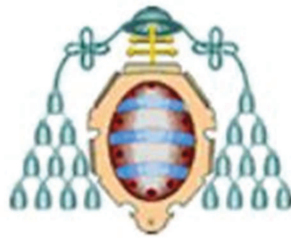


# UNIVERSIDAD DE OVIEDO



## ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

Departamento de Biología de organismos y sistemas

Área de ingeniería agroforestal

***MASTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA***

### **TRABAJO FIN DE MASTER**

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA DETERMINACIÓN AUTOMÁTICA DE  
RODALES MEDIANTE DATOS LIDAR

**Autor: Pelayo Rama Villar**

**Directores: Elena Canga Líbano**

**Pedro Álvarez Álvarez**

***Mieres, 2014***



## **Resumen**

El propósito del presente estudio de investigación fue desarrollar y evaluar la idoneidad de una serie de metodologías para la detección automática de rodales mediante el empleo de datos LiDAR e imágenes satélite. Se realizó el tratamiento previo de los datos para posteriormente incluirlos en las metodologías mediante un sistema de información geográfica. Se obtuvieron 9 resultados en función de la metodología empleada y los pesos aplicados en las variantes, realizando una comparativa con la situación actual del monte para seleccionar la que más se acercase a la realidad, tomando como referencia la rodalización propuesta en la última revisión de la ordenación. Dicha metodología óptima nos permitió obtener una determinación automática de rodales, minimizando los costes respecto a la metodología empleada de manera tradicional, representando pues una interesante contribución al sector forestal.

## **Abstract**

The purpose of this research study was to develop and evaluate the suitability of a number of methodologies for automatic detection of stands by the use of LiDAR data and satellite imagery. Pretreatment of the data would then be included in the methodology using a geographic information system was conducted. 9 results in function of the methodology used and the weights applied in the variants were obtained, making a comparison with the current situation of the mountain to select the one that come closer to reality, with reference to standardization given in the latest revision of the management. This methodology allowed us to obtain optimal automatic determination stands, minimizing costs regarding the methodology used in a traditional way, accounting for an interesting contribution to the forestry sector.

## Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Justificación	1
1.2	Antecedentes del proyecto	2
1.3	Antecedentes metodológicos	3
1.4	Objetivos	4
<b>2</b>	<b>Material y métodos</b>	<b>5</b>
2.1	Datos	5
2.1.1	Datos LiDAR	6
	Preparación previa datos LiDAR	7
	Normalización de datos	8
2.1.2	Raster de altura dominante	9
2.1.3	Raster de Fracción de Cobertura	10
2.1.4	Raster de intensidad LiDAR	11
2.1.5	Mapa raster de Pendientes	12
2.1.6	Mapa raster de Orientaciones	13
2.1.7	Mapa raster de Imagen satélite	14
2.2	Metodologías	18
2.2.1	Metodología 1	18
2.2.2	Metodología 2	19
2.2.3	Metodología 3	21
2.2.4	Selección de la mejor alternativa	22
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>23</b>
3.1	Resultado metodología 1	24
3.1.1	Variante 1	24
3.1.2	Variante 2	25
3.1.3	Variante 3	26
3.2	Resultado metodología 2	27
3.2.1	Variante 1	28
3.2.2	Variante 2	29
3.2.3	Variante 3	30
3.3	Resultado metodología 3	31
3.3.1	Variante 1	31
3.3.2	Variante 2	32
3.3.3	Variante 3	32
3.4	Elección de la metodología óptima	33
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>36</b>
<b>Anexo 1</b>	<b>Estadísticos</b>	<b>37</b>
<b>Anexo 2</b>	<b>Elementos auxiliares a la rodalización</b>	<b>47</b>
<b>Anexo 3</b>	<b>Planos</b>	<b>50</b>

# **1 Introducción**

## **1.1 Justificación**

Se hace cada día más patente la importancia de los recursos tanto forestales como naturales del medio que nos rodea, bien sea desde un enfoque económico, social, medioambiental e incluso conservacionista. Parejo a dicha importancia, se encuentra en la actualidad el amplio desarrollo de las tecnologías de la información, tanto a nivel especialista como a nivel usuario, es por esto que se está produciendo una amplia demanda de herramientas de gestión que faciliten el manejo de los recursos naturales.

El presente estudio se encuentra ampliamente justificado en la necesidad de emplear las nuevas tecnologías en la gestión de dichos recursos, empleando para ello los avances tecnológicos existentes en la actualidad de la manera más eficiente y cómoda posible, lo cual además de suponer una herramienta útil de gestión de cara a los profesionales, supondrá una mejora del acceso a la información por parte del público no especializado.

La tecnología LiDAR, supone una fuente de información la cual en conjunción con los sistemas de información geográfica, proporciona una potente herramienta de cara al sector forestal, debido a que dichos datos se obtienen periódicamente y a gran escala, lo que permite una vez tratados, valorar la evolución en el tiempo de una amplia extensión del territorio, con una significativa reducción de costes.

El presente estudio, se basa en la propuesta y evaluación de diversas metodologías en las que se conjugarán datos LiDAR y en según qué casos imágenes satélite, dentro de un sistema de información geográfica, para la delimitación automática de rodales, entendiendo los mismos como zonas homogéneas en cuanto a características de pendiente, orientación, fracción de cabida cubierta, altura dominante y parámetros extraídos tanto de los datos LiDAR como de las imágenes satélite que se detallarán en la explicación de las diversas metodologías propuestas.

Con el desarrollo de estos modelos y la elección del procedimiento óptimo, se pretendió sentar una metodología que permita la rodalización automática de una extensa zona forestal sin la necesidad de un muestreo previo, si bien es cierto no tendrá validez alguna como herramienta de estimación, permitirá a los gestores una primera aproximación al estado dasocrático del monte, facilitando su gestión y la elaboración de los diseños de inventario.

El obtener una aproximación a la realidad gracias a la aplicación de estas metodologías, reducirá los costes de planificación y gestión. Además, permitirá la evaluación de la situación actual de manera rápida, lo que significa un avance en el sector forestal debido a que a causa de las características intrínsecas del mismo, en la actualidad se requieren unos esfuerzos de muestreo elevados para realizar una aproximación de igual magnitud a la que se pretende obtener mediante la aplicación de las metodologías presentes en este estudio, lo cual significará una reducción de costes y por lo tanto una mayor rentabilidad y facilidad de manejo.

## 1.2 Antecedentes del proyecto

El presente proyecto, se desarrolla a escala local, más concretamente sobre el monte de utilidad pública “Rodoiros” ubicado en el concejo de Tineo y con número de catálogo del M.U.P. 335, (Figura 1), siendo este un monte propiedad del Principado de Asturias con una superficie de 252,26 ha. Las especies presentes son *Pinus pinaster* (Aiton, 1789) y *Pinus radiata* (D.Don. 1836).



Figura 1. Localización del monte Rodoiros dentro del Principado de Asturias.

Se realiza el desarrollo del presente estudio sobre dicho monte debido a que se dispone del proyecto de revisión de la ordenación del mismo, lo que permitió una comparación de los resultados obtenidos en cada metodología con los disponibles de dicho proyecto procedentes de estudios de campo realizados durante la última revisión de la ordenación, además de la disponibilidad de datos LiDAR de reciente adquisición correspondientes al vuelo del PNOA del año 2012, siendo la revisión de la ordenación contemporánea a dicha fecha lo que nos permite una comparación de los datos con coherencia espacio-temporal.

Se presenta en la Figura 2 la rodalización existente en la actualidad, así como una tabla asociada (Tabla 1), resultado de la extracción de valores sobre cada uno de dichos rodales. El descriptivo empleado, es la media aritmética.



Figura 2. Rodalización actual del monte

Rodal	FCC	Altura dominante	Pendiente	Orientación
1	15,90	8,99	34,12	213,99
2	85,56	20,40	45,97	115,35
3	67,13	17,99	44,46	147,91
4	57,16	16,40	46,10	149,2
5	57,25	11,48	34,64	169,93
6	81,95	24,59	48,41	159,37
7	60,01	21,09	42,86	212,49
8	78,19	25,18	37,80	245,95
9	69,66	13,11	44,94	225,06
10	38,27	7,88	32,89	253,08
11	66,47	11,91	39,97	205,81
12	41,97	8,97	48,36	212,86
13	32,92	7,12	45,16	156,49

Tabla 1. Media aritmética de las variables empleadas, sobre cada rodal actual.

Cabe destacar que otra de las razones para la elección de dicho monte como zona de estudio, es su propiedad y los posibles usos que la administración puede hacer de la metodología aquí desarrollada, como punto de partida para la inclusión de procesos en base a datos LiDAR en la gestión del territorio.

### 1.3 Antecedentes metodológicos

Existe en la literatura científica actual abundantes estudios sobre el tratamiento y empleo de datos LiDAR para la automatización de procesos como la estimación de variables dasométricas, la definición de usos del suelo, la delimitación de rodales o identificación de especies, procediendo a continuación a relatar algunos de los existentes, los cuales han sido tomados como base para la realización del presente documento.

Mustonen *et al.* (2008) estableció una metodología destinada a la detección automática de rodales en base a datos LiDAR mediante el empleo del Modelo Digital de Copas, el cual es un producto derivado de datos LiDAR, siendo este en un primer momento el único dato de partida que empleó para la determinación de los rodales, aun así, estudió la implementación de imágenes aéreas ortorectificadas en conjunción con el modelo digital de copas para mejorar el ajuste del resultado.

El propio autor menciona como conclusiones propias a su estudio, que el empleo de otros parámetros como el número de pies por hectárea o la fracción de cabida cubierta, todos ellos parámetros derivados de datos LiDAR, produciría previsiblemente en los resultados de su método un aumento importante de la fiabilidad del mismo.

Así mismo, en el mismo año, Straub *et al.* (2008) desarrolló un método para aplicarlo sobre las superficies forestales alemanas, basándose en el modelo normalizado de superficies como dato de partida. A partir del modelo normalizado de superficies, calcula la derivada de la imagen aérea normalizada, a partir de la cual determina el umbral de pixel correspondiente a zonas con vegetación mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes, pudiendo a partir de este umbral, diferenciar entre áreas forestales y no forestales.

Otros autores, como Jeong-Heon Song *et al.* (2006) se basaron en productos derivados de los datos LiDAR como la imagen de intensidad, desarrollando el autor una metodología

encaminada a la diferenciación de usos del suelo, partiendo de la premisa de que cada elemento posee una refracción singular en base al material del que está compuesto, lo que permitió desarrollar un método en el cual se realizó una primera clasificación del suelo según su uso en base a la intensidad de los retornos LiDAR. En las conclusiones a su trabajo, expuso que la intensidad LiDAR estaba influenciada por mucho ruido, además de no ajustarse fielmente a las leyes de la reflectividad, puesto que debido a la eliminación del ruido mediante técnicas de suavizado, se pierde parte de la información.

Otros estudios, como el desarrollado por Wang *et al.* (2011) el cual empleó imágenes aéreas junto a datos LiDAR para la determinación automática de rodales en áreas forestales suizas, las que sirven como punto de partida para la obtención del “Índice de Vegetación Verde” que se obtiene a partir de las bandas roja y verde del espectro visible contenidas en la ortofoto. Este índice junto con el modelo de copas obtenido a partir del procesado de datos LiDAR, se conjugaron para obtener un raster cuyos píxeles poseían unos valores determinados que permitieron realizar una primera diferenciación entre zonas forestales y no forestales; posteriormente, dicho raster se procesó mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes para realizar una segmentación del mismo en áreas homogéneas e independientes.

Por tanto, existen innumerables trabajos de esta índole debido a que se trata de un campo en expansión que presenta multitud de aplicaciones, todas ellas con la característica común de buscar una automatización de procedimientos que de otra manera deberían basarse en muestreos de campo con el elevado coste que esto supone, más aún si se tiene en cuenta la gran extensión que cubren.

#### **1.4 Objetivos**

1. Rodalizar el monte Rodoiros en función de sus principales características tanto dasométricas como orográficas.
2. Evaluar las metodologías más apropiadas para la detección automática de rodales a partir de datos LiDAR.
3. Evaluar la efectividad de conjugar el uso de datos LiDAR junto con imágenes satélite para su empleo en la detección de rodales mediante las metodologías desarrolladas.



## 2 Material y métodos

### 2.1 Datos

En el presente estudio, se evaluaron tres metodologías para la rodalización de zonas forestales a partir de datos LiDAR. Para cada una de las cuales se desarrollaron tres variantes, por lo que finalmente se analizaron nueve metodologías diferentes.

Para la definición de los datos necesarios se tuvieron en cuenta los siguientes criterios dasométricos necesarios para la rodalización de una masa forestal:

- Altura dominante de la masa forestal.
- Fracción de cabida cubierta
- Pendientes y orientación
- Asimismo, se tuvieron en cuenta en la fase final otros criterios como la situación de las pistas, raster de intensidad LiDAR, raster de imagen satélite, etc...

En la aplicación de los criterios dasométricos empleados para la rodalización, han de tenerse en cuenta varios aspectos, como la finalidad con la que se realiza la ordenación o la función principal del monte, ya que como bien es sabido, tanto el manejo como la clasificación de sus características difieren según el monte sea productor o posea fines de protección del suelo, medioambientales, paisajísticos, conservacionistas e incluso dentro de estas tipologías no se valorará igualmente una masa pura que una mixta variando incluso dentro de una misma tipología en función de las especies que lo compongan.

En este caso, se trataba de un monte de carácter productor, por lo que la clasificación de los diversos parámetros para la detección de rodales, se realizó atendiendo a este criterio, manteniéndolo a lo largo de todo el estudio.

Los datos de partida comunes en todas las metodologías y sus correspondientes variantes comprenden productos derivados de datos LiDAR brutos, los cuales han de sufrir un proceso de transformación que permitan su empleo en un software de información geográfica para las diversas modelizaciones.

Así mismo, se emplearon como datos de partida en alguna de las variantes, imágenes satélite, que al igual que los datos LiDAR, se obtienen en bruto, debiendo de sufrir un tratamiento con un software específico para su uso combinado con los datos LiDAR dentro del software de información geográfica, Arcgis 10<sup>®</sup> (Esri, 2014).

Se presenta en la Figura 3, un diagrama de flujo, en el cual se pueden observar como a partir de los datos de partida y a través de los procesos que se explicarán a continuación, se obtienen una serie de mapas raster los cuales se han empleado como datos iniciales en la aplicación de las metodologías con ayuda del software de información geográfica empleado en el presente estudio, Arcgis 10<sup>®</sup>.

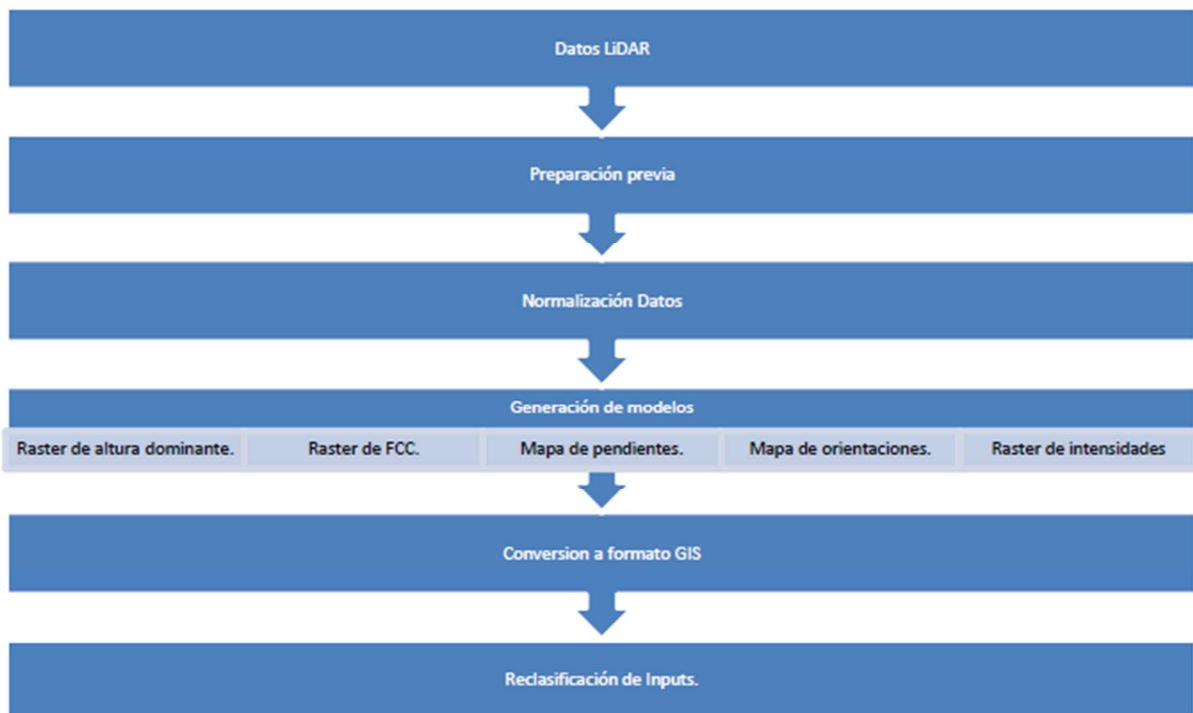


Figura 3. Diagrama de flujo del manejo de los datos LiDAR.

### 2.1.1 Datos LiDAR

Los datos LiDAR, los cuales suponen el eje central del presente trabajo, se obtuvieron a partir del vuelo de la zona de estudio realizado dentro del PNOA (Instituto Geográfico Nacional, 2012) con una densidad de 0,5 pulsos / m<sup>2</sup> a partir de los que se obtienen los datos de partida requeridos en la metodologías desarrolladas en este trabajo.

Para el tratamiento previo de los datos LiDAR, se empleó el software FUSION V.3.42 (USDA Forest Service, 2014) a partir del que se obtuvieron los mapas raster necesarios para la rodalización del monte, comunes en todas las metodologías.

Para el uso de estos mapas raster en la rodalización del monte Rodoiros, se asignaron clases en cada uno de ellos previamente a su inclusión en el proceso que se llevó a cabo mediante el software de información geográfica.

Dichas clases se basaron en los criterios dasométricos empleados en la rodalización de acuerdo a la tipología del monte y a su finalidad, exponiéndose en apartados posteriores la relación entre dicha clasificación y los mapas raster generados con la finalidad de incluirlos en las metodologías.

## Preparación previa datos LiDAR

En un primer paso y a partir de los datos del PNOA, (en formato \*.ASCII y georreferenciados), se empleó el software FUSION<sup>®</sup> para realizar un control de calidad, que generó como resultado un análisis estadístico de la nube de puntos LiDAR en cuanto a densidad de puntos, número de retornos, alturas máximas y mínimas y demás parámetros.

El control de calidad en FUSION<sup>®</sup>, se realizó empleando la herramienta *Catalog*, que generó una salida en forma de página web, con un resumen de todos los estadísticos extraídos de los datos a evaluar, pudiendo también generar imágenes de la intensidad y de las distintas densidades de retornos, estando todas estas imágenes asociadas a unos metadatos que permiten su georeferenciación.

Una vez asegurada la validez de los mismos, el siguiente paso fue seleccionar una muestra de la zona de estudio, para minimizar el volumen de datos a incluir en las metodologías.

Para dicho procedimiento, se utilizó la herramienta *PolyClipData* del FUSION<sup>®</sup>, por medio de la que se introdujeron las coordenadas de un área que excedía ampliamente los límites de la zona de estudio (Figura 4) para evitar incurrir en errores como el efecto frontera, el cual supondría la pérdida de información por errores en la interpolación de datos.

Como resultado, se obtuvo un archivo LiDAR, de idénticas características al original, pero de menor tamaño.

Este sencillo procedimiento permitió una mayor rapidez en el procesado tanto de los datos LiDAR en FUSION<sup>®</sup>, como de los mapas raster, en el sistema de información geográfica.

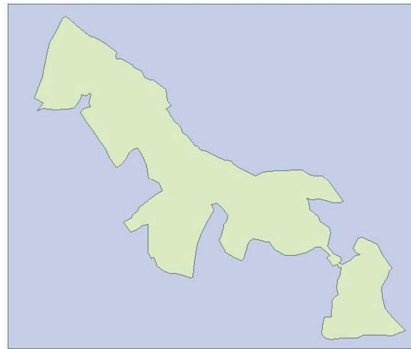


Figura 4. Perímetro del monte encuadrado dentro de la zona de estudio.

Una vez se dispuso de los datos LiDAR del área de trabajo delimitada (Figura 5), se realizó un filtrado de *outliers*, entendiendo los mismos como retornos y pulsos laser mal clasificados, los cuales generarían un error en el resto de procesos en caso de no haber sido corregidos.

Para ello, se empleó la herramienta implementada en el software FUSION<sup>®</sup>, denominada *FilterData*, que aplicó un filtro eliminando los *outliers* por medio de un algoritmo (basándose en la comparación de los retornos clasificados en formato LAS por el proveedor de la imagen, con los existentes en nuestra nube de puntos LiDAR,

evaluándolos de manera individual y eliminando aquellos que se excedían del rango marcado).



Figura 5. Muestra de la nube de puntos LiDAR de la zona objeto de estudio sin filtrar.

Se realizaron diversas pruebas para obtener el valor óptimo de las variables del algoritmo, mediante la inspección visual de la nube de puntos, puesto que en base al valor de dichos parámetros, el filtrado será de mayor o menor intensidad, según los datos LiDAR se correspondan con zonas de monte bajo, pendientes elevadas y varias características a tener en cuenta.

### Normalización de datos

Llegados a este punto, de cara a nuestro estudio, se procedió a realizar una separación de los retornos pertenecientes al suelo y los pertenecientes al vuelo, lo cual es requerido para la obtención del resto de mapas raster a emplear en las metodologías, entendiendo este proceso como la normalización de nuestros datos.

La herramienta utilizada en el filtrado del suelo se denomina *GroundFilter*, la cual se basa en el filtrado de una nube de puntos LiDAR, identificando los últimos retornos que formarían parte del suelo.

Esta herramienta utiliza un algoritmo en el que al igual que en el filtrado de *outliers*, se tuvieron que introducir unos parámetros para caracterizar el filtrado, aunque si bien es cierto que existen unos valores de referencia, no tendrán la misma exactitud en todos los casos, por lo que se debieron de realizar pruebas para comprobar su idoneidad, que al igual que en el caso del proceso anterior, depende de las características de la zona objeto de estudio.

Dicha herramienta, generó como resultado un archivo en formato \*.las, que contenía únicamente los retornos clasificados como suelo (Figura 6) el cual se empleó en la generación de los diversos mapas raster a utilizar en las metodologías.

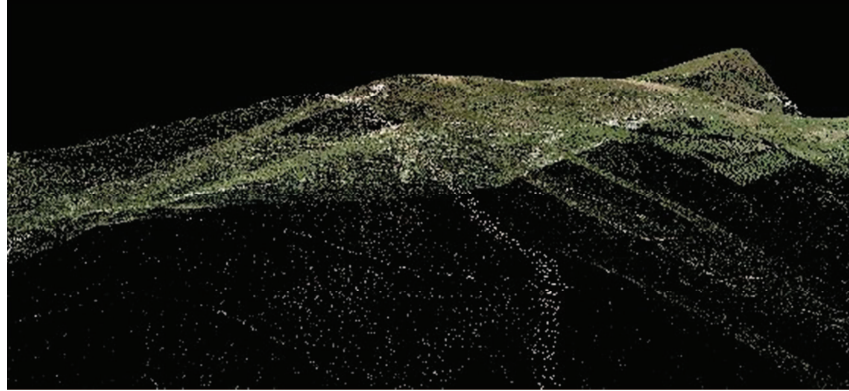


Figura 6. Archivo en formato \*.LAS con los retornos del suelo.

### 2.1.2 Raster de altura dominante.

Para la obtención de un mapa raster de alturas dominantes a partir de la nube de puntos normalizada, se utilizó en primer lugar la herramienta *GridMetrics* que generó los valores medios de la nube de puntos LiDAR fijando un tamaño determinado de pixel, obteniendo un archivo de texto \*.csv.

En el presente estudio, se seleccionó un tamaño de pixel de 10 m el cual se consideró óptimo teniendo en cuenta la densidad de puntos de los datos LiDAR y el objetivo del presente proyecto, además de no ralentizar los procesos de cálculo.

De entre todos los valores medios, el percentil 95 de las alturas se considera un buen estimador de la altura dominante (altura media del 95% de los pies más altos).

Posteriormente, se empleó la herramienta *CSV2Grid* para generar un mapa raster a partir del estadístico descriptivo seleccionado (percentil 95). Dicha herramienta requiere como datos de entrada el propio archivo \*.csv además de un archivo autogenerado en el paso anterior, el cual contendrá los metadatos.

A partir del mismo, como se ha dicho anteriormente, se generó un raster de altura dominante (en formato \*.DTM) empleando para ello el percentil 95 de la altura.

El formato de salida de los raster generados a partir de datos LiDAR mediante el software FUSION®, fue \*.DTM, el cual no es compatible con el resto de programas, por lo que hubo de convertirse a un formato universal como el \*.ASCII.

Para dicha conversión el software FUSION® posee una herramienta propia de conversión dentro de su caja de herramientas FusionTool.

Una vez se dispuso de dichos raster en formato \*.ASCII ya se pudo trabajar con ellos desde nuestro sistema de información geográfica y realizar sobre los mismos las operaciones pertinentes.

El raster de altura dominante, se generó en valores continuos, lo cual interferiría con su inclusión en las metodologías; esto se solucionó realizando una asignación de rangos a las clases de edad presentes, definiendo cada una de ellas con un único valor (Tabla 2).

Altura Dominante (m)	Tipo	Clasificación (Valor Pixel)
0	Raso	1
0 a 10	Repoblado	2
10 a 20	Monte Bravo	3
20 a 30	Latizal	4
30 a 40	Fustal joven	5
>40	Fustal Viejo	6

Tabla 2. Asignación de valores a los rangos de clases naturales de edad.

Como puede observarse en la clasificación, aunque se trataba de un monte de carácter productor, se propuso una clasificación en función de clases naturales de edad, puesto que se supone que los rodales deberán pertenecer a la misma clase para efectuar sobre cada una de ellas los tratamientos selvícolas necesarios.

Esta clasificación en clases naturales de edad en base a su altura se extrae de los valores habituales empleados en dasometría, propuestos por diversos autores y ampliamente aceptados dentro de la gestión forestal.

### 2.1.3 Raster de Fracción de Cabida Cubierta

La fracción de cabida cubierta (FCC) es la superficie que ocupa la proyección vertical de las copas respecto a la superficie del suelo expresada en tanto por ciento, considerándose un criterio dasométrico básico en la gestión forestal puesto que es un indicador del estado de la masa a evaluar.

Debido a esto, se incluyó en el presente estudio un mapa raster de fracción de cabida cubierta, en el que cada pixel, tuviese como valor el porcentaje de la misma; su cálculo se realizó en base a datos LiDAR normalizados, empleando para ello una herramienta implementada en el software denominada *Cover*, especificando una resolución espacial de 10 m.

Dicha herramienta está específicamente diseñada para calcular la fracción de cabida cubierta basándose en la clasificación LAS de los datos, definiendo la misma como el número de retornos sobre una altura determinada dividido por el número total de retornos en cada pixel.

En su empleo se requiere el archivo suelo antes generado así como especificar una altura que diferencie el suelo del vuelo, la cual en nuestro caso se especificó como de dos metros, considerando la misma idónea en base a las características de las especies presentes en el área de estudio, permitiéndonos esto diferenciar entre el matorral y el vuelo de la masa.

El raster de salida se presenta en el formato propio del software, \*.DTM, el cual sufrió una posterior conversión a \*.ASCII, para su correcta visualización en el software de información geográfica.

La asignación de valores a los rangos de fracción de cabida cubierta, puede observarse en la Tabla 3, en la cual se emplean los rangos establecidos en la gran mayoría de manuales de gestión forestal.

FCC (%)	Tipo	Clasificación (Valor del pixel)
0 a 25	Raso	1
25 a 75	Cobertura incompleta	2
>75	Cobertura completa	3

Tabla 3. Asignación de valores únicos a los rangos de FCC.

Este parámetro supone un criterio básico en el presente trabajo debido a que es el único indicador empleado para denotar de manera aproximada la densidad de la masa, puesto que no se han incluido indicadores o procesos para estimar el número de pies por considerarse que no resultarían efectivos en la aplicación de una aproximación de escala variable como la que se pretende, es decir, si bien funcionarían a una escala muy localizada, su aplicación sobre grandes extensiones induciría a errores.

Debido a las limitaciones de los datos LiDAR y al software empleado para el manejo de los mismos, la cobertura trabada no se contempla, incluyéndola dentro de cobertura completa puesto que el raster generado posee un rango de valores de 0 a 100 en tanto por ciento, estando la cobertura trabada definida como aquella superior al 100 %.

#### 2.1.4 Raster de intensidad LiDAR

La intensidad LiDAR, se define como el porcentaje de potencia de la señal reflejada respecto a la inicial emitida, lo que depende de la reflectancia que ofrece un objeto y varía según las características del material y el tipo de luz empleada (Gonçalves *et al.* 2007).

Se decidió generar el raster de intensidades LiDAR teniendo en cuenta que puede ayudar a la definición de las masas forestales en cuanto a su estado actual, incluyéndolo en el presente trabajo de cara a probar su utilidad en la delimitación automática de rodales basándonos para ello en la experiencia previa de otros autores (Jeong-Heon Song *et al.* 2006, Oerka *et al.* 2007, Eysn *et al.* 2012).

Para su generación se emplearon los valores medios obtenidos mediante la herramienta *GridMetrics*, mediante la cual se obtienen los valores medios de la nube de puntos LiDAR estando entre ellos, la intensidad media en cada retorno LiDAR y generando a partir de esos datos un raster, con una resolución espacial 10 m, en el que cada pixel posee el valor correspondiente a la intensidad media de los retornos LiDAR que se encuentran sobre ese pixel.

Se empleó una ortofoto de la zona sobre la que se superpuso la imagen de intensidad LiDAR y se determinaron unos rangos aproximados mediante una comparación visual (Figura 7), para convertir los valores continuos a valores discretos de cara a emplear el mapa raster de intensidades en las metodologías.

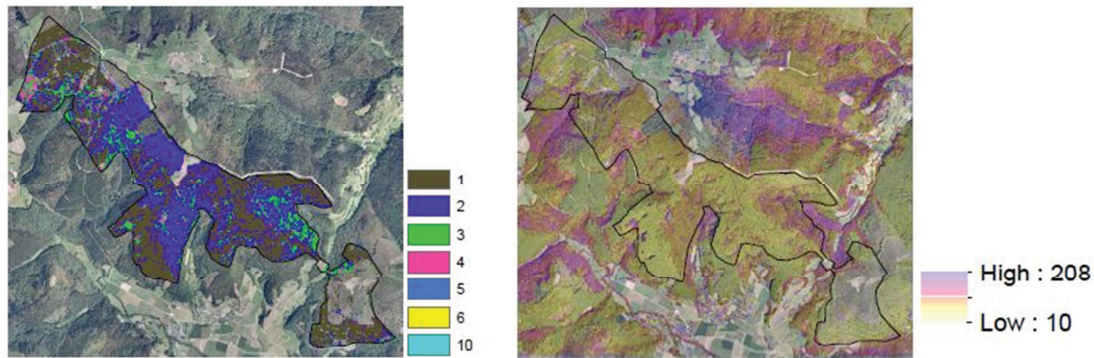


Figura 7. Raster de intensidades LiDAR y comparación visual.

Puede observarse como el raster de intensidad LiDAR en crudo posee unos valores continuos, los cuales superpuestos a la ortofoto, permiten que se pueda establecer aproximadamente, un rango de los mismos para cada material de la cubierta del monte (Tabla 4), basándose para ello en las experiencias previas de otros autores, (Jeong-Heon Song *et al.* 2006)

Valores de intensidad LiDAR	Tipo	Clasificación
<11	Zona Rasa	NoData
11 a 21	Arbolado bajo y abierto	1
21 a 29	Arbolado de densidad media	2
29 a 40	Arbolado de cobertura espesa	3
40 a 62	Arbolado disperso	4
>62	Rasos con vegetación	5

Tabla 4. Asignación de valores únicos a los rangos de intensidad LiDAR.

### 2.1.5 Mapa raster de Pendientes

El mapa de pendientes, es básico para la determinación de rodales, no solo por la limitación que la misma supone a los métodos de aprovechamiento, sino porque también influirá en el tipo de rodal, ya que puede determinarse que un rodal se clasifique como protector por su elevada pendiente, influyendo también en los métodos de gestión futura de los rodales productores, por la maquinaria que podrá trabajar sobre ellos.

Para generar dicho mapa, se partió del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual se obtiene a partir del archivo suelo generado en la normalización de datos, empleando para ello la herramienta denominada *GrindSurfaceCreate* implementada en FUSION®.

A partir del MDE mediante la herramienta *Slope*, del ArcGis 10®, se generó un raster cuyos pixeles tienen el valor de la pendiente en tanto por ciento, con idéntico tamaño de pixel que los mapas anteriores (10 m).

A este mapa de pendientes se le asignaron un rango de clases que se muestra en la Tabla 5, basándose en la posibilidad de mecanización de las labores bien sean selvícolas o de saca, lo que representa un papel fundamental en la gestión de un monte productor. En estos rangos de mecanización hay que tener en cuenta no sólo las pendientes sobre las que trabaja la maquinaria forestal, si no también cómo deben hacerlo, es decir, una



procesadora, podrá trabajar en un rango de pendiente del 0 al 65 por ciento, pero teniendo en cuenta que a partir del 25 hasta el 45 % deberá hacerlo siguiendo curvas de nivel y a partir del 45 % su movilidad se verá reducida a líneas de máxima pendiente.

Pendiente (%)	Tipo	Clasificación (Valor del pixel)
0 a 25	Sin restricción	1
25 a 45	Curva de nivel	2
45 a 65	Máxima pendiente	3
>65	Manual o cableado	4

Tabla 5. Asignación de valores a los rangos de pendientes.

Además se tuvo en cuenta que aun tratándose de un monte productor, deben contemplarse en todo momento criterios de protección del suelo, de modo que dicha clasificación aun atendiendo a los criterios de mecanización, nos permitió determinar aquellas zonas que por sus características orográficas deban de mantenerse como rodales protectores, recibiendo unos tratamientos y manejo completamente distintos.

### 2.1.6 Mapa raster de Orientaciones

Al igual que en el modelo de pendientes, el modelo de orientaciones, se calculó empleando una herramienta propia de Arcgis 10 ®, la herramienta *Aspect*, la cual generó un raster donde cada pixel posee un valor en grados dependiendo de su orientación.

El modelo de orientaciones se empleó en las diversas metodologías desarrolladas en el presente trabajo, ya que según la definición selvícola de rodal, ha de tenerse en cuenta esta característica debido a cómo afecta la orientación a los caracteres culturales de las diversas especies influyendo en su desarrollo y por tanto en su gestión.

Aun así se procura que su empleo no suponga una limitación, es decir, se le dotó de una baja influencia en la determinación del rodal puesto que a causa de las características orográficas de la cordillera cantábrica, un alto peso de la orientación en la rodalización, supondría una excesiva zonificación.

El raster generado mediante la herramienta *Aspect* de Arcgis 10 ®, realiza automáticamente una clasificación de los pixeles en función de su orientación según los 8 puntos cardinales, para lo cual cada pixel poseerá un valor entre 0 y 360 grados sexagesimales.

De cara al presente trabajo para realizar la conjunción de los diversos raster empleados, se llevó a cabo una reclasificación de dichos valores para que no se produjesen errores.

La reclasificación propuesta únicamente modificó el valor del pixel sin cambiar su significado, es decir, en aquellos pixeles de orientación Norte, en vez de poseer un valor dentro del rango 0-45º, se realizó una reclasificación de modo que posean todos unos valores numéricos enteros, como puede observarse en la Tabla 6.

Orientación en grados	Tipo	Clasificación
0 a 45	Norte	1
45 a 90	Noreste	2
90 a 135	Este	3
135 a 180	Sureste	4
180 a 225	Sur	5
225 a 270	Suroeste	6
270 a 315	Oeste	7
315 a 360	Noroeste	8

Tabla 6. Asignación de valores únicos a los rangos de orientaciones.

### 2.1.7 Mapa raster de Imagen satélite

Se decidió incluir en el presente trabajo las imágenes satélite para evaluar su idoneidad como dato de partida en la determinación automática de rodales.

La justificación de emplear dicho raster, parte de la premisa de que todos los materiales poseen una reflectividad característica, la cual se observa claramente en su firma espectral, es decir, por como sus valores de reflectividad oscilan entre las diferentes longitudes de onda.

Así mismo, la reflectividad producida por un elemento vegetal, poseerá una firma espectral característica que lo diferenciará del resto de materiales, siendo esta la premisa básica para la teledetección basada en imágenes satélite.

Las imágenes empleadas se obtuvieron de manera gratuita a partir del servidor Glovis (USGS, 2014) y corresponden a imágenes del satélite Landsat 4 TM de Agosto de 2012. La razón de seleccionar esta fecha es por ser coincidente con el vuelo del PNOA del cual se obtienen los datos LiDAR.

Para el manejo de las imágenes satélite se empleó el software ErMapper 7.0 (ERDAS Imagine, 2014).

La imagen obtenida se compone de un archivo \*.rar en cuyo interior se presentan las 7 bandas correspondientes, cada una de las mismas a una longitud de onda determinada, característica de la resolución espectral (Tabla 7) del Landsat 4 TM, con una resolución espacial de 30 m, y un archivo con los metadatos asociados a dichas imágenes. Con el software, se generó un algoritmo de 6 capas, excluyendo la térmica quedando por tanto definida con una resolución espectral de 6 bandas.

Banda	1	2	3	4	5	7
<b>Resolución espectral (nm)</b>	450	530	630	780	1550	2080
<b>Espectro</b>	Azul	Verde	Rojo	I.R. Cercano	I.R. Lejano	

Tabla 7. Resolución espectral del Landsat 4 TM.

En dicha imagen los valores de pixel se correspondían a niveles digitales, por lo que hubo que realizar un proceso de conversión para obtener los valores de reflectividad.

El paso previo a dicho proceso, fue la corrección atmosférica de la imagen para no arrastrar valores erróneos al resto del procedimiento, en este caso más que una corrección atmosférica propiamente dicha, se efectuó una homogeneización de los niveles digitales en base a los valores de referencia de la radiancia estimados para el agua, (Bukata et al. 1983), adaptados al satélite Landsat 4 TM.

En base a dichos valores, se realizó una homogeneización radiométrica de los niveles digitales de los píxeles de la imagen, para lo que seleccionaron las zonas de agua presentes en la imagen satélite, digitalizando polígonos dentro de las mismas creando una nueva región.

Posteriormente se calcularon los valores medios de los valores digitales de la imagen en los que aparecería la nueva región creada.

Para realizar la homogeneización se aplicó sobre cada banda una fórmula en función de los valores tipificados, de modo que como resultado se generó una nueva imagen con los niveles digitales corregidos.

Una vez realizada la homogeneización de los niveles digitales en la imagen, se procedió a convertir los valores de los mismos a radiancia espectral.

Para la conversión se emplearon valores tipificados procedentes del propio Landsat para esta imagen, los cuales están contenidos en los metadatos que acompañan al conjunto de capas.

Estos valores de referencia se incluyeron nuevamente en el algoritmo de 6 capas creado anteriormente, introduciendo en cada una de las mismas el valor correspondiente y generando como salida una imagen raster donde cada uno de cuyos píxeles representaba el valor de radiancia espectral.

Posteriormente se realizó la conversión de dicha imagen a reflectividad, mediante la aplicación de la siguiente fórmula sobre cada banda:

$$\rho_K = \frac{\pi * L_{min,K}}{E_{0,k} * \cos V}$$

dónde:

- $L_{min,k}$  = Imagen raster en radiancia.
- $E_{0,k}$  = Valores tipificados de la irradiancia solar en cada banda.
- $V$  = Valor del ángulo vertical del sol en el momento de la toma de la imagen, cuyo valor aparece en los metadatos de la misma.

Una vez aplicada esta fórmula con sus parámetros en cada una de las bandas, el raster resultante, poseía como valor de cada pixel la reflectividad en porcentaje.

En el resto de raster y modelos generados con anterioridad se estableció una resolución espacial de 10 m, lo que implica que el raster de reflectividades debía de sufrir un remuestreo a 10 m mediante el software Arcgis 10<sup>®</sup> para no incurrir en errores a la hora de emplearlo en las metodologías.

En el presente trabajo, se pretendió caracterizar la cubierta vegetal, basándose para ello en una modificación del raster de reflectividades ya que la característica más destacable de la firma espectral de un elemento vegetal (Figura 8), se encuentra en sus bandas 3 y 4, es decir, en la variación existente entre la longitud de onda correspondiente al rojo y al infrarrojo cercano.

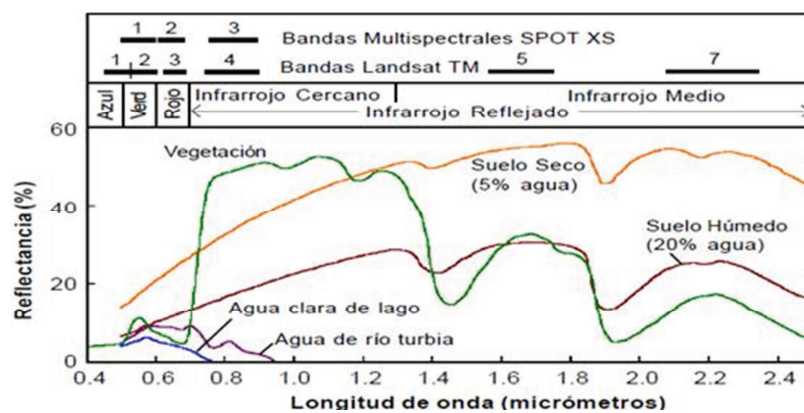


Figura 8. Firma espectral de diversos materiales.

Fuente: J.A.W. Cabrera.

Puede observarse la elevada pendiente que muestra la curva de vegetación entre la longitud de onda correspondiente al rojo y al infrarrojo cercano, siendo esta muy superior a la firma espectral del resto de materiales.

Es por tanto que aunque no es objeto del presente trabajo realizar una teledetección de especies o de vegetación sana o enferma, se tiene en cuenta el criterio de que diferentes tipos de masa, poseerán diferentes valores de reflectancia.

Para evaluar dicho criterio, se generó nuevamente un algoritmo de una banda en la cual se introduce la siguiente fórmula:

$$\text{Banda 4 ( Infrarrojo) } - \text{ Banda 3 ( Rojo)}$$

Quedando como resultado un raster cada uno de cuyos pixeles posee como valor la diferencia de reflectancia entre las dos bandas características, bien sea por tratarse de diferentes especies, contenido en humedad e incluso edad de la masa.

Los valores de reflectancia que posee la vegetación en su firma espectral, varían en función de las características de la misma, es decir, la vegetación enferma poseerá menores valores de diferencia puesto que aunque su firma espectral se comportará de idéntica manera y su pendiente será similar, su reflectividad será menor en general, estando por tanto los valores del infrarrojo cercano más bajos que en la vegetación sana.

De cara a la asignación de clases del raster obtenido mediante la composición de bandas, se basó su desarrollo en la premisa de que aquellas firmas espectrales pertenecientes a un dosel de copas completo, con reflectividades procedentes de manera exclusiva de la vegetación poseerán una mayor amplitud que las que se veían interferidas por un suelo desnudo o por arbolado raso, cuya amplitud se vio mermada por la reflectividad procedente de suelo desnudo o vegetación más dispersa.

Al igual que en la clasificación de la densidad, se tuvo que realizar una asignación manual de clases apoyandonos para ello en las ortofotos y en alguno de los modelos generados a partir de los datos LiDAR como el raster de fracción de cabida cubierta, el cual da una aproximación a la espesura.

Se presenta en la Tabla 8, los valores tabulados establecidos en este caso, para lo que se empleó Arcgis 10 ® para la asignación de clases, entendiendo que para el empleo de imágenes satélite a una mayor escala, aun habiendo realizado la homogeneización de niveles digitales, se debería realizar una determinación de clases más exhaustiva de los mismos mediante el empleo de muestreos de campo con un refelectómetro para establecer unos rangos de valores más exactos, lo cual excede los límites del presente estudio, estando aun así justificado el empleo del raster satélite por realizarse a escala local y tratar de evaluar su posible empleo en las diversas metodologías.

Se presenta una muestra (Figura 9) del proceso de clasificación manual y su posterior resultado, el cual como se ha descrito se basó en la comparación de los valores esperados con la ortofoto superpuesta, en base a la que se realiza una clasificación local subjetiva.

Valores Capa satélite	Tipo	Clasificación
9 a 11	Rasos	1
11 a 14	Arbolado ralo	2
14 a 17	Espesura incompleta	3
17 a 22	Espesura medio	4
22 a 28	Espesura completa	5
>28	Espesura trabada	6

Tabla 8. Asignación de valores únicos a los rangos de reflectividad.

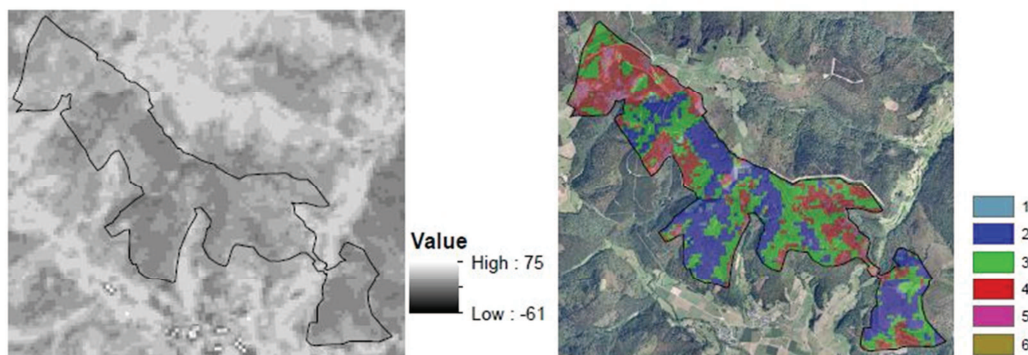


Figura 9. Proceso de clasificación del mapa raster de imagen satélite.

Aquellos valores negativos presentes en el raster, se encontraban fuera del área de estudio por lo que no se emplearon en la clasificación ya que para los posteriores procesos se extrajo el perímetro de la zona de estudio.

## 2.2 Metodologías

Para la rodalización del monte Rodoiros, se evaluaron tres metodologías, dentro de las cuales se propusieron tres variantes en función de los datos de partida empleados para su realización.

A continuación se exponen de manera detallada cada uno de las metodologías empleados especificando así mismo los datos de partida de cada una de las variantes.

El software empleado para la realización de dichos procesos, fue ArcGis 10 (Ersi, 2014), empleando las herramientas propias del mismo para los procesos propuestos.

Una vez se encuentran definidos dichos procesos, de cara a automatizar en la medida de lo posible la rodalización, se creó una caja de herramientas desde el propio software, en la cual se generó un diagrama de flujo con los procesos de cada metodología, así como las operaciones necesarias para su reclasificación y salida gráfica, haciéndose únicamente necesario introducir los datos de partida.

Para ello ha de tenerse en cuenta la particularidad común a cualquier sistema de información geográfica, la cual parte de la base de que todos los elementos empleados en el proceso deberán poseer idéntico sistema de referencia, puesto que de otra manera se producirían multitud de errores.

### 2.2.1 Metodología 1

La primera metodología propuesta empleó como proceso principal una clasificación no supervisada, en la que no se establece ninguna clase a priori, si no que se definen automáticamente a partir de las dos herramientas implementadas en el software, *Iso Cluster Clasification* y *Maximum Likelihood clasification*.

- Iso Cluster Clasification

Emplea un algoritmo implementado el cual determina las características de la agrupación de zonas homogéneas en función de los raster de entrada para a partir de dichas características, generar una firma espectral (valores de reflectividad característicos que poseen los diferentes materiales en cada banda del espectro) de las diversas zonas, la cual será posteriormente empleada en la segunda parte de la clasificación no supervisada.

- Maximum Likelihood Clasification

Genera un raster clasificado en función de la firma espectral obtenida en el paso anterior, con dicha firma va escaneando las diversas capas de entrada y determinando zonas homogéneas en función de las características de cada capa y genera un único raster de salida que agrupa la clasificación de todas las bandas en una sola.

Como se ha comentado con anterioridad, las variantes de la metodología, se basaron en los datos de entrada empleados; en esta, se emplearon una serie de capas comunes y unas variables que fueron las que caracterizaron la variante de la metodología.

Como capas comunes, se emplearon el raster de fracción de cabida cubierta, el raster de altura dominante y los mapas de pendiente y orientación; siendo las capas variables el raster de intensidad LiDAR y el raster de imagen satélite (Tabla 9).

Variante	Capas comunes	Capas variables
1	FCC, altura dominante, pendiente y orientación	Intensidad y satélite
2	FCC, altura dominante, pendiente y orientación	Satélite
3	FCC, altura dominante, pendiente y orientación	

Tabla 9. Mapas raster empleados en cada variante de la metodología 1.

Destacar como particularidad de la metodología que en la inclusión de parámetros en el mismo, todos estarán dotados de idéntico peso, es decir, el raster de FCC, poseerá idéntico peso en la clasificación final que el modelo de orientaciones, estando la metodología centrado única y exclusivamente en delimitar zonas homogéneas en función de los parámetros de entrada.

### 2.2.2 Metodología 2

La metodología 2 se basó en la herramienta incluida en el software de información geográfica Arcgis 10<sup>®</sup>, denominada *Weighted sum* la cual consiste en la suma de varios raster a cada uno de los cuales se les dota de un peso en función de su importancia siendo el resultado el sumatorio del valor de cada pixel del raster por el peso asignado (Figura 10).

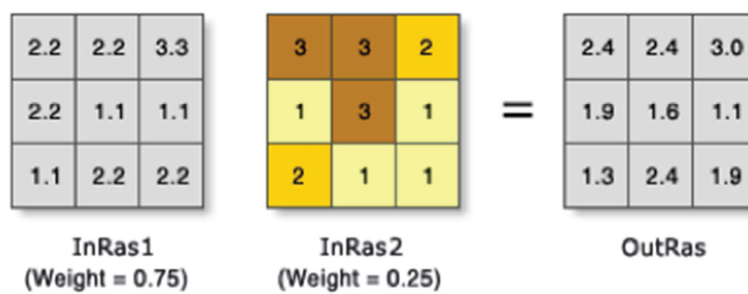


Figura 10. Fundamento teórico de la herramienta *Weighted sum*.

Fuente: Arcgis resources.

Por tanto, a partir de los mapas raster de partida y esta herramienta, se generó un raster de valores continuos (Figura 11) cada uno de cuyos pixeles, posee el valor del sumatorio en función del peso del que se dio a cada capa.



Figura 11. Raster obtenido en la metodología 2 de valores continuos.

Como puede desprenderse de la explicación de la metodología, la posibilidad de aplicar pesos a las capas de entrada, en función de su importancia, permitió una rodalización mucho más precisa en los diferentes casos, de modo que en un monte productor, se podrá hacer primar en importancia la FCC y la altura dominante, frente a la orientación o pendiente, mientras que en un monte protector, se podrá aumentar la importancia de la pendiente en la rodalización.

Dentro de la presente metodología, se desarrollaron tres variantes de la misma, determinadas en función del peso del que se dotó a las diversas capas involucradas. En todo momento se tuvo en cuenta el carácter productor del monte a la hora de determinar dichos pesos, no incluyendo en este caso el raster de intensidad LiDAR, ya que se consideran suficientes los datos empleados, además de que una excesiva diversificación de pesos impediría causar el efecto necesario, es decir, poner de relieve aquellas capas que más interesarían de cara al presente monte.

Se presenta en la Tabla 10 los pesos empleados en las diferentes variantes.

Variante de la metodología	Pesos característicos (%)
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 30 %</li> <li>• Altura dominante = 30 %</li> <li>• Pendiente = 20 %</li> <li>• Orientación = 5 %</li> <li>• Imagen satélite = 15 %</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 40 %</li> <li>• Altura dominante = 40 %</li> <li>• Pendiente = 10 %</li> <li>• Orientación = 5 %</li> <li>• Imagen satélite = 5 %</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 35 %</li> <li>• Altura dominante = 35 %</li> <li>• Pendiente = 25 %</li> <li>• Orientación = 5 %</li> <li>• Imagen satélite = 0 %</li> </ul>

Tabla 10. Pesos empleados en las variantes de la metodología 2.



### 2.2.3 Metodología 3

La tercera metodología empleada en el presente trabajo, se basó en la superposición de los diversos mapas raster en función de la importancia de cada capa. Para llevarlo a cabo, se empleó la herramienta denominada *Weighted Overlay*, con la que se realizó una superposición de las capas en función de su peso.

Cada uno de los raster de entrada, posee un rango de valores, además de dotarle de un peso en función de su importancia (Figura 12), la herramienta empleada en esta metodología, generó automáticamente una escala en función del valor mínimo y máximo de los rangos de valores de los raster introducidos, posteriormente ponderó el píxel de cada raster y los sumó, redondeando el resultado y generando un raster de valores discretos.

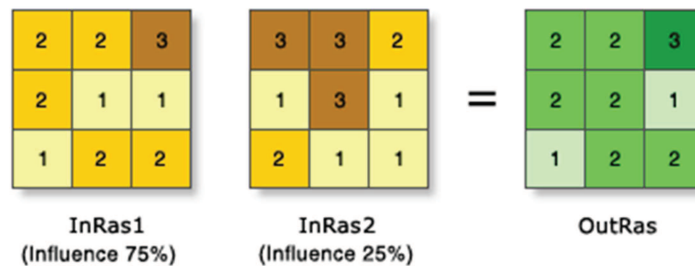


Figura 12. Fundamento teórico de la herramienta *Weighted overlay*.  
Fuente: Arcgis resources.

La presente metodología, aun compartiendo rasgos comunes con la metodología dos, se diferencia de la misma en que en este caso, se realizó una superposición ponderada de cada raster de manera individual para posteriormente, superponer las capas de entrada, habiéndose prescindido en esta metodología de los mapas raster de intensidad y de la imagen satélite.

Como puede observarse en la interface de la herramienta (Figura 13), se introdujeron los datos de entrada deseados, es decir, aquellos mapas raster que queremos que intervengan en la rodalización, dotando a cada uno de estos raster de una importancia determinada, por ejemplo en este caso en concreto, se han determinado todos los datos de entrada como de igual importancia, variando dicha ponderación en el resto de variantes de la metodología.

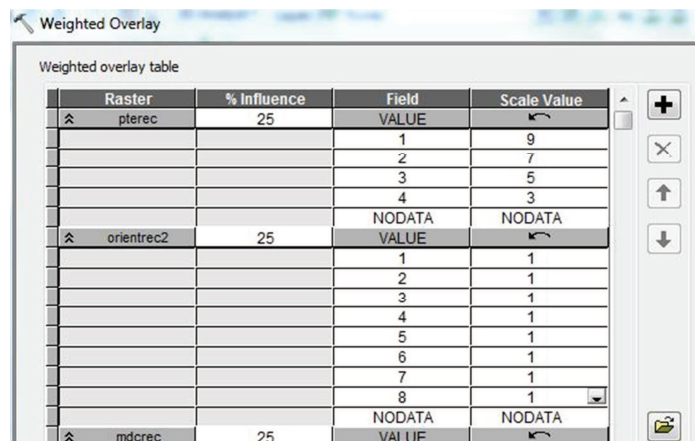


Figura 13. Interface de la herramienta *Weighted Overlay* de la metodología 3.  
Fuente: Arcgis resources.

El campo *Scale Value*, nos permite asignar jerarquías de importancia a los rangos en los que se clasifica cada raster de entrada a las metodologías.

Respecto a la pendiente por ejemplo, como se recordará, se había asignado una reclasificación de sus valores en función de su mecanización, quedando una escala de 1 a 4, siendo el uno el rango de menor pendiente y cuatro el de máxima pendiente.

Se llevó a cabo esta especificación ya que se consideró que apoya a la correcta rodalización puesto que en el caso de que se determine una zona de idéntica altura dominante, orientación y fracción de cubierta, no es lo mismo que posea un rango de pendiente menor del 25 % a un rango superior al 65 % puesto que sus tratamientos y destinos serán distintos.

En el resto de metodologías, el escalado de los diversos rangos de cada raster, se mantuvo constante, considerando de mayor idoneidad aquellos píxeles con mayor altura dominante y mayor cobertura de copas.

No así en la orientación cuyos diversos rangos se consideraron de idéntica importancia puesto que no se tienen en cuenta de manera expresa los caracteres culturales de las especies presentes en el monte.

Se presenta en la Tabla 11 los pesos dotados a los mapas raster de entrada en cada variante.

Variante de la metodología	Pesos característicos (%)
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 25 %</li> <li>• Altura dominante = 25 %</li> <li>• Pendiente = 25 %</li> <li>• Orientación = 25 %</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 35 %</li> <li>• Altura dominante = 35 %</li> <li>• Pendiente = 15 %</li> <li>• Orientación = 15 %</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FCC = 40 %</li> <li>• Altura dominante = 40 %</li> <li>• Pendiente = 15 %</li> <li>• Orientación = 5 %</li> </ul>

Tabla 11. Pesos de los inputs en cada variante de la metodología 3.

#### 2.2.4 Selección de la mejor alternativa

Para facilitar la comparación de los resultados obtenidos con la situación real, se hace oportuno agrupar los rodales presentes en la actualidad según a la tipología a la que pertenezcan, es decir, si la FCC del rodal 1 es 35 % y del rodal 2 es de 40 %, ambas se encontrarán dentro de la cobertura incompleta, por lo cual dichos rodales en caso de ser coincidentes en el criterio de altura dominante y pendiente, se juntarán en uno solo, para realizar la comparación a efectos del presente estudio, presentándose en la Figura 14 el resultado de dicho proceso, así como la Tabla 12 con los rangos de cada tipología.

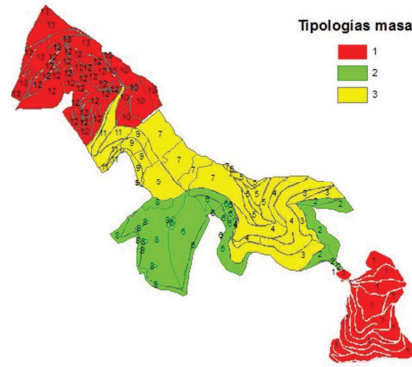


Figura 14. Tipologías de masa presentes en el monte.

Tipología	FCC	Altura
1	0 a 25	$H_0 < 10$
2	25 a 75	$10 > H_0 < 20$
3	>75	$H_0 > 20$

Tabla 12. Rangos de las tipologías.

Ha de tenerse en cuenta que dentro de las tipologías de masa, en lo referente a los rasos, se encuentran tipificados dentro de la tipología 1, la cual también engloba aquellas zonas con una altura dominante menor a 10 m y una cobertura de copas menor al 25 %.

Facilitando esta simplificación de los rodales presentes en la actualidad, la comparación con los resultados obtenidos en la determinación automática de rodales según cada una de las variantes de cada metodología.

### 3 Resultados

Se exponen en el presente apartado, los resultados obtenidos de aplicar cada una de las metodologías propuestas, así como un análisis de las mismas.

Junto con la exposición de los resultados, se realizó una extracción de los valores de las variables dasométricas, según los rodales determinados en cada variante, de modo que en su apartado correspondiente, se pudo realizar una comparación cuantitativa de dichas metodologías con la rodalización actual del monte en base a la última revisión de la ordenación.

Como se ha explicado en la metodología, los mapas raster de entrada sufrieron una asignación de sus rangos a valores discretos para facilitar la determinación automática de rodales, aun así para la extracción de los valores de las diversas variables empleadas, se usaron los mapas raster con variables continuas las cuales reflejan con mayor fidelidad las variables evaluadas.

El presente apartado, se estructura por metodologías dentro de cada una de las cuales se procedió a explicar los resultados obtenidos en cada variante del mismo, así como la extracción de valores de los mapas raster empleados.

Para realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos en la metodología frente a la rodalización actual, se generó una malla de muestreo sistemático con una densidad de 10 m, la cual se empleó para extraer los valores de cada rodal delimitado en base a la revisión de la ordenación.

### 3.1 Resultado metodología 1

#### 3.1.1 Variante 1

En la Figura 15 se presenta la rodalización obtenida siguiendo la variante 1 de la metodología 1. Como puede observarse, al haber introducido la imagen de intensidad LiDAR, las zonas rasas no se incluyeron dentro de la clasificación, apareciendo el resto del monte dividido en 5 zonas.

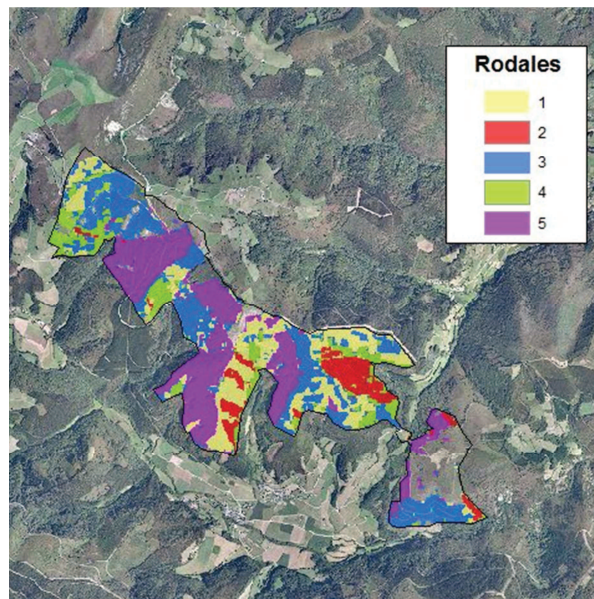


Figura 15. Rodalización de la metodología 1 variante 1.

La ventaja de esta metodología es la exacta delimitación de las zonas rasas, así como una fragmentación en zonas suficientemente variable.

Entre las desventajas, se produce una delimitación con demasiada precisión, es decir, una excesiva Rodalización tal vez causada por la imagen satélite y por la capa de orientación, ya que como se ha comentado anteriormente, en esta metodología no fue posible la asignación de pesos a las variables en función de su importancia.

La presencia de zonas consideradas como homogéneas, pero separadas espacialmente, sin posibilidad de unión ni aun mediante corredores, sugiere que debería realizarse una subdivisión de las mismas en dos rodales distintos, aun siendo estos de idénticas características, lo cual quedaría a criterio del técnico responsable, no pudiendo por medio

de este trabajo realizar dicha acción, presentándose aun así en el anexo 2, una serie de elementos auxiliares basados en procesos GIS como apoyo a la rodalización.

Respecto a los valores extraídos de los mapas raster empleados en la variante 1 de la metodología 1, se presentan en la Tabla 13, una extracción de sus medias aritméticas por rodales.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	70,92	18,47	44,28	159,63
2	78,97	20,77	54,40	76,78
3	43,33	10,24	41,95	191,57
4	64,04	14,24	47,86	138,53
5	67,99	18,10	41,11	262,78

Tabla 13. Valores medios de la rodalización de la Metodología 1 Variante 1.

### 3.1.2 Variante 2

En la variante dos, se prescindió de la imagen de intensidad LiDAR, por lo cual aparecen delimitados los rasos como zonas homogéneas, resultando el área de estudio dividida en 7 zonas (Figura 16), dichas zonas presentan errores de delimitación, lo que se observa al compararlo con la rodalización actual y los valores extraídos, estando causados por la excesiva influencia que ejerce la pendiente, la orientación y la imagen satélite, provocando fallos en la clasificación ya que aun siendo zonas homogéneas respecto a los raster dato, difieren en otros como FCC o altura dominante.

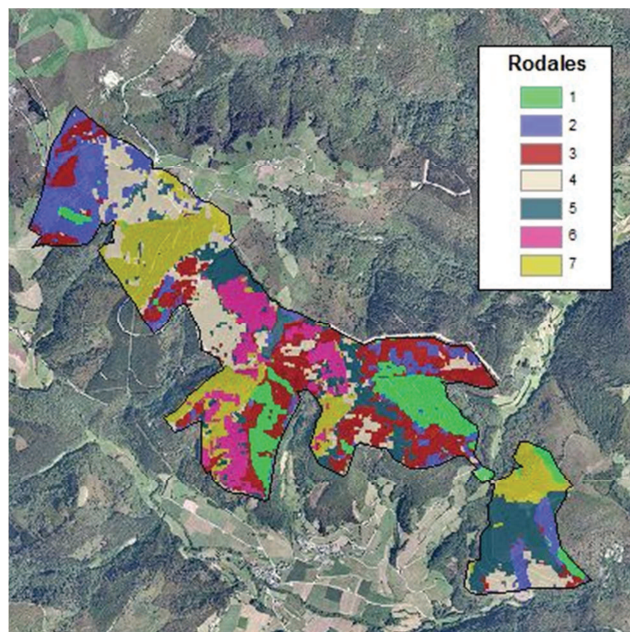


Figura 16. Rodalización de la metodología 1 variante 2.

Por el contrario, al no poder dotar a las variables de pesos, se produjo una zonificación, no una rodalización con finalidad productora, es decir, se consideraron como zonas homogéneas aquellas que poseen orientación, pendiente y valores de reflectividad similares, sin tener en cuenta los valores de altura dominante o de FCC.

Así mismo, la excesiva exactitud en la zonificación produce ruido de píxeles los cuales requieren de varios suavizados mediante filtrado para su eliminación lo que puede producir pérdida de información.

La Tabla 14 muestra los valores medios extraídos de las principales variables utilizadas en cada uno de los rodales delimitados en esta variante.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
2	32,05	8,11	43,49	143,88
3	71,40	17,49	43,82	156,46
4	45,61	10,06	45,17	216,81
5	23,33	12,23	33,93	221,18
6	86,37	23,95	42,13	228,53
7	52,58	16,05	37,41	288,25

Tabla 14. Valores medios de la rodalización de la metodología 1 variante 2.

### 3.1.3 Variante 3

En esta variante de la metodología 1, se prescindió tanto de la imagen de intensidad LiDAR, como de la imagen satélite, lo cual produjo una división de la zona de estudio en 3 zonas homogéneas (Figura 17) atendiendo a las características de altura dominante, orientación, FCC y pendiente.

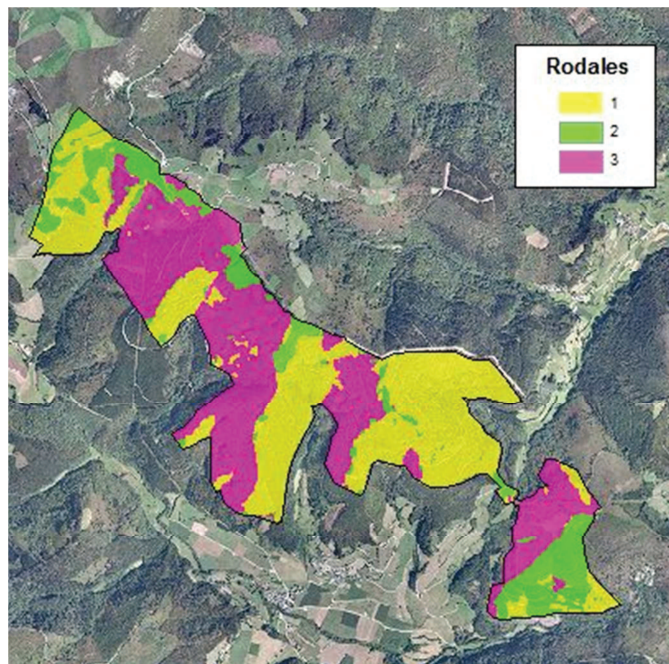


Figura 17. Rodalización de la metodología 1 variante 3.

Como ventaja de la metodología, exponer que la consistencia de los datos extraídos es coherente con los estadísticos extraídos de la rodalización actual, estando perfectamente delimitadas las zonas rasas de las arboladas, como puede observarse en la zona superior del monte donde existen dos franjas de plantación perfectamente delimitadas (Figura 18).

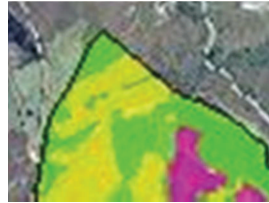


Figura 18. Detalle de las franjas de plantación en el límite norte.

Como desventaja, la común a la metodología, la cual se deriva de la imposibilidad de establecer pesos a las variables, lo que provoca que en una zona rasa o de pasto, se delimiten dos zonas a causa de su distinta orientación. Presentándose en la Tabla 15, los estadísticos extraídos:

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	67,95	17,11	46,83	139,21
2	12,64	7,79	45,67	177,09
3	54,68	15,83	39,73	258,43

Tabla 15. Valores medios de la rodalización de la metodología 1 variante 3.

### 3.2 Resultado metodología 2

La metodología 2 nos generó como resultado un raster de valores continuos (Figura 19), debiendo realizar una asignación de rangos y convertirlos a valores enteros (Figura 20) para poder determinar una rodalización, a partir de la cual se extrajeron los valores para poder realizar una valoración cuantitativa.



Figura 19. Raster resultante, en valores continuos. discretos.

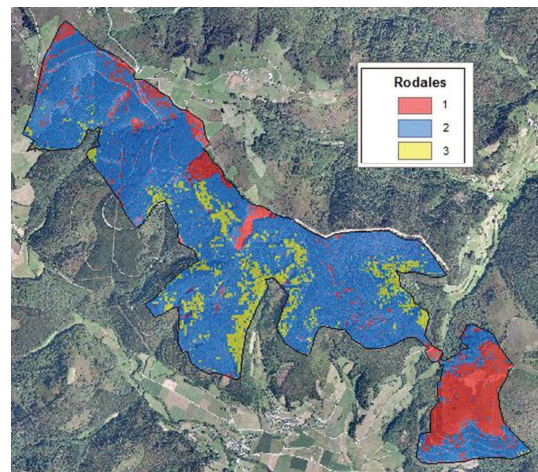


Figura 20. Raster reclasificado a valores discretos.

La determinación de rangos en los valores continuos, se realizó teniendo en cuenta rangos de valores enteros, es decir, el rango (1 a 2) corresponde al rodal 1.

### 3.2.1 Variante 1

La variante 1 de la metodología 2, generó una división en 3 zonas homogéneas (Figura 21), las cuales a priori no parecen suficientes para caracterizar la zona de estudio, aun así se puede observar como al permitir esta metodología la inclusión de pesos a los raster de entrada, se eliminaron los errores producidos por la orientación que se daban en el metodología 1.

Es por tanto una ventaja de este metodología la posibilidad de incluir pesos a las variables según la finalidad de la rodalización, observándose una muy buena diferenciación de las zonas arboladas frente a las desarboladas, no existiendo subzonificación dentro de las zonas rasas.

Una de las desventajas de la presente metodología, radica en que el resultado final no permite suavizado del ruido a causas de las limitaciones impuestas por el software, existiendo por tanto pixeles dispersos, los cuales pertenecen en su mayoría a zonas de pistas forestales, siendo este un punto a tener en cuenta en la rodalización definitiva, la cual deberá apoyarse en elementos auxiliares (Anexo 2).

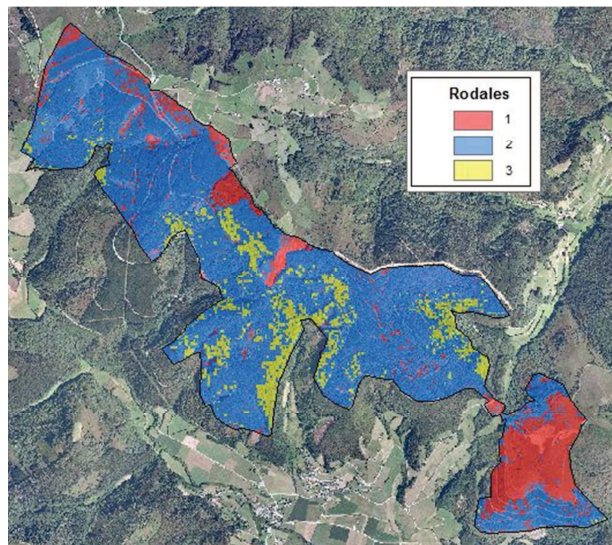


Figura 21. Rodalización de la metodología 2 variante 1.

Se presentan en la tabla 16 los valores extraídos para cada rodal, a partir de los diferentes raster de entrada en la metodología. Pudiendo observarse que aunque existe una baja variabilidad en la zonificación, puesto que solo delimita tres zonas, los valores extraídos ponen de manifiesto una determinación idónea ya que cada rodal representa fielmente una tipología de masa.



Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	3,02	2,40	30,43	213,01
2	56,91	13,75	42,62	193,98
3	91,35	24,67	52,92	178,03

Tabla 16. Valores medios de la rodalización de la metodología 2 variante 1.

### 3.2.2 Variante 2

Al igual que en la variante 1 de la metodología 2, en esta variante se modificaron los pesos, aumentando la importancia de la FCC y la altura dominante en detrimento de la pendiente y la imagen satélite, generándose nuevamente 3 zonas homogéneas (Figura 22).

Como ventaja, destacar nuevamente la buena diferenciación entre zona arbolada y rasa, habiendo aumentado la zonificación dentro de la rasa a causa de la modificación de pesos.

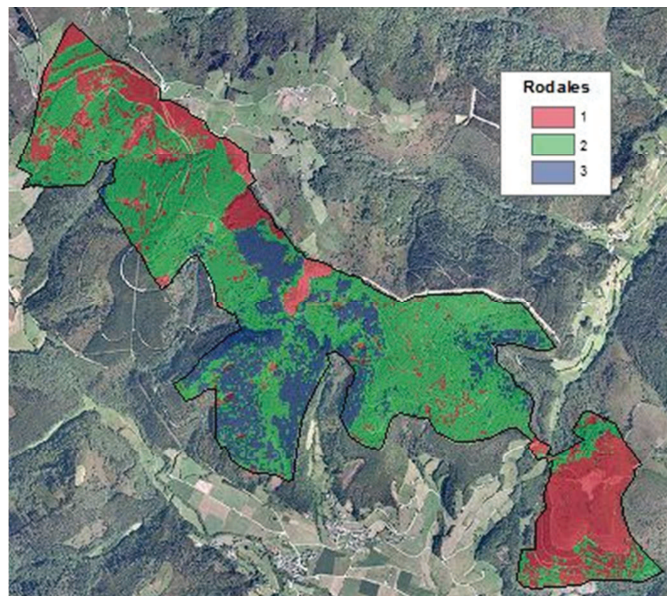


Figura 22. Rodalización de la metodología 2 variante 2.

En lo que a desventajas se refiere, se aprecia aún una baja diferenciación dentro de las zonas arboladas, además de un excesivo ruido que debido a las características del raster de salida, es imposible eliminar.

Se presentan en la Tabla 17, los estadísticos extraídos del resultado de dicha metodología.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	6,17	4,82	34,86	206,17
2	61,71	13,48	43,46	188,81
3	90,23	25,74	46,54	203,74

Tabla 17. Valores medios de la rodalización de la metodología 2 variante 2.

Donde al igual que en la variante uno de la metodología, se puede observar que se encuentran perfectamente delimitadas las tipologías de masa existentes en el monte.

### 3.2.3 Variante 3

En la variante 3 de la metodología 2, se prescindió de la imagen satélite, aparte de modificar la importancia de las variables, lo cual generó nuevamente como resultado la zonificación en 3 estratos (Figura 23).

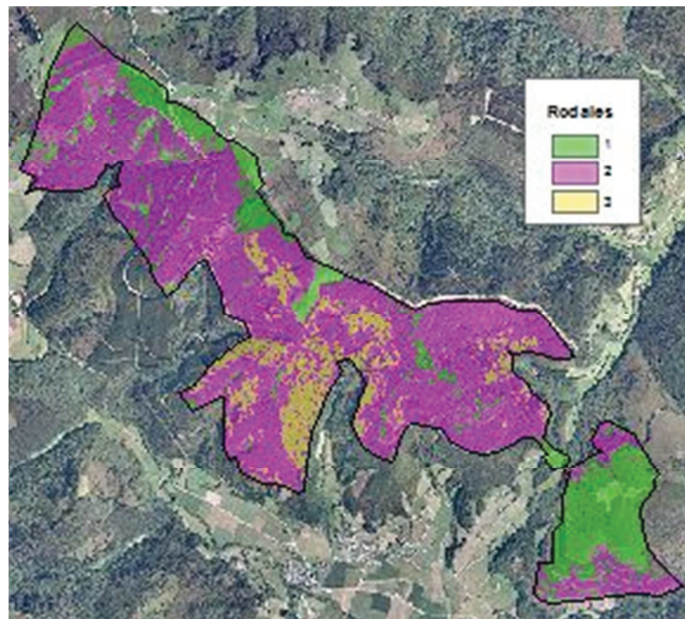


Figura 23. Rodalización de la metodología 2 variante 3.

Se pone de relieve como ventaja de la metodología, la buena diferenciación entre zonas rasas y arboladas, lo que parece ser común a la metodología, lo cual se observa en la Tabla 18, que recoge los estadísticos extraídos, en los que se encuentran representadas las tipologías presentes en el monte.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	7,81	4,82	32,42	207,40
2	61,89	14,19	43,92	189,93
3	91,02	26,87	52,06	189,79

Tabla 18. Valores medios de la rodalización de la metodología 2 variante 3.

En este caso, se dotó de mayor importancia a la pendiente, lo que se aprecia en las ligeras variaciones en la delimitación en las zonas arboladas, que aun así siguen siendo bastante similares respecto a la variante dos, de lo que se desprende que se encuentran dentro de los mismos rangos de pendiente determinados al inicio del proceso.

### 3.3 Resultado metodología 3

#### 3.3.1 Variante 1

En el metodología 3 se prescindió en sus tres variantes de la imagen satélite y de la imagen de intensidad LiDAR, empleando únicamente las capas de FCC, orientación, pendiente y altura dominante.

En la variante uno en concreto, se dotó de igual peso a las 4 variables empleadas, lo que explica que en la zona rasa de la parte inferior derecha de la zona de estudio, aparezca la misma zona subdividida en dos, obteniéndose 5 rodales (Figura 24).

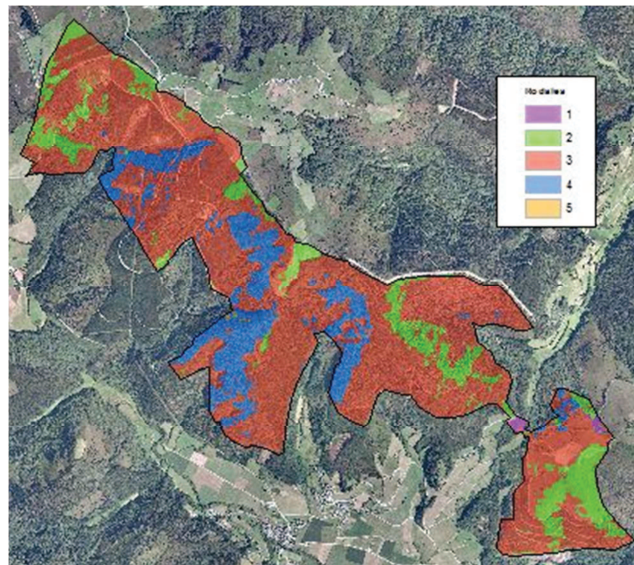


Figura 24. Rodalización de la metodología 3 variante 1.

El haber dotado de igual peso a todas las variables, provoca errores en la clasificación de zonas arboladas, delimitándose por tanto zonas erróneas lo que se observa en los datos de las variables dasométricas extraídas (Tabla 19).

Aun así el empleo de la orientación ayuda a que el resultado de la determinación automática de rodales, se asemeje a la delimitación real ya que independientemente de los criterios cuantitativos (altura dominante, FCC), se recomienda que toda rodalización se apoye de elementos naturales del terreno para la delimitación de zonas, y los cambios de orientación, se basan en la presencia de crestas o fondos de valle, pudiendo actuar estos como delimitadores naturales de los rodales.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	1,26	3,07	21,61	19,72
2	23,26	7,28	35,41	138,71
3	53,25	13,17	42,69	192,91
4	80,44	21,60	45,12	264,54
5	98,11	38,27	57,79	336,15

Tabla 19. Valores medios de la rodalización de la metodología 3 variante 1.

### 3.3.2 Variante 2

En la variante 2 de la metodología 3, se produjo una modificación de los pesos, en detrimento de la pendiente y la orientación, favoreciendo la FCC y la altura dominante como aparece reflejado en la Tabla 11 del apartado de material y métodos.

Esto provocó que se produjesen errores en la diferenciación de rasos y zonas arboladas, además de una muy baja diferenciación dentro de las zonas arboladas, quedando el monte dividido en 4 rodales (Figura 25).

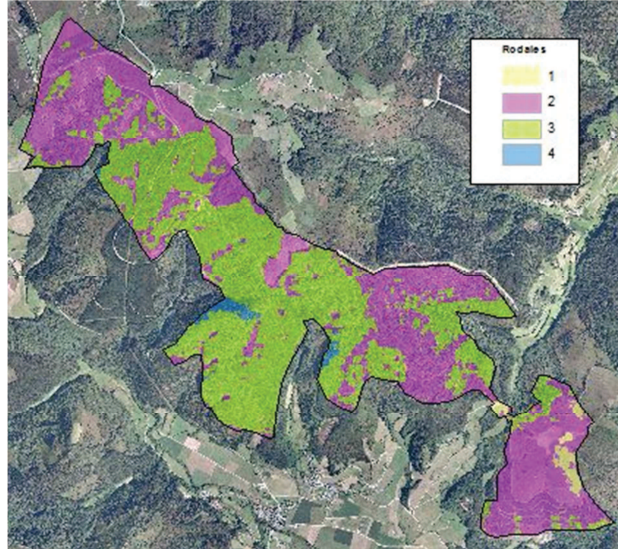


Figura 25. Rodalización de la metodología 3 variante 2.

Como se puede observar en esta metodología, se determinaron como zonas rasas aquellas que en realidad son arboladas, como puede observarse en la comparación de la tipología 2 de la Figura 24 al compararla con la rodalización de la revisión, lo que induce a errores en la extracción de variables dasométricas (Tabla 20).

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	0,84	3,16	26,50	91,71
2	30,13	8,49	39,52	181,34
3	74,90	18,22	44,55	208,56
4	90,17	30,36	48,49	305,21

Tabla 20. Valores medios de la rodalización de la metodología 3 variante 2.

### 3.3.3 Variante 3

En esta variante de la metodología 3, se redujo el peso de la orientación en favor de aumentar la importancia de las capas de FCC y altura dominante, obteniéndose como resultado una división del monte en 4 rodales (Figura 26).

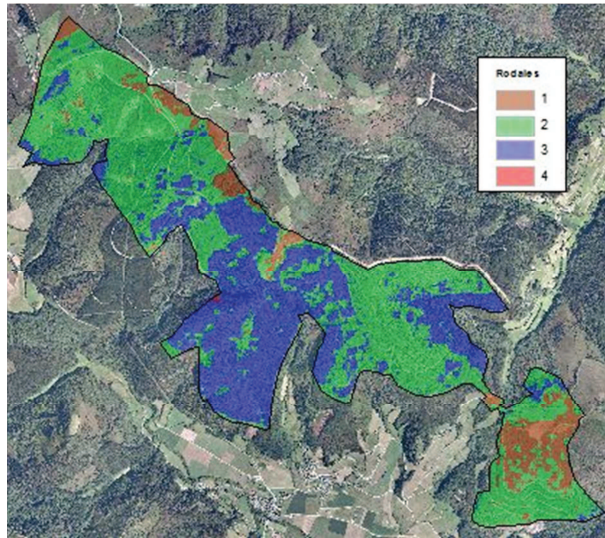


Figura 26. Rodalización de la metodología 3 variante 3.

Basándonos en la ortofoto y en la rodalización propuesta en la revisión de la ordenación, los resultados obtenidos son los más acercados a la realidad, tanto de manera objetiva como subjetiva, puesto que se obtiene una correcta diferenciación entre zonas arboladas y rasas y dentro de las arboladas se produce una buena diferenciación en función de su cobertura y su altura dominante.

Esta correcta clasificación produce que las variables extraídas (Tabla 21) posean alta consistencia y que las comparaciones con la ortofoto resulten acertadas en cuanto a la identificación de rasos o zonas arboladas con diversas pendientes.

Rodal	FCC (%)	Altura dominante (m)	Pendiente (%)	Orientación (Grados)
1	1,53	2,69	28,20	212,98
2	41,60	10,18	42,04	195,30
3	86,72	22,38	45,74	189,62
4	97,58	38,94	55,92	321,95

Tabla 21. Valores medios de la rodalización de la metodología 3 variante 3.

### 3.4 Elección de la metodología óptima

Para la elección de la metodología óptimo de las 9 propuestos, se tuvo en cuenta su semejanza visual con la rodalización actual, además de su comparación cuantitativa de las variables dasométricas extraídas.

Es por ello, que desde un primer momento, se desecharon varias metodologías, como las variantes 1 y 2 de la metodología 1, debido a que su excesiva zonificación, influida por la imagen satélite y de intensidad LiDAR, produjeron una baja consistencia en cuanto a las variables dasométricas extraídas, de lo cual se desprende que las zonas determinadas

como homogéneas, no se determinan de acuerdo a los criterios dasométricos que interesan de cara a una rodalización de un monte productor.

Respecto a la variante 3 de la metodología 1, si bien es cierto que la determinación de rodales guarda cierta semejanza con la rodalización existente, de un modo cualitativo, los valores extraídos, pusieron de manifiesto que dicha semejanza no se basa en criterios dasométricos, sino más bien en los concernientes a la pendiente y orientación, puesto que de hecho, la misma zona rasa determinada como un mismo rodal en la revisión de la ordenación, en el resultado de la variante 3, aparece dividida en dos, a causa del excesivo peso que el mapa raster de orientación ejerció sobre la clasificación.

En cuanto a la metodología 2, sus tres variantes poseen idéntica zonificación en cuanto al número de zonas determinadas, además de presentar semejanza en cuanto a las variables extraídas respecto a la rodalización existente.

Como desventaja, únicamente se produce la determinación de tres zonas homogéneas, lo cual representaría una muy baja rodalización para un monte de las características del empleado en este estudio, aun así, recordar que la rodalización, ha de llevarse a cabo teniendo como referencia elementos naturales que apoyen la delimitación de los rodales y que dentro de un mismo monte pueden darse zonas homogéneas separadas espacialmente, lo que además nos permitiría no incurrir en una excesiva rodalización del monte, problema habitual en la gestión actual, pudiendo determinar rodales de mayor superficie, reduciendo por tanto los esfuerzos de gestión y mejorando su rendimiento económico.

De modo que respecto a las variantes de la metodología 2, las tres se consideraron aptas en una primera aproximación tanto visual como de las variables dasométricas extraídas, debiendo determinar cuál de ellas reflejaría más fielmente la realidad.

En cuanto a la variante 1 de la metodología 2, la zona determinada como rodal 3, aparte de ser de muy baja extensión, aparece demasiado dispersa, lo que viene determinado por haber dotado de idéntico peso a todos los mapas raster de entrada.

Sin embargo, las variantes 2 y 3, de la metodología 2, poseían una buena delimitación de los rodales, tanto cuantitativa como cualitativamente, debiendo pues comparar ambas con la situación actual en base a sus estadísticos extraídos.

Pudiendo observar en base a las tipologías determinadas en la situación actual, como la variante dos y tres de la metodología 2, son muy cercanas a la situación real del monte, existiendo cambios en la determinación de rodales a causa de los rangos de pendientes y orientaciones.

Aun así, dentro de estas dos variantes, visualmente, se observa que la variante 2, posee una mejor diferenciación entre la tipología dos y tres, presentó menor ruido que la variante 3.

Respecto a la metodología 3, es la variante tres la que mejor resultado produce, ya que diferenció con gran nivel de detalle las zonas rasas de las arboladas, como puede observarse en las líneas de plantación de la parte norte del monte (Fig.17), además de cuadrar con las tipologías de masa extraídas de la rodalización actual, estando las variaciones determinadas por las pendientes y las orientaciones, no produciendo aun así una excesiva zonificación.

Es por eso, que se determina la variante tres de la metodología tres, como la metodología óptima para la determinación automática de rodales, puesto que:

- Diferencia zonas rasas de arboladas con alto nivel de detalle.
- Produce zonificación suficientemente variable.
- Delimita zonas de alta extensión superficial.
- Representa las tipologías de masa presentes en el monte.
- El raster resultante permite suavizado y conversión a formato vectorial.

## 4 Conclusiones

Las nuevas tecnologías emergentes, así como el aumento de la disponibilidad de datos de imágenes satélite y LiDAR, suponen en el futuro un cambio en la gestión referida al medio natural, ya que como se observa a lo largo del presente trabajo, los resultados obtenidos permiten una disminución del esfuerzo de gestión.

Como se ha explicado a lo largo del documento, los resultados determinados como óptimos proporcionan una muy buena aproximación a la realidad, minimizando los costes y el tiempo necesario respecto a la metodología tradicional, debiendo tenerse presente que en ningún momento pueden sustituir completamente los muestreos de campo, pero si serán de gran utilidad en la minimización del coste de los mismos y en la posibilidad de desarrollarlos de una manera mucho más eficiente.

El método seleccionado como óptimo, posee el valor añadido de eliminar la excesiva rodalización, lo cual supone en el modelo de gestión actual un problema habitual de los montes asturianos, además de facilitar el empleo de un modelo de gestión basado en la ordenación por rodales, el cual se presenta como un modelo doblemente eficaz, tanto en el rendimiento del aprovechamiento, como en la capacidad del mismo para mantener los montes en un estado natural más beneficioso para el ecosistema.

## 5 Bibliografía

1. BUKATA *et al.* Use of chromaticity in remote measurements of water quality Remote Sensing of Environment. (1987).
2. Cabrera J.A.W., Manejo del ENVI 4.5 (2012).
3. Eysn *et al.* Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data, (2012)
4. Earth resource mapping Pty Ltd, ErMapper Tutorial, (2002).
5. Ersi White paper, LiDAR Analysis in Arcgis 10<sup>®</sup> for Forestry applications, (2011).
6. Gonçaves *et al.* Land cover classification of rural areas using LiDAR data: a comparative study in the context of fire risk (2007)
7. Jeong-Heon Song *et al.* ASSESSING THE POSSIBILITY OF LAND-COVER CLASSIFICATION USING LIDAR INTENSITY DATA. (2006).
8. Marshall H. LiDAR Lab exercises, Interpine Forestry Ltd. (2013).
9. Mustonen, J. *et al.* *Automatic segmentation of forest stands using a canopy height model and aerial photography. Scand. J. Forest Res. (2008).*
10. Oerka *et al.* UTILIZING AIRBORNE LASER INTENSITY FOR TREE SPECIES (2007).
11. Straub, C *et al.* A Fully Automated Procedure for Delineation and Classification of Forest and Non-Forest Vegetation Based on Full Waveform Laser Scanner Data. (2008).
12. USDA, Fusion/LDV Manual, (2014).
13. Wang, Z.Y. *et al.* *Integration of High Resolution Aerial Images and Airborne Lidar Data for Forest Delineation. In Proceedings of The ISPRS XXI Congress, Beijing, China, 3–11 July 2008.*
14. Wang, Z *et al.* *Forest delineation of aerial images with “Gabor” wavelets. Int. J. Remote Sens. 2011, 33, 2196-2213.*



## **Anexo 1**

*Estadísticos descriptivos de los rodales obtenidos en cada metodología*

## Estadísticos Metodología 1 Variante 1

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	69,83	23,12	0	100	4351
2	78,05	22,76	0	100	1778
3	43,33	26,42	0	100	6080
4	63,97	29,34	0	100	2463
5	67,87	27,10	0	100	6464

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	18,38	7,37	2	42	4351
2	20,92	7,56	2	43	1778
3	10,24	5,43	2	38	6080
4	14,34	7,60	2	45	2463
5	18,17	8,41	2	49	6464

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	44,72	10,43	1,76	89,80	4351
2	53,84	11,78	7,07	123	1778
3	41,95	11,53	3,53	97,62	6080
4	47,38	11,93	7,90	107,96	2463
5	40,97	10,19	1,76	83	6464

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	160,07	32,10	15,25	270	4351
2	79,45	37,71	0	357,13	1778
3	191,57	37,86	17,24	351,86	6080
4	137,69	31,18	4,39	298,30	2463
5	261,75	37,48	0	357,87	6464

## Estadísticos Metodología 1 Variante 2

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	75,25	27,67	0	100	2402
2	32,05	28,59	0	100	3696
3	71,40	21,77	0	100	4704
4	45,61	28,50	0	100	3951
5	23,33	27,25	0	95	3610
6	86,37	8,61	0	100	2182
7	52,58	33,96	0	100	4328

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	21,17	7,86	2	45	2402
2	8,11	6,99	0	42	3696
3	17,49	7,04	2	45	4704
4	10,06	5,77	2	38	3951
5	12,23	6,41	2	35	3610
6	23,95	3,19	8	40	2182
7	16,05	9,04	2	49	4328

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	51,39	13,18	0	118,84	2402
2	43,49	12,61	1,76	98,04	3696
3	43,82	11,34	5	123	4704
4	45,17	11,05	3,53	88,67	3951
5	33,93	10,52	1,76	67,75	3610
6	42,13	8,31	10	67,26	2182
7	37,41	11,92	1,76	83	4328

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	79,95	40,41	-1	358,15	2402
2	143,88	26,43	67,24	246,80	3696
3	156,46	26,49	59,03	246,80	4704
4	216,81	30,59	152,24	333,43	3951
5	221,18	31,76	149,03	296,56	3610
6	228,53	22,8	158,49	297,47	2182
7	288,25	32,97	0	358,72	4328

### Estadísticos Metodología 1 Variante 3

#### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	67,95	24,09	0	100	10373
2	12,64	18,22	0	97	4246
3	54,68	33,59	0	100	10358

#### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	16,88	7,74	0	45	10373
2	7,79	4,70	2	30	4246
3	15,83	8,61	2	49	10358

#### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	46,83	11,45	0	123	10373
2	35,67	12,72	1,76	69,73	4246
3	39,73	11,54	1,76	83	10358

#### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	139,21	44,25	-1	357,13	10373
2	177,09	40,83	0	348,09	4246
3	258,43	37,29	0	358,72	10358

## Estadísticos Metodología 2 Variante 1

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	3,02	6,06	0	65	3331
2	56,91	27,9	0	100	17877
3	91,35	7,42	27	100	2583

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	2,40	4,74	0	30	3331
2	13,75	7,82	2	49	17877
3	24,67	7,14	2	45	2583

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	30,43	11,06	0	63,09	3331
2	42,62	11,26	1,76	129	17877
3	52,92	9,87	12,5	118,84	2583

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	213,01	73,46	-1	358,15	3331
2	193,98	65,41	0	358,72	17877
3	178,03	75,65	1,39	359,7	2583

## Estadísticos Metodología 2 Variante 2

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	6,17	8,11	0	65	5859
2	61,71	21,53	0	100	13806
3	90,23	6,76	76	100	4194

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	4,82	4,63	2	35	5859
2	13,48	6,52	2	42	13806
3	25,74	5,21	2	49	4194

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	34,86	12,06	0	82,84	5859
2	43,46	12,01	1,76	123	13806
3	46,54	10,53	6,37	114,01	4194

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	206,17	67,7	-1	358,15	5859
2	188,81	67,35	0	358,72	13806
3	203,74	68,84	1,39	356,38	4194

## Estadísticos Metodología 2 Variante 3

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	7,81	13,10	0	75	5700
2	61,89	24,76	0	100	15764
3	91,02	6,65	76	100	2686

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	4,82	4,59	2	35	5700
2	14,19	7,17	2	45	15764
3	26,87	5,52	2	49	2686

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	32,42	11,66	0	66,63	5700
2	43,92	10,90	1,76	123	15764
3	52,06	9,02	16,29	114,08	2686

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	207,40	67,86	-1	358,15	5700
2	189,93	64,64	0	358,72	15764
3	189,79	76,96	2,29	355,42	2686

## Estadísticos Metodología 3 Variante 1

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	1,26	3,83	0	27	99
2	23,26	28,78	0	100	3461
3	53,25	32,25	0	100	17881
4	80,44	17,13	5	100	3618
5	98,11	2,4	92	100	18

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	3,07	2,99	2	15	99
2	7,28	6,01	2	42	3461
3	13,17	8,54	2	49	17881
4	21,6	7,54	2	45	3618
5	38,27	3,31	29	43	18

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	21,61	15,8	0	47,43	99
2	35,41	12,99	1,76	73,33	3461
3	42,69	12,39	1,76	123	17881
4	45,12	9,38	6,37	98,04	3618
5	57,79	9,87	45,96	82,84	18

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	19,72	36,73	-1	348,69	99
2	138,61	55,9	0	357,13	3461
3	192,91	62,08	0	358,15	17881
4	264,54	38,44	0	358,72	3618
5	336,15	14,15	315	355,42	18



## Estadísticos Metodología 3 Variante 2

### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	0,84	3,51	0	34	356
2	30,13	27,38	0	100	11858
3	74,90	22,04	0	100	12564
4	90,17	7,8	52	100	297

### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	0,84	3,51	0	34	356
2	30,13	27,38	0	100	11858
3	74,90	22,04	0	100	12564
4	90,17	7,8	52	100	297

### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	26,5	12,58	0	48	356
2	39,52	12,69	1,76	89,80	11858
3	44,55	11,5	1,76	123	12564
4	48,49	10,46	18,45	83	297

### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	91,71	52,45	-1	348,69	356
2	181,34	62,25	0	358,15	11858
3	208,56	67,86	0	358,72	12564
4	305,21	39,32	0	355,42	297

### Estadísticos Metodología 3 Variante 3

#### *Fracción de Cobertura*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	1,53	4,66	0	64	2400
2	41,60	26,31	0	100	14295
3	86,72	10,47	12	100	8367
4	97,58	2,61	92	100	17

#### *Altura dominante*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	2,69	2,43	2	30	2400
2	10,18	6,09	2	40	14295
3	22,38	6,72	2	49	8367
4	38,94	3,26	29	43	17

#### *Pendiente*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	28,20	11,23	0	63,88	2400
2	42,04	11,77	1,76	123	14295
3	45,74	11,21	2,5	118,84	8367
4	55,92	10,51	42,01	82,84	17

#### *Orientación*

Rodal	Media aritmética	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Tamaño muestral
1	212,98	74,56	-1	358,02	2400
2	195,30	64,91	0	358,72	14295
3	189,62	71,14	0	357,13	8367
4	321,95	17,04	295,2	354,80	17

## **Anexo 2**

*Elementos auxiliares a la determinación automática de rodales*

Para facilitar la labor de rodalización, si bien es cierto que se delimitan rodales homogéneos de manera automática, no se tienen en cuenta los accidentes geomorfológicos de la zona de estudio, es por ello, que propone una serie de elementos generados mediante el sistema de información geográfica Arcgis 10 y partiendo de los datos LiDAR empleados en el estudio, los cuales servirán de gran ayuda a la rodalización.

Dicho proceso, se apoyará en la digitalización automática de los rodales en base a elementos naturales e inamovibles del terreno que servirán para delimitar estos de manera natural e inequívoca.

Por ello, se emplea la herramienta *hillshade* la cual nos genera a partir del modelo digital de elevaciones un modelo de sombras en el cual se resaltarán los fondos de valle y las cumbres las cuales se digitalizan (Fig.1) para ayudarnos en nuestro propósito.

De igual manera ocurre con las pistas principales y/o secundarias del monte, que también nos servirán de frontera natural de los rodales además de ayudarnos a planificar el acceso a los mismos mejorando la efectividad del aprovechamiento o gestión.

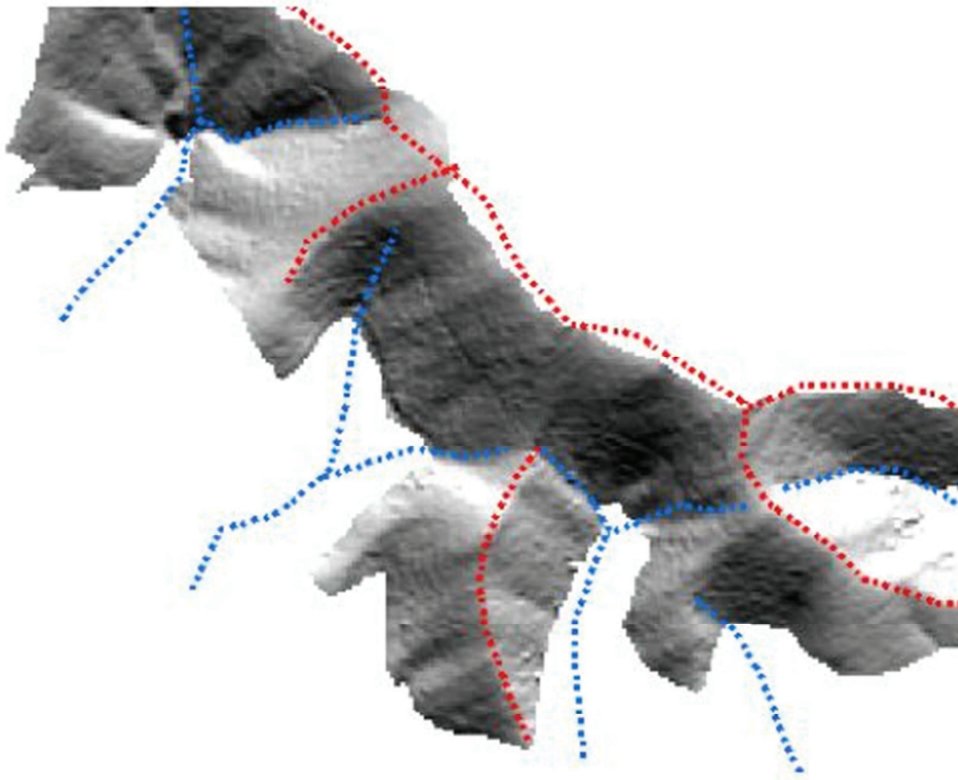
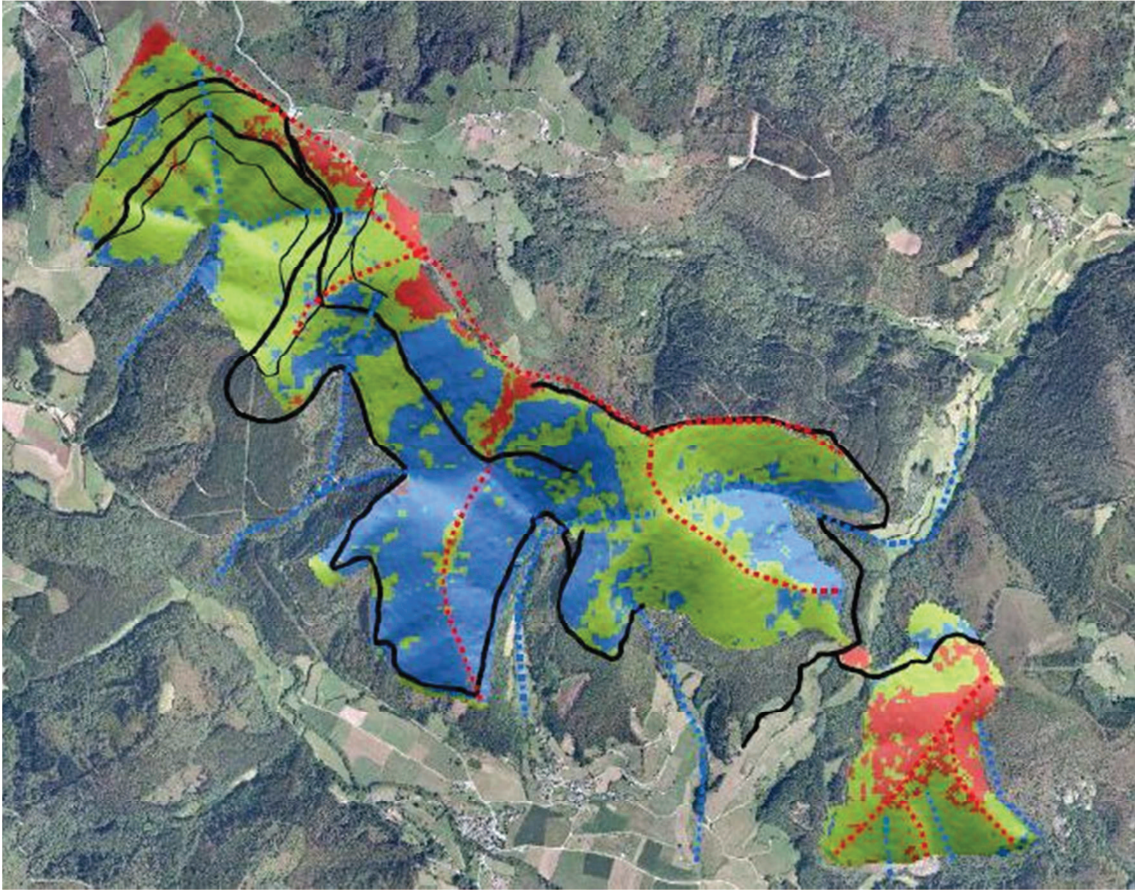


Fig.1. Raster de sombras con cumbres y fondos de valle digitalizados.

Superponiendo posteriormente dichas capas vectoriales al mapa de rodales, pudiendo incluso emplear el mapa de sombras como base a la capa de rodales la cual será semitransparente, con la finalidad de facilitar la interpretación del conjunto, quedando un resultado como en la Fig. 2, sobre el que se han añadido además las pistas principales y la ortofotografía del área de estudio.



*Fig. 2. Elementos auxiliares para la digitalización de los rodales definitivos.*

## **Anexo 3**

### *Planos*

<b>Plano 1/10</b>	<b>Metodología 1 Variante 1</b>
<b>Plano 2/10</b>	<b>Metodología 1 Variante 2</b>
<b>Plano 3/10</b>	<b>Metodología 1 Variante 3</b>
<b>Plano 4/10</b>	<b>Metodología 2 Variante 1</b>
<b>Plano 5/10</b>	<b>Metodología 2 Variante 2</b>
<b>Plano 6/10</b>	<b>Metodología 2 Variante 3</b>
<b>Plano 7/10</b>	<b>Metodología 3 Variante 1</b>
<b>Plano 8/10</b>	<b>Metodología 3 Variante 2</b>
<b>Plano 9/10</b>	<b>Metodología 3 Variante 3</b>
<b>Plano 10/10</b>	<b>Metodología óptima con elementos auxiliares a la rodalización</b>