con la distribución de la altura de la vegetación, esta nos indica que el 99% de las alturas medias tienen un valor menor o igual a esa cifra, que solo es superada por el 1% de los datos. Esta variable es muy útil para la identificación de la altura máxima de la vegetación, así como, de la evaluación del estado de los bosques, grado de crecimiento, estructura vertical o la edad de las masas, entre otras. Por otra parte, el porcentaje de cubrimiento es el principal indicador para evaluar la densidad del dosel forestal, así pues, conocer la cobertura de los bosques también nos proporciona información sobre el estado y calidad de estos espacios. Finalmente, la varianza que mide la dispersión o variabilidad de los datos, en este caso, de las alturas del dosel; esta métrica nos permite ver la heterogeneidad estructural de la cubierta y, por tanto, también conocer aspectos sobre el crecimiento de las especies o la edad de las masas.

Al mismo tiempo, es importante señalar que el análisis e interpretación de la información se organizó en función a la tipología de cubierta vegetal presente en esta área. La clasificación de las cubiertas vegetales que fue seleccionada responde a la relevancia y presencia de estas dentro del Geoparque, eligiendo así las formaciones vegetales más representativas y predominantes (tabla 7 y cartografía 2). Para realizar esta selección se recurrió a la información espacial disponible: el IFN e IFCG, en combinación con la revisión de bibliografía específica como: Ballesteros et al. (2018), Bellot (1968), Guitián et al. (2013) o Izco et al. (1985).

Principales formaciones vegetales



Cartografía 2. Distribución de las principales coberturas forestales del Geoparque Montañas do Courel.
Fuente: IFN y IFCG

5.1. Caracterización estructural de la vegetación

Antes de profundizar en la interpretación de las métricas, es importante conocer el volumen de ocupación total de cada una de las formaciones forestales que se tuvieron en cuenta para este estudio. A través del gráfico de sectores (figura 6 y tabla 8) podemos ver como casi la mitad de la superficie total del geoparque está cubierta por matorrales (en torno al 40%). Seguido de lejos, los pinares que ocupan una sexta parte de la superficie total, donde destaca principalmente el *Pinus Pinaster*. Finalmente, los bosques mixtos y los castaños logran alcanzar un 10% de ocupación cada uno. Estos últimos muy influenciados por su relevancia social y cultivo tradicional. El porcentaje del resto de las formaciones es bastante reducido, esto se debe, en parte, a la distribución y escala de los polígonos que conforman la capa de cubiertas vegetales con la que se realizó el análisis, donde algunas formaciones, debido a su reducido tamaño podrían estar incluidas en otras clases como la de bosques mixtos.

Tabla 8. Ocupación de cada formación forestal en el Geoparque.

Formación forestal	Km ²	% de ocupación
Abedular	2,7004612	0,4672099
Alcornocal	0,8648023	0,1496204
Bosque mixto	52,426132	9,0703057
Bosque de ribera	7,7238155	1,3363062
Castaño	60,086026	10,395553
Encinar	3,6424584	0,6301859
Molojar	27,597876	4,7747404
Matorral	235,74038	40,785715
Pino pinaster	90,280285	15,619496
Pino radiata	6,8829793	1,1908322
Robledal	1,6266539	0,2814293
Pino sylvestris	27,386875	4,7382349

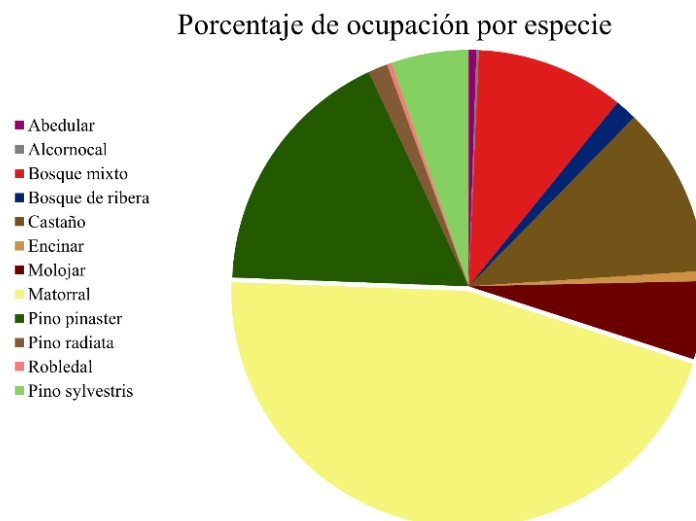


Figura 6. Gráfico de sectores, porcentaje de ocupación de cada formación forestal sobre la superficie total del Geoparque Montañas do Courel. Fuente: IFN, IFGC y LiDAR-PNOA.

La distribución del percentil 99 en la altura de la vegetación es una de las principales métricas que nos ayudan a definir e identificar las características de la cubierta. Para poder realizar este análisis se acercan dos recursos: una cartografía con la distribución espacial de las alturas del dosel (cartografía 3)

y una gráfica de tipo boxplot o de bigotes ordenada por clases de formación forestal (figura 7). Como se puede observar en el mapa de la distribución del P99 (cartografía 3), el extremo suroccidental, ocupado principalmente por masas de pinares (*Pinus pinaster*), junto con la franja septentrional, de formaciones de bosques mixtos, castañares y melojares, concentra los máximos de altura de las formaciones vegetales. En la zona central también se pueden distinguir ligeros surcos en tonos amarillos que nos indica la presencia de un dosel de una altura considerable, de en torno a 20m. Estos corresponden a los bosques de ribera que comparten su forma alargada y serpenteante con la de los surcos fluviales que acompañan y que contrastan fuertemente con su entorno, superficies representadas en verdes intensos con vegetación muy baja, áreas ocupadas principalmente por brezales y matorrales.

La información representada en el gráfico (figura 7) apoya la distribución espacial de las alturas, recogida en la cartografía 3. En concordancia con la interpretación anterior, vuelven a destacar las formaciones de coníferas, y más concretamente las especies de *Pinus radiata* y *P. pinaster*, junto con los bosques mixtos, de ribera y castañares como las formaciones de mayor altura y con rangos más amplios de toda la muestra. Las formaciones restantes (encinares, alcornocales, melojares...) comparten una distribución de las alturas bastante similar, de entorno a los 10m o inferiores y con valores atípicos inferiores a los 25m. La única excepción son los matorrales con un rango de alturas muy inferior a los anteriores, en torno a 2-5m.

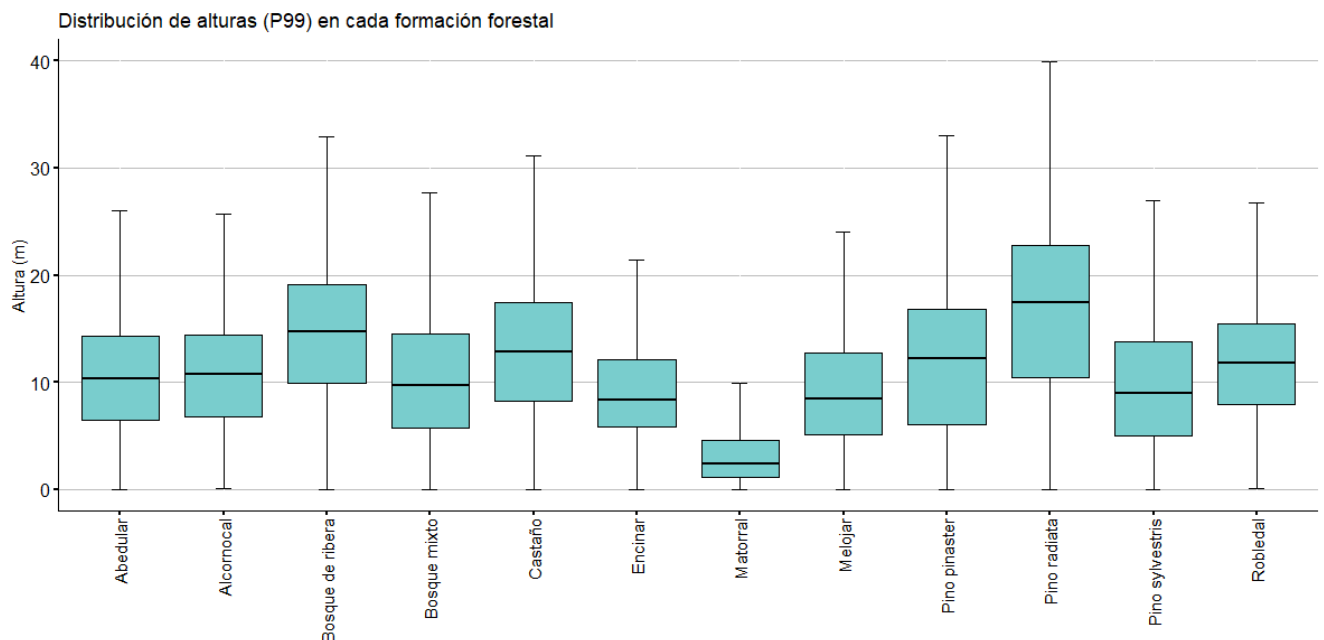


Figura 7. Boxplot de la distribución del P99 por formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA

Continuando con la caracterización de la vegetación, otra métrica LiDAR de especial interés para el análisis de la estructura forestal es el porcentaje de cubrimiento (fig. 8). En este caso, la gran mayoría de las formaciones forestales presentan un grado de cubrimiento elevado, aunque con rangos también amplios. Dentro de esta variabilidad podemos apreciar como los porcentajes mínimos de cubrimiento oscilan entre el 40% y el 50%, a excepción de las especies de pinos que presentan mayores rangos de variabilidad alcanzando mínimos inferiores al 25%. Entre los máximos porcentajes de cobertura alcanzados rondan para todas las formaciones entre el 75% y el 85%. Vuelven a ser las especies arbustivas, como los brezales y matorrales, las disidentes, caracterizándose por coberturas muy inferiores al resto de las formaciones, en donde el máximo rango de variabilidad en la cobertura alcanza en torno al 30%.

Si analizamos su distribución espacial (cartografía 4), podemos apreciar importantes similitudes con la distribución del P99 de altura. Las áreas que mayor cubrimiento presentan son las mismas que las

que mayores alturas de vegetación alcanzan. Aunque, en este caso, las formaciones de frondosas superan ligeramente en cubrimiento a las coníferas. Los matorrales, zonas de cultivos y prados se representan en tonos muy claros, lo que nos indica un escaso cubrimiento.

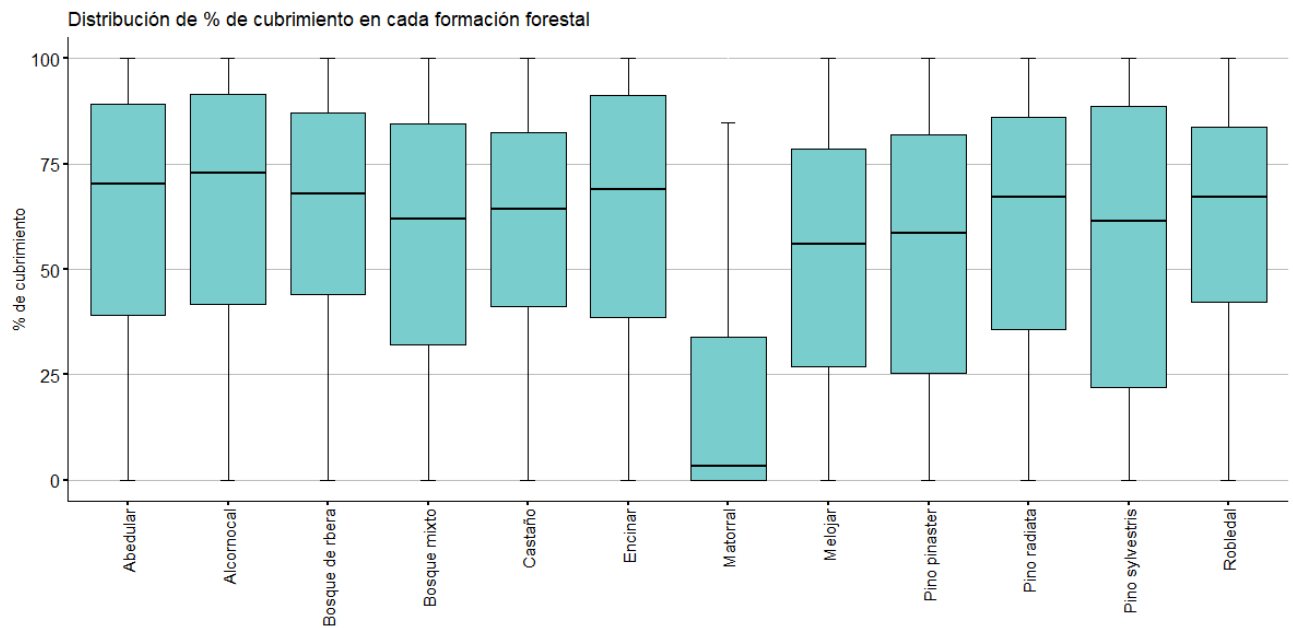


Figura 8. Boxplot del porcentaje de cubrimiento por formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA.

Las variables topográficas son uno de los factores a tener en cuenta en el desarrollo de la vegetación. Por este motivo, se optó por introducir algunas de estas variables como la pendiente o la orientación en combinación con las métricas estructurales derivadas del LiDAR. Como podemos ver en el gráfico (figura 9) las formaciones vegetales en esta área tienden a desarrollarse en pendientes medias con rangos poco variables de entre 20° a 30°. Esto nos muestra una distribución de las pendientes más o menos equilibrada y simétrica entre todas las especies, donde las cajas comparten valores y rangos muy parecidos en su desarrollo. Sorprende en esta zona como son los bosques de ribera los que mayor variabilidad presentan adaptándose mejor a pendientes más variables, también muy relacionado con el carácter encajonado que la red fluvial presenta en esta área. Los robledales, en cambio, ocupan pendientes más concretas, presentan un menor grado de variabilidad, y ligeramente superiores a los 30°, lo que muestra una mejor adaptación a áreas de pendientes más pronunciadas.

Si además ponemos en relación los datos de altura y cubrimiento con alguno de los coeficientes TCT calculados, como el verdor o la humedad (cartografía 8), podremos ver también el estado en el que se encuentran cada formación y su vigor vegetal. Los valores de mayor vigor vegetal siguen coincidiendo con los espacios donde encontrábamos mayores alturas de la vegetación. Las especies frondosas, en especial los bosques mixtos y de ribera, que tienen una mayor densidad de vegetación también son los que concentran mayores niveles de verdor. En esta misma línea los castaños, melojares y robledales. Por otra banda, como es esperar los valores de verdor más moderados y bajos corresponden a las áreas ocupadas por coníferas, independientemente de la especie, y a los matorrales, que a su vez también son los espacios que reflejan valores menores de humedad, puesto que estas especies están también mejor adaptadas a ambientes más secos.

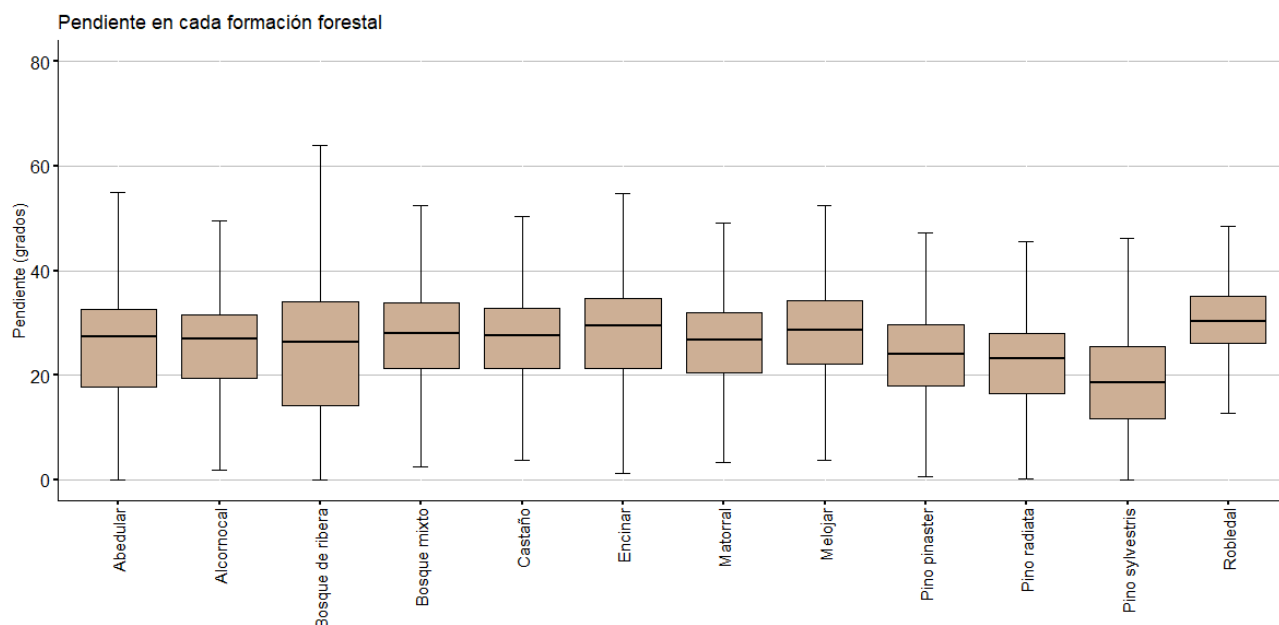


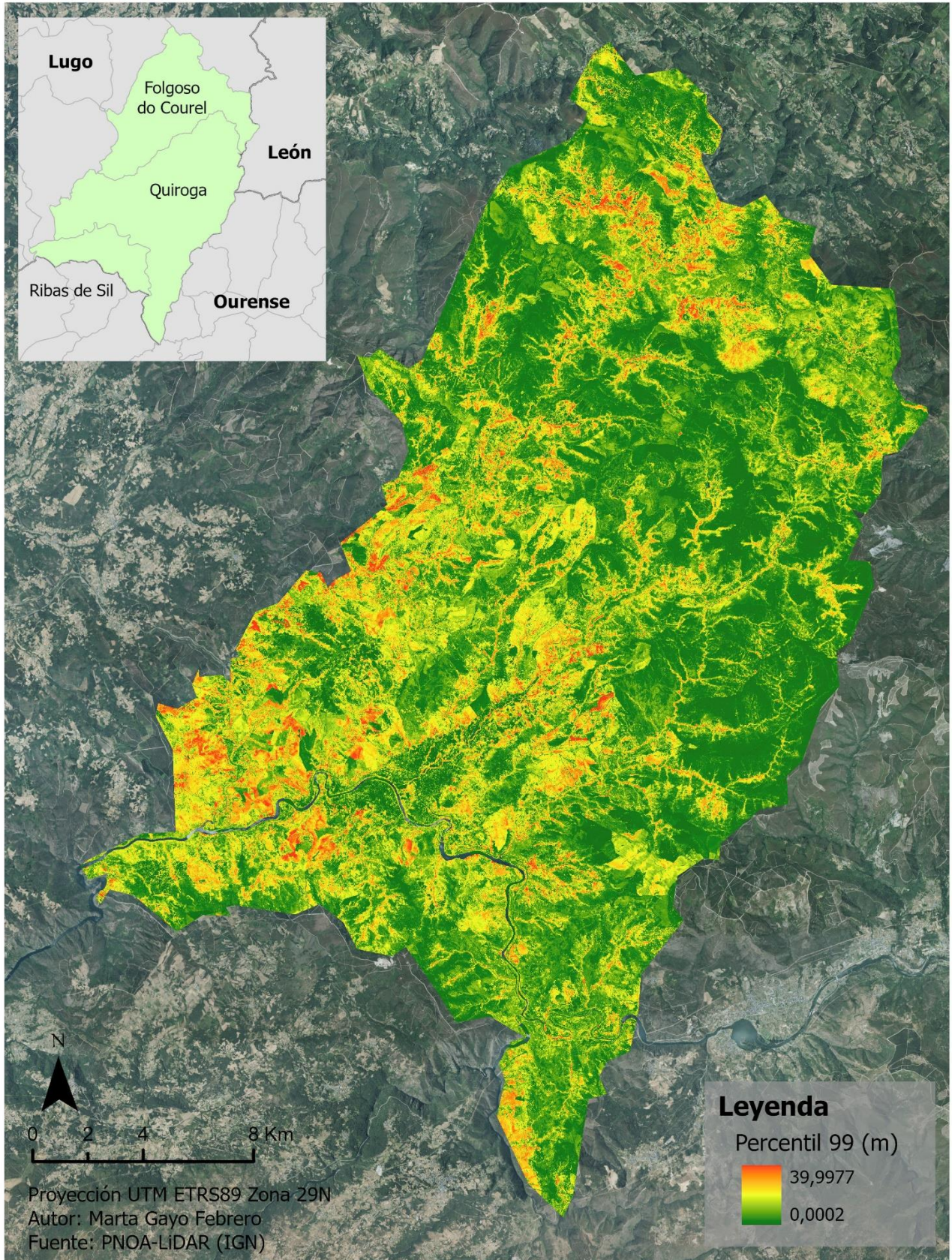
Figura 9. Boxplot de la distribución de la pendiente en cada formación forestal, elaborado con RStudio. Fuente: LiDAR-PNOA.

El análisis de detalle de las parcelas escogidas nos permite realizar un análisis más detallado del estado actual y características de la cubierta forestal de Geoparque. Las estadísticas y variables que se tuvieron en cuenta para estos espacios son las mismas que para el análisis y comparación de los resultados a escala regional, pero con una mayor precisión y actualidad de los datos. En este sentido, cada una de las parcelas pretende servir como representación de las características de las formaciones forestales más habituales de este espacio.

Los datos extraídos a nivel regional concuerdan con la información extraída de las parcelas. En este sentido los resultados son bastante predecibles y coherentes. En general, volvemos a ver como las masas de frondosas y bosques mixtos alcanzan los resultados de cubrimiento más elevados, es decir, se trata de bosques muy densos y maduros. En este sentido los mejores ejemplos son el Souto de Saceda (cartografía 14) y la Devesa de Rogueira (cartografía 13), en esta última las alturas máximas llegan a alcanzar casi los 39m. En el caso concreto del Souto do Vilar, la cobertura es más variable, mientras que la zona norte concentra portes más densos y altos, la zona sur cuenta con una menor cobertura y altura del dosel. Esto se debe a que una parte de la zona sobrevolada había sufrido recientemente un incendio, en 2021, afectando a la estructura y salud de la masa.

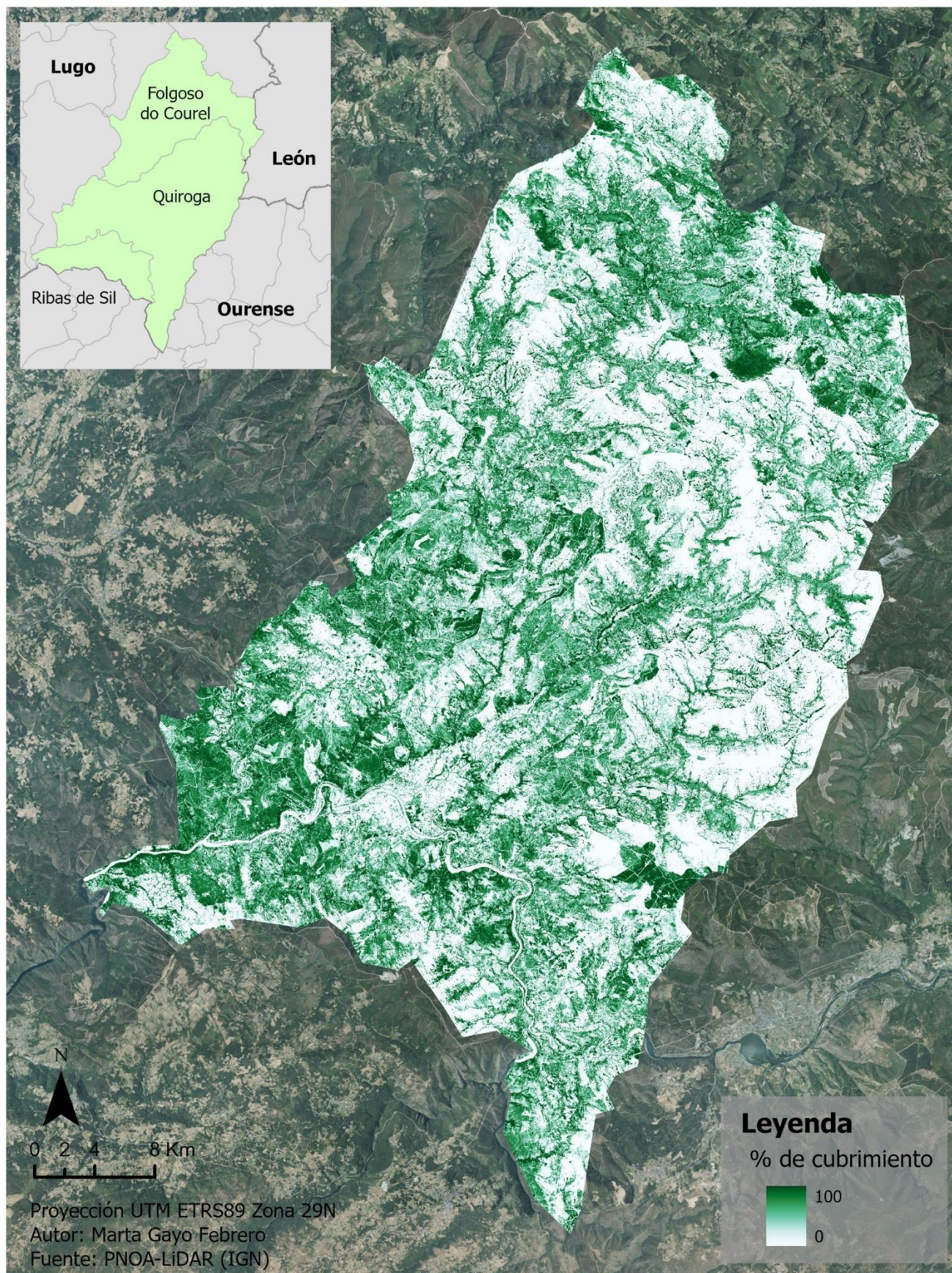
Las masas de encinares y hayedos sobrevoladas son las parcelas que corresponden a Vilasivil (cartografía 12), Val das Mouras (Cartografía 11) y a Cruzul (cartografía 15), se trata de zonas que comparten cubierta forestal, pero de características muy variadas lo que dificulta extraer una caracterización general. Por una parte, la banda caliza de Vilasivil que es un afloramiento rocoso en el que se desarrollan algunas encinas aisladas, por lo que el resultado es una formación de baja densidad y de alturas medias, en parte, determinado por las condiciones de sustrato sobre las que se desarrollan. En el caso del Acíñeiral de Cruzul tenemos un ejemplo de una formación forestal compuesta principalmente por encinas sobre un suelo calcáreo en combinación con especies más propias del clima atlántico, esta combinación queda perfectamente diferenciada en el mapa (cartografía 15), donde a un margen tenemos formaciones de menor porte frente a las del otro extremo altura superiores (fig. 10). Aunque parezca una gran diferencia estructural se trata de una formación madura que presenta una densidad muy elevada. Finalmente, la parcela correspondiente a Val das Mouras (cartografía 11), se trata de un caso parecido al de Cruzul, pero sin esa combinación con especies vegetales atlánticas, en su lugar, los espacios de menor porte y densidad corresponden a pequeñas áreas de matorrales.

Percentil 99 (m)



Cartografía 3. Mapa del P99 de la altura de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura)

Porcentaje de cubrimiento



Cartografía 4. Mapa del porcentaje de cubrimiento de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel.
Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura).

El Río Ferreiriño (cartografía 9), la parcela sobrevolada de mayor extensión, constituye un perfecto ejemplo de la variedad de ambientes que se combinan en un espacio tan reducido, situación extrapolable a la totalidad del Geoparque. Analizando la cartografía forestal derivada para esta zona es posible distinguir el curso fluvial gracias a disposición del bosque de ribera, que se extiende en forma de manchas de vegetación, mucho más exuberantes, altas y de mayor densidad que las de su entorno. A continuación de estas se distinguen otras masas forestales de menor porte que corresponden a bosques mixtos maduros, también de una elevada densidad. Finalmente, según nos alejamos, las áreas más exteriores están pobladas por una vegetación más escasa y pobre. Estas últimas corresponden a las formaciones arbustivas de menor porte cuya expansión está, en parte, determinada por la pendiente y desnivel del área. Como resultado podemos ver una transición de ambientes muy diferenciadas, donde el desarrollo de la vegetación depende, en gran medida, de las particularidades y características topográficas sobre las que se asienta.

A través de este recorrido por las principales formaciones forestales que cubren O Courel podemos confirmar que, en la tarea de identificación y caracterización de los bosques maduros, el análisis estructural (altura y cubrimiento) en combinación con los índices de verdor es fundamental. En general, después de la interpretación de la información generada podemos deducir que estas áreas comparten ciertos rasgos que las diferencian de las demás, se trata de masas de mayor densidad que, al mismo tiempo, presentan índices de verdor elevado. Esto nos indica que los bosques maduros presentan un alto vigor vegetal, lo que es sinónimo de una buena salud vegetal y un alto nivel de biomasa.



Figura 10. Aciñeiral de Cruzul (27/07/2023)

6. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Fin de Máster se han aplicado diferentes metodologías en el tratamiento de información espacial, adquiridas en el Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: sistemas de información geográfica y teledetección. A través de varios entornos SIG se ha ido derivando información espacial sobre la estructura vegetal de la cubierta vegetal del área de estudio, con el objetivo de caracterizar los diferentes ambientes forestales presentes en la misma.

Los resultados obtenidos han facilitado alcanzar una comprensión más detallada de la estructura y distribución de las diferentes coberturas del Geoparque, que era uno de los objetivos propuestos. Este conocimiento no solo enriquece el entendimiento ambiental de esta área, sino que también tiene aplicaciones prácticas significativas. Por ejemplo, la información forestal derivada puede ser utilizada para la gestión de los recursos forestales. Por otra parte, este tipo de información puede ser también de utilidad en aspectos más relacionados con la planificación territorial. En general, el conocimiento de las características específicas de las cubiertas vegetales favorece una gestión planificada, mejor integrada y adaptada tanto a la realidad como a las necesidades del territorio.

No obstante, la identificación y caracterización de los ambientes forestales, en las parcelas de estudio, ha resultado un proceso bastante complejo. En parte esto se debe a la gran variedad y convivencia de ambientes en espacios tan reducidos lo que lleva obtener una gran variedad de datos. De la misma forma, se han analizado coberturas forestales, pertenecientes a la misma clase y especie, que son muy diferentes entre ellas, como es el caso de los encinares. Esto nos indica el peso tan importante que ejercen otros condicionante como el tipo de sustrato o la topografía en la estructura y desarrollo de la vegetación, aspectos que serían de interés trabajar a mayor profundidad en futuros estudios.

En conclusión, este trabajo puede servir como un punto de partida para la caracterización vegetal de un área de gran valor geológico, paisajístico, patrimonial y ecológico, como es el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel. Este proyecto pretende constituir una primera aproximación al análisis y caracterización de diferentes cubiertas vegetales, trabajando desde perspectiva general que sirva para obtener una un estudio inicial e introductorio sobre el tema. Al mismo tiempo, este trabajo puede abrir la posibilidad a profundizar y desarrollar nuevas líneas de investigación relacionadas con la vegetación y que apliquen enfoques más amplios y complejos. Estas futuras investigaciones podrían incorporar el análisis de otras variables, explorar la integración y combinación de otras fuentes de datos o profundizar en la modelización de la cobertura vegetal del Geoparque, todas ellas en contribución a alcanzar un entendimiento más completo e integrador del área.

7. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, me han ayudado a lo largo de este proceso. A mi tutor, Juan de la Riva Fernández, por su constante dedicación, supervisión y paciencia que han sido fundamentales durante todo el trabajo.

En especial, a Horacio García por la confianza depositada desde el primer momento, su disposición, ayuda e implicación en el proyecto.

Agradecer también a Martín Alemparte Vidal y a todos los miembros del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel por su hospitalidad y colaboración, vuestra ayuda ha sido fundamental para elaborar y sacar adelante este proyecto. Asimismo, extendo mi gratitud al investigador Darío Domingo Ruiz, quien ha dedicado su tiempo y conocimientos para ayudarme en el desarrollo de los trabajos de campo.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y amigos todo su apoyo, comprensión y compañía brindada a lo largo de los años y, especialmente, durante esta etapa.

Muchas gracias a todos.

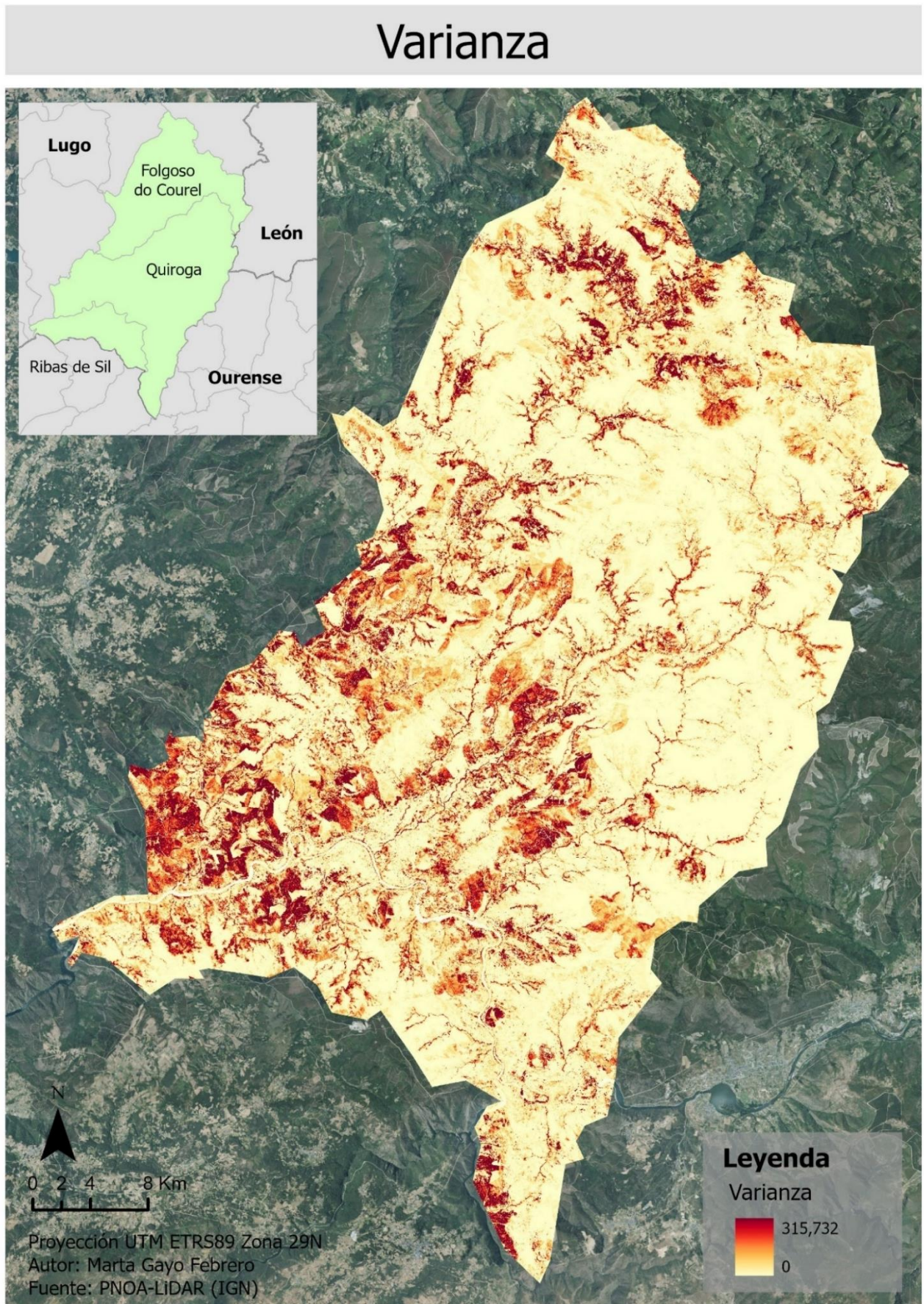
8. BIBLIOGRAFÍA

- Ballesteros, D., Adrados, L., Vila, R., Álvarez, I., Barros, X. C., et al. (2018). *Las Montañas do Courel una geología muy humana*. Asociación de Montañas do Courel. Galipress: A Coruña.
- Baltsavias, E.P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 83-94.
- Bellot, F. (1968). *La vegetación de Galicia*. Anales del Instituto A. J. Cavanilles XXIV.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona: Ariel.
- ESA (2024). *Sentinel-2, S2 Mission*. Disponible en: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission> [último acceso, 26 de agosto de 2024].
- González Ferreiro, E., Barreiro Fernández, L. y Miranda, D. (2013). Clasificación digital de zonas forestales usando datos LiDAR, ortofoto y análisis orientado a objetos. *Ambienta*, 105, 66-75.
- González Ferreiro, E., Dieguez-Aranda, U. and Miranda, D. (2012). Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LiDAR pulse densities. *Forestry* 85, 281–292.
- Guitián, M. A., Romero, R., Ral, C. y Ferreiro, J. (2013). Descripción, cartografía e valor de conservación dos bosques da Devesa da Rogueira (Serra do Courel, NW Península Ibérica). *IBADER, Recursos rurais*, 9, 5-34.
- Ibarra Benlloch, P. Yetano Ruiz, L. M. (1989). El estudio de la vegetación en Geografía. *Geographica*, 23, 165-174.
- Izco, J. Amigo, J. & Guitián, J. (1985). Botánica. En J. Guitián Ojea (Dir.), *Estudio del medio natural de las montañas gallegas. I. O Caurel*. Monografías de la Universidad de Santiago de Compostela, 73-139.
- Koch, B. (2013). La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN. *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales (FAO)*, 1-18.
- Kuenzer, C., Ottinger, M., Wegmann, M., Guo, H., Wang, C., Zhang, J., Dech, S. y Wikelski, M. (2014). Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks. *International Journal of Remote Sensing*, 35(18), 6599-6647.
- Martínez Cortizas, A. y Pérez Alberti, A. (1999). *Atlas climático de Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
- McGaughey, R. J. (2023). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. Seattle: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Montealegre, A. L. (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* (Tesis doctoral). Universidad de Zaragoza.
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Riva, J. D., García-Martín, A. y Escribano, F. (2016). Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest. *Forestry*, 89, 373-382.
- Pascual Castaño, C. (2006). *Análisis de la estructura forestal mediante teledetección: LiDAR (Light Detection and Ranging) e imágenes de satélite*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- Pérez Alberti, A. (1982). Climatología. En A. Pérez Alberti (Dir.), *Xeografía de Galicia. Tomo I: O Medio*. Santiago de Compostela: Sálvora.

- Pérez Alberti, A. (2001). A paisaxe como sistema: o exemplo de Galicia. En A. Pérez Alberti (Dir.) *As Paisaxes de Galicia. O feito diferencial galego*. Santiago de Compostela: Museo do pogo galego. pp. 57-106.
- Pérez Alberti, A. (2019). *Geomorfología a de las Montañas de O Courel*. Grupo de Desenvolvemento Rural Ribeira Sacra-Courel: A Coruña.
- PNOA (2024). *Presentación PNOA-LiDAR*. Disponible en: <https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-li-dar/presentacion> [último acceso, 24 de agosto de 2024].
- Sánchez, M. A., Fernández, A. A. y Illera, P. (1999). Los sistemas de información geográfica en la gestión forestal. En F. Castaño Fernández y A. Quintanilla Rodenas (Ed.), *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, 96-99.
- Shi, T. y Xu, H. (2019). Derivation of Tasseled Cap Transformation Coefficients for Sentinel-2 MSI At-Sensor Reflectance Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12, 4038-4048.
- Vosselman, G. y Maas, H. G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing.
- Mostafiz, C. y Chang, N. B. (2018). Tasseled cap transformation for assessing hurricane landfall impact on a coastal watershed, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 736-745.

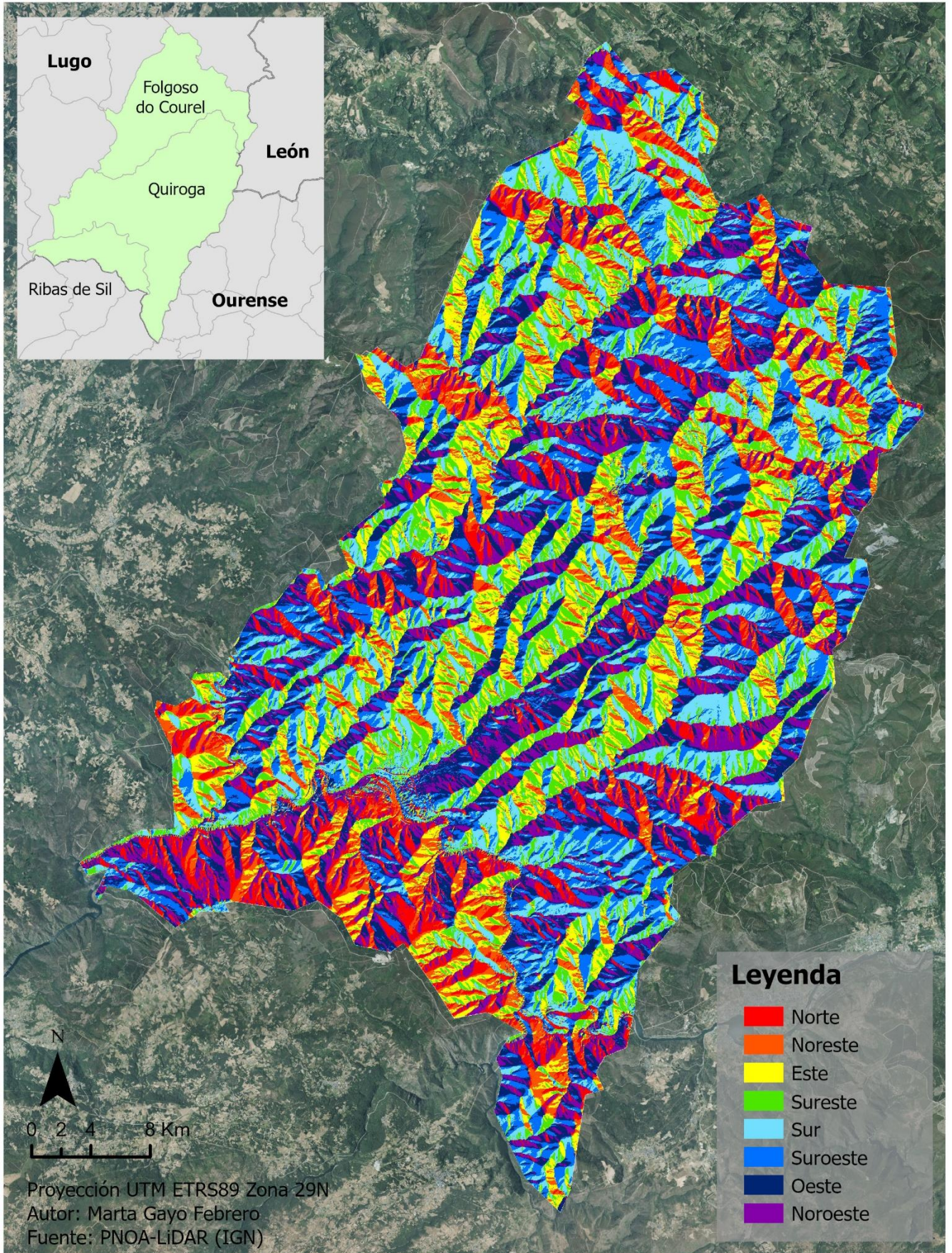
9. ANEXOS

9.1. Otros productos cartográficos generados.



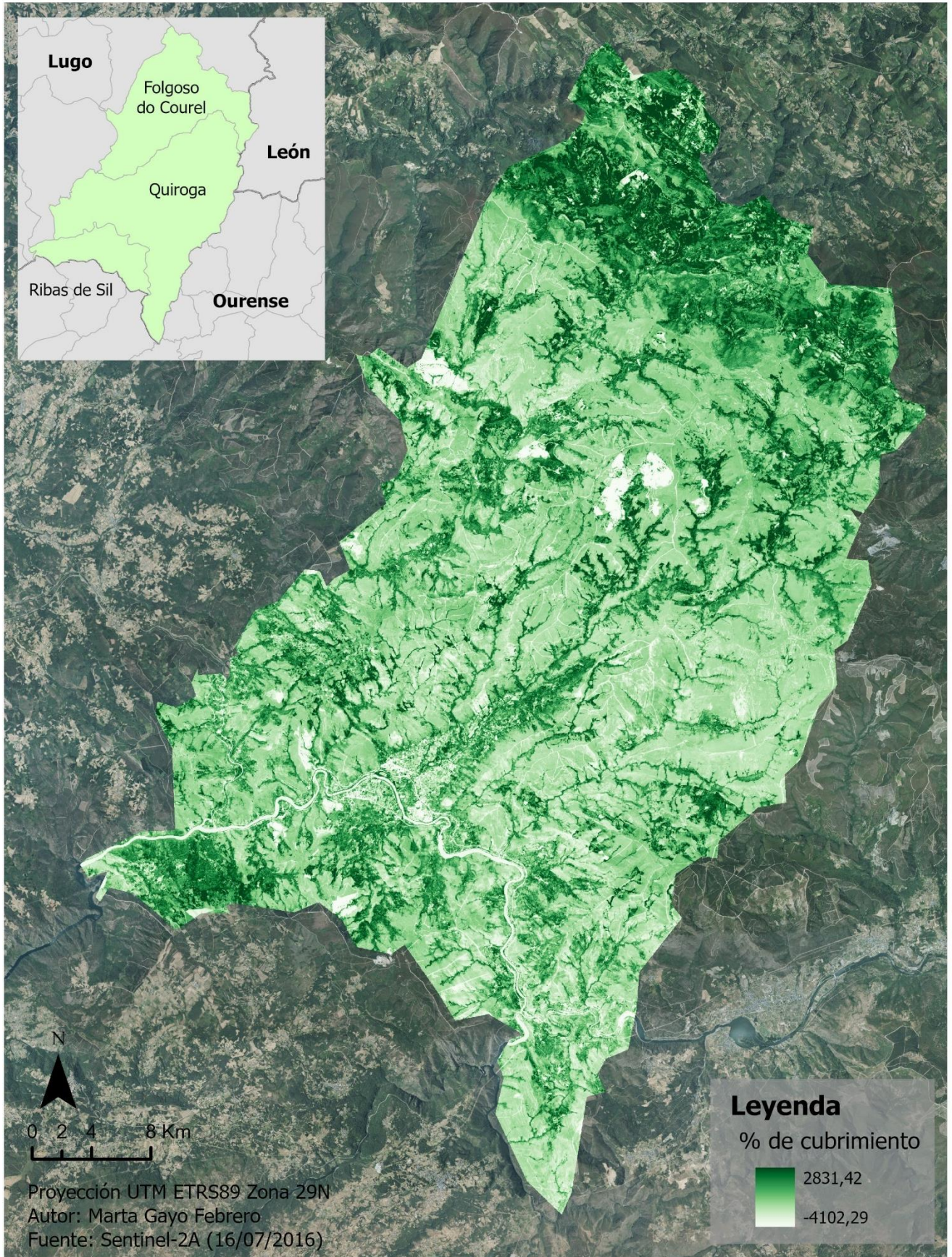
Cartografía 5. Mapa de la varianza en la altura de la vegetación en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura).

Orientaciones



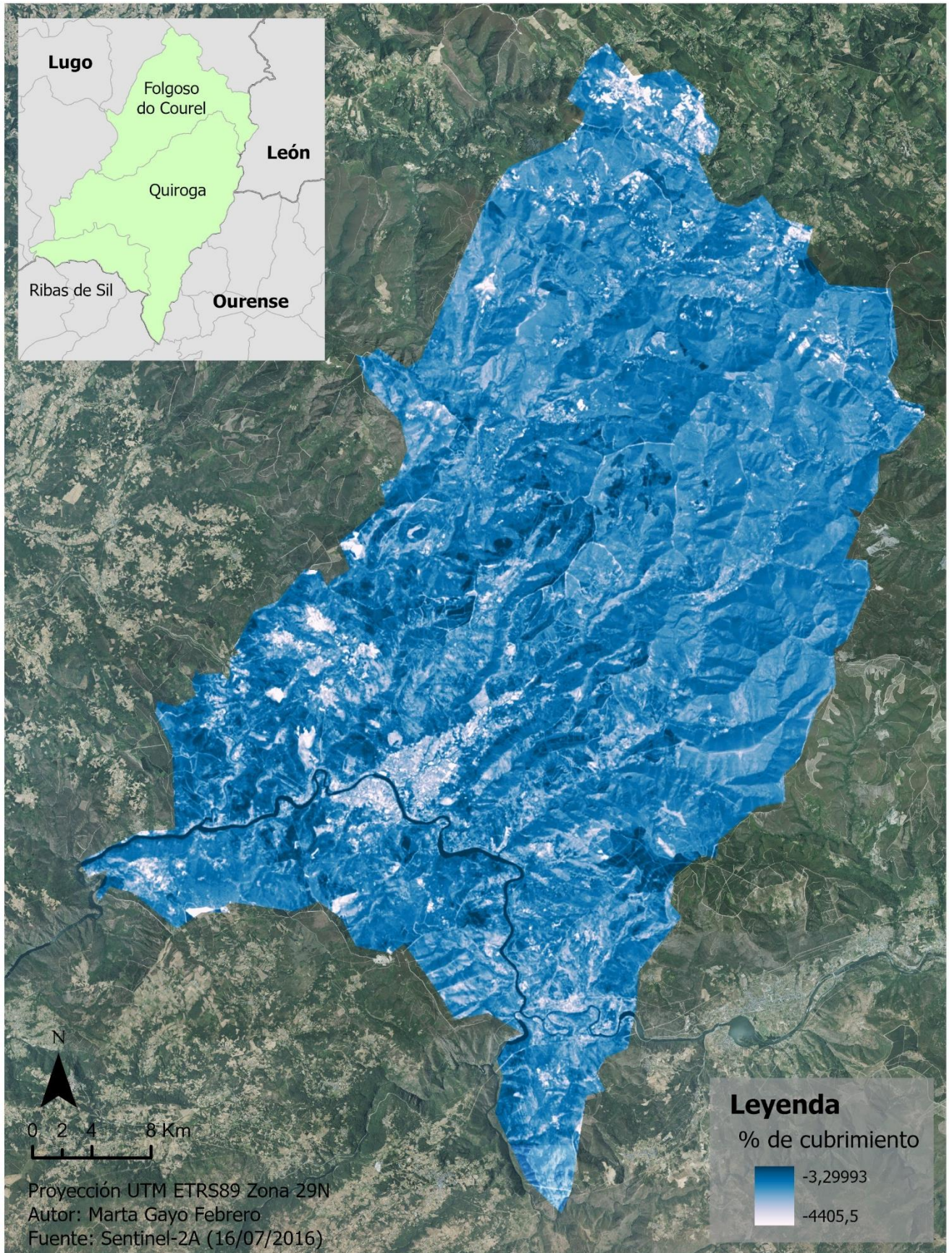
Cartografía 6. Mapa de las orientaciones en el Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA (2ª cobertura).

Verdor (TCT)



Cartografía 7. Verdor (TCT) Geoparque Montañas do Courel (2016). Fuente: Sentinel-2

Humedad (TCT)



Cartografía 8. Humedad (TCT) Geoparque Montañas do Courel (2016). Fuente: Sentinel-2

9.2. Gráficos derivados de la información óptica

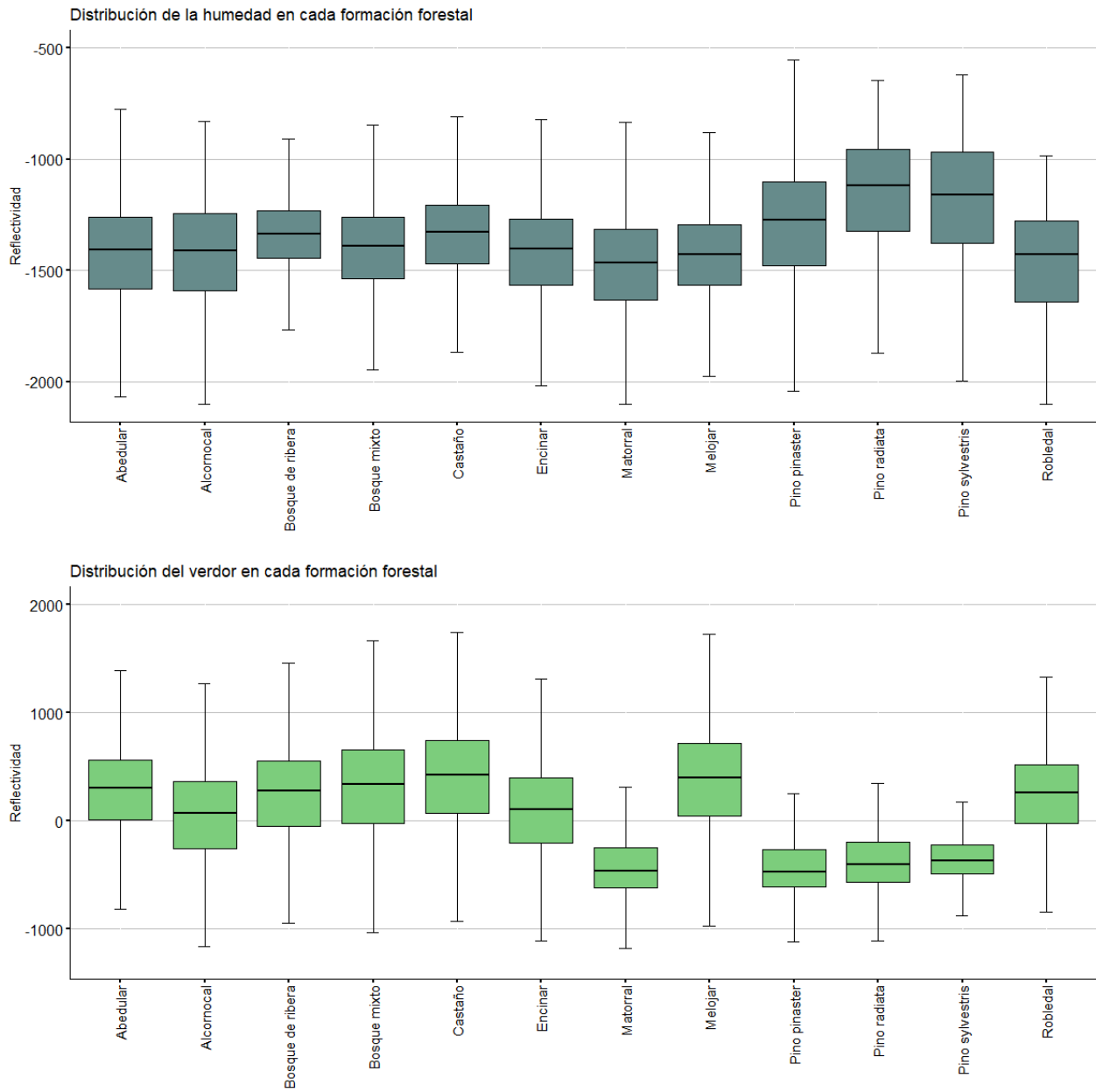
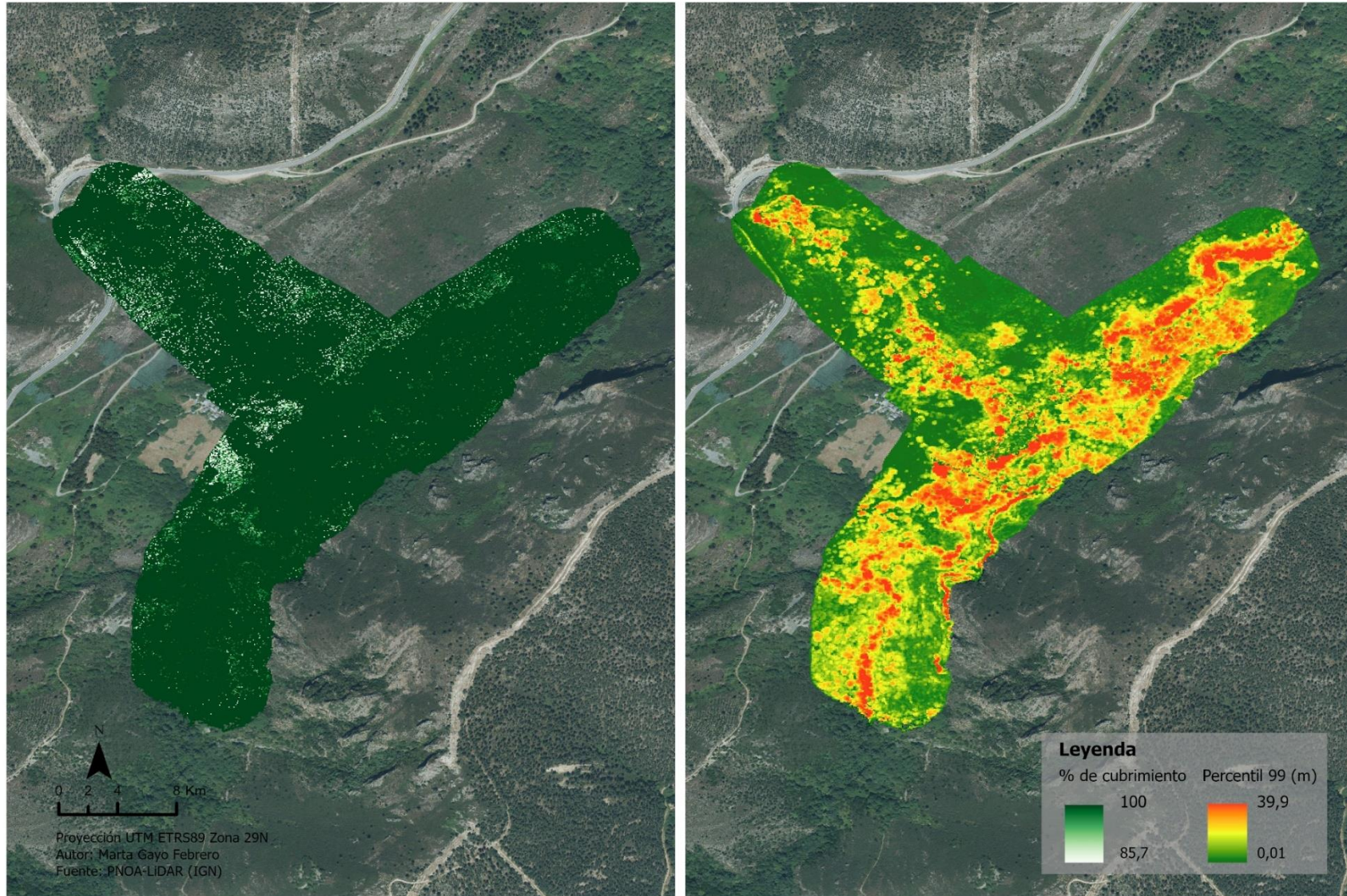


Figura 2. Boxplot de la distribución por especies de los valores de reflectividad del verdor y humedad derivado de TCT.

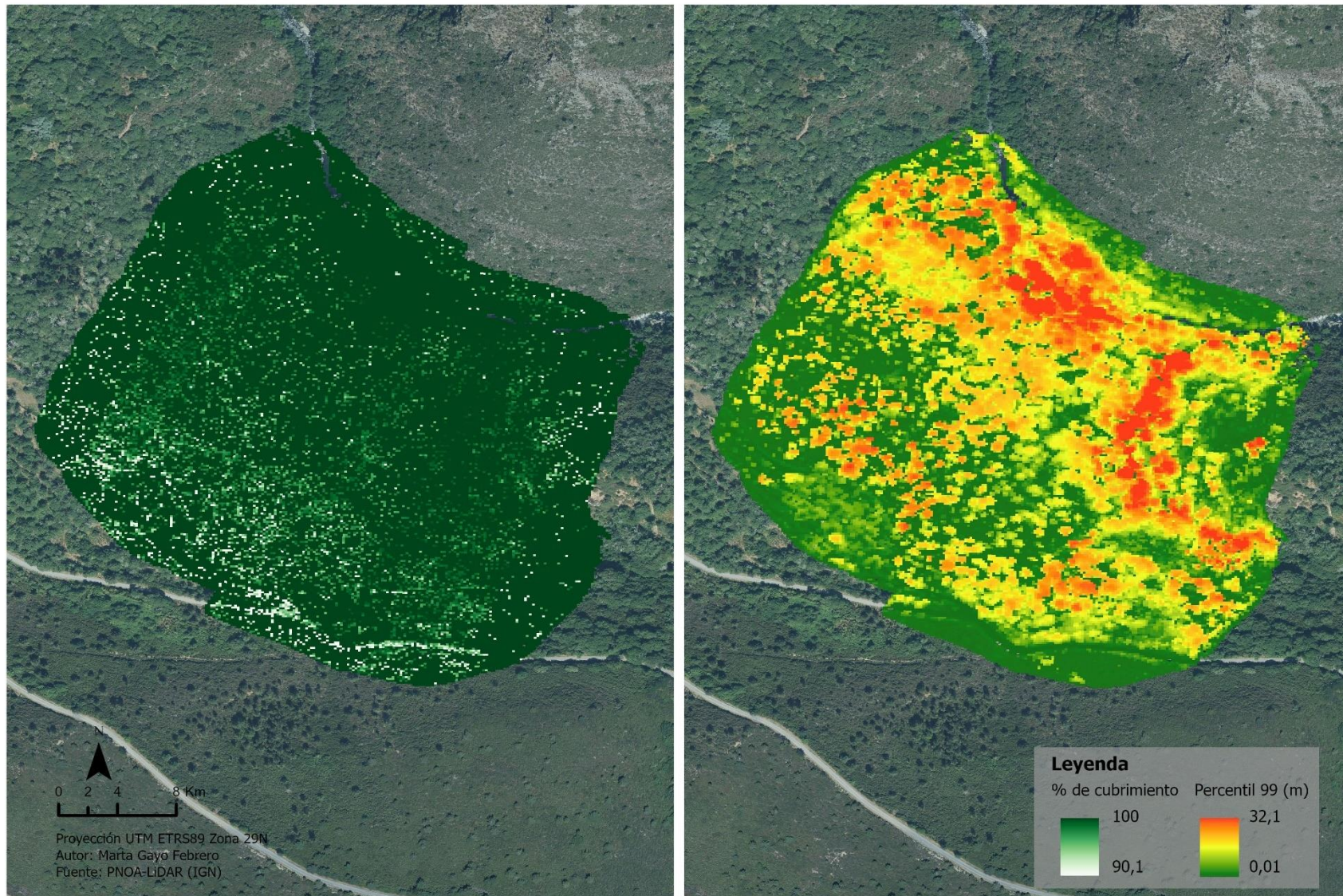
9.3. Cartografías de las parcelas de estudio

Río Ferreiriño



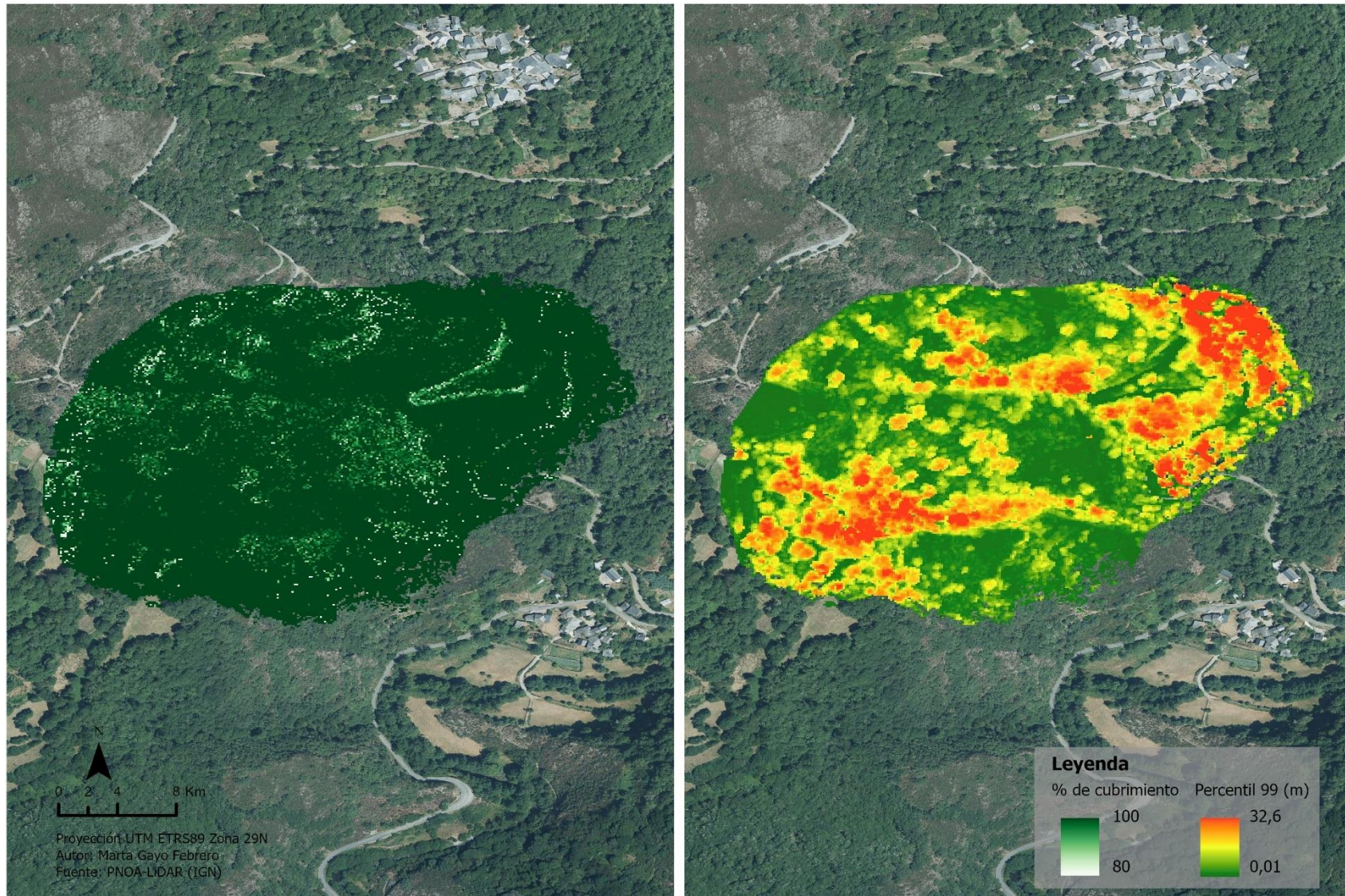
Cartografía 9. P99 y porcentaje de cubrimiento- Río Ferreiriño Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Souto do Vilar



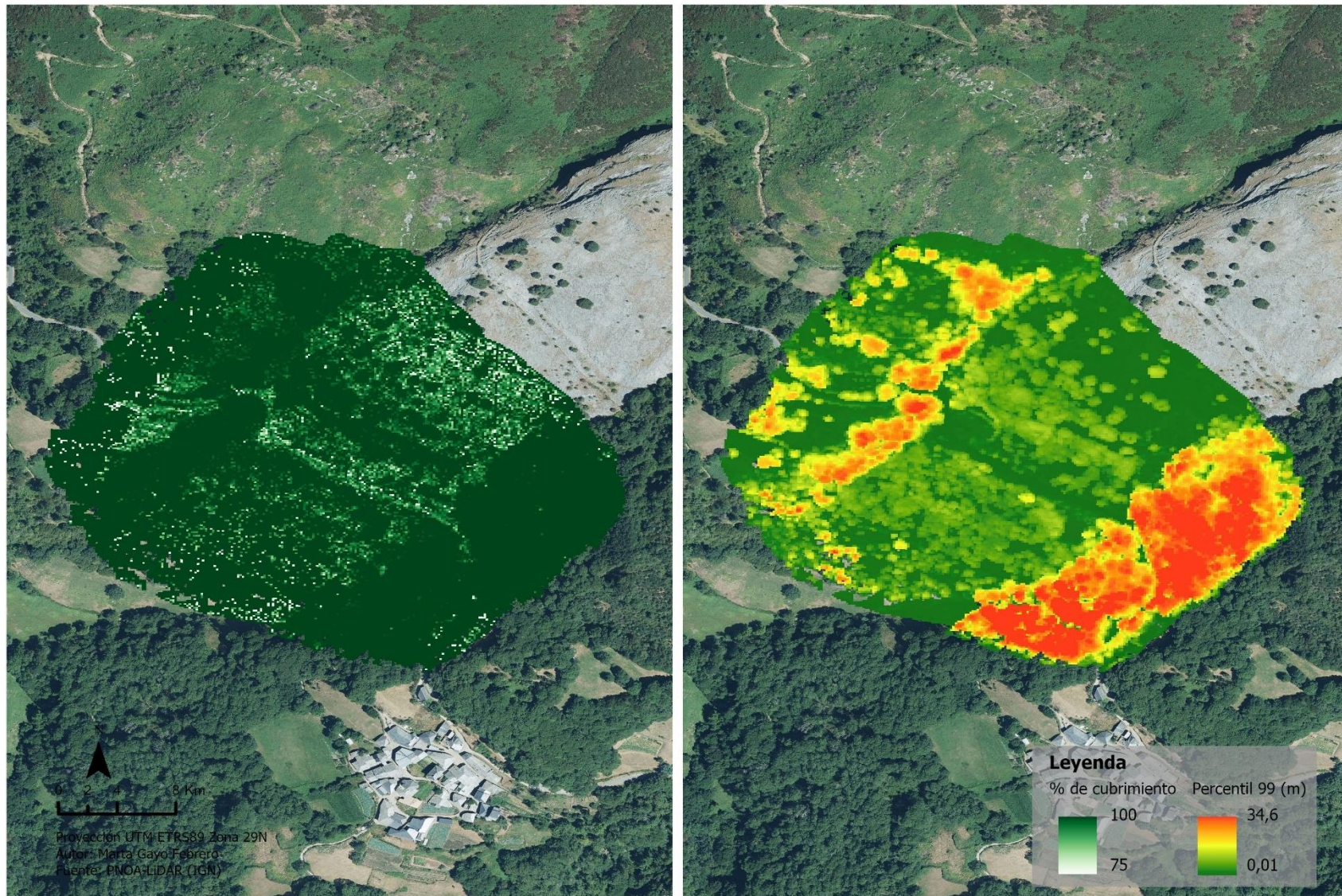
Cartografía 10. P99 y porcentaje de cubrimiento- Souto do Vilar Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Val das Mouras



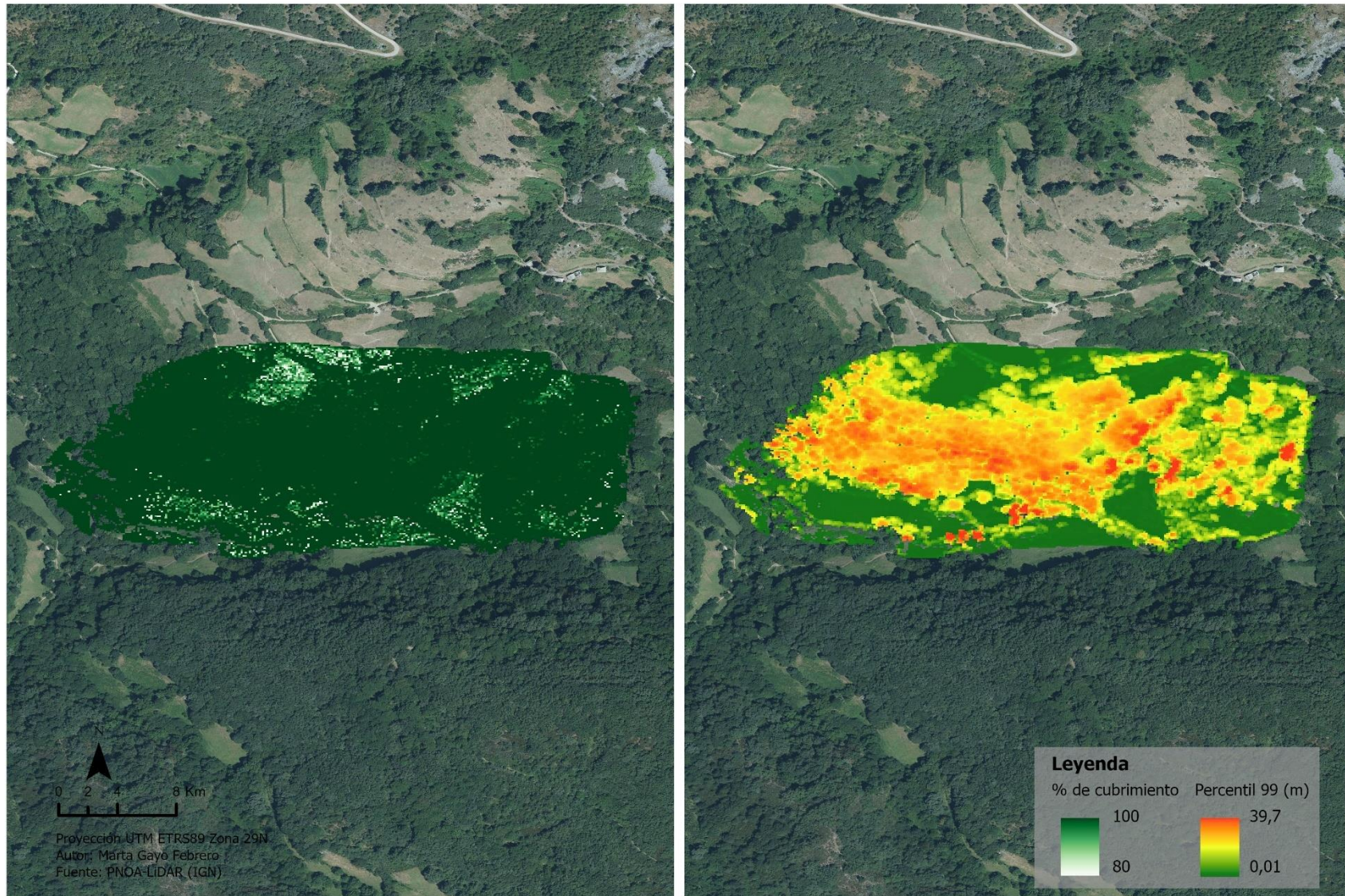
Cartografía 11. P99 y porcentaje de cubrimiento- Val das Mouras Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Vilasivil



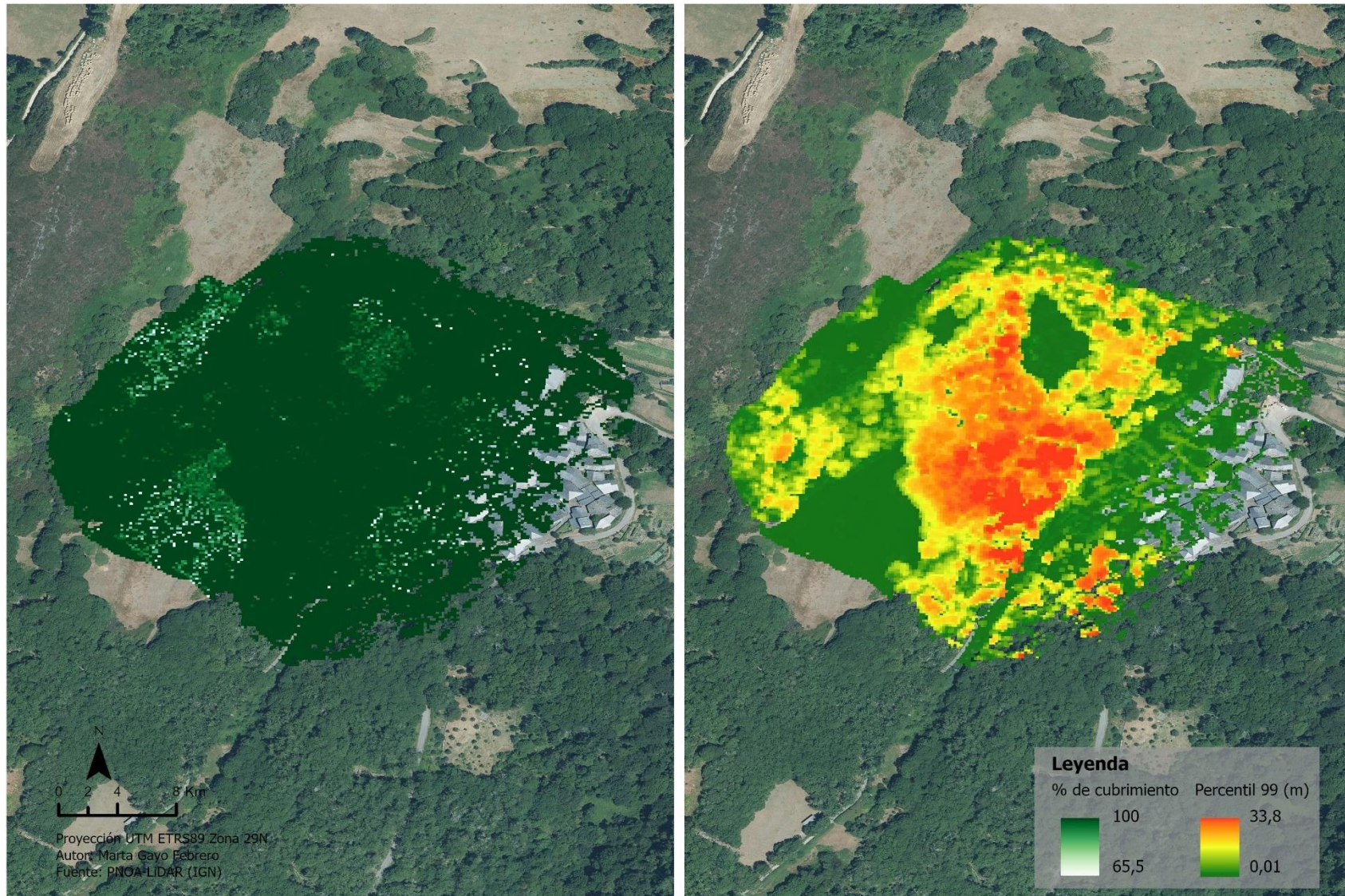
Cartografía 12. P99 y porcentaje de cubrimiento- Banda caliza de Vilasivil Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Devesa de Rogueira



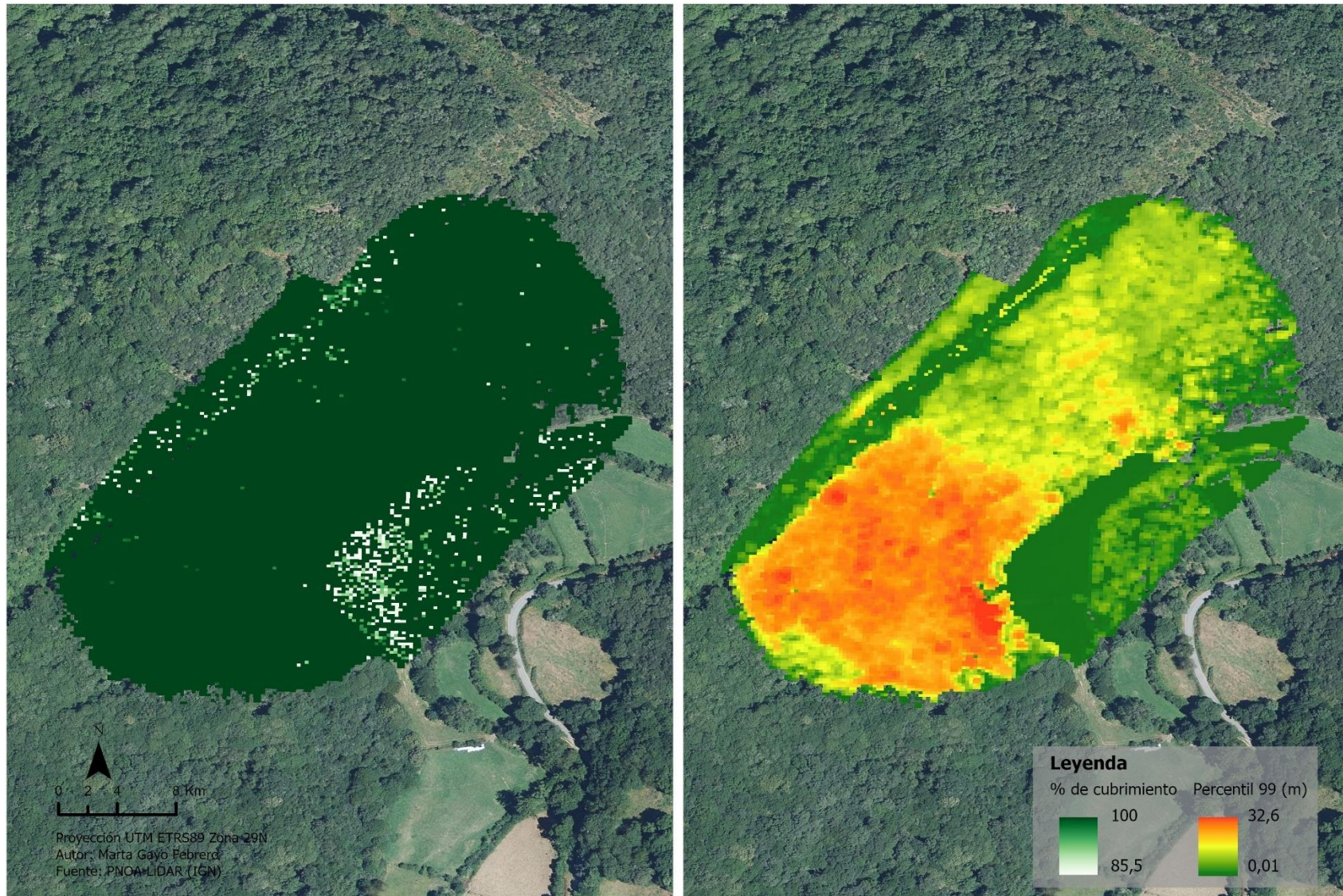
Cartografía 13. P99 y porcentaje de cubrimiento- Devesa de Rogueira Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Souto de Saceda



Cartografía 14. P99 y porcentaje de cubrimiento- Souto de Saceda Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.

Cruzul



Cartografía 15. P99 y porcentaje de cubrimiento- Acíñeiral de Cruzul Geoparque Montañas do Courel. Fuente: LiDAR-PNOA.