



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA,
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO EN
INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

*Cartografía de modelos
de combustible forestal
mediante imágenes de satélite
y LiDAR aerotransportado*

Autor

ALBERTO MONS GARCÍA

Tutores

ALFONSO FERNÁNDEZ SARRÍA
MARU PORRES DE LA HAZA

Valencia 2015

CARTOGRAFÍA DE MODELOS DE COMBUSTIBLE FORESTAL MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE Y LIDAR AEROTRANSPORTADO

Resumen

En el contexto de la lucha contra incendios, el presente trabajo desarrolla una metodología que permite la clasificación de la cubierta vegetal en función de su combustibilidad. La zona escogida para llevar a cabo este estudio ha sido la Devesa del Saler, localizada en el Parque Natural de la Albufera de Valencia. Los datos empleados fueron obtenidos desde sensores remotos: imágenes capturadas por el satélite QuickBird y nubes de puntos adquiridas por el sistema LiDAR montado en un avión.

En primer lugar, fue necesario aplicar un preprocesado a los datos de partida. Por un lado, se han fusionado por el método de componentes principales las imágenes pancromáticas y multiespectrales capturadas por el satélite QuickBird. De esta forma, se obtiene una imagen que combina la elevada resolución espacial del sensor pancromático con la información espectral de las cuatro bandas del sensor multiespectral. De la imagen resultante, se ha calculado el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI), que ofrece información sobre el estado de la vegetación según su vigor. Por otro lado, se ha filtrado la nube de puntos LiDAR para eliminar los *outliers* y generar los modelos de elevaciones, tanto el modelo digital de superficie (MDS) como el modelo digital del terreno (MDT). Mediante la diferencia de ambos, se consigue el modelo digital de superficie normalizado (MDSn), que muestra las alturas de los objetos que se encuentran sobre la superficie.

Una vez calculados el MDSn y el NDVI, se han definido los respectivos rangos de valores que permitirán su umbralización. Para el MDSn, se han establecido tres grupos de vegetación basados en la clasificación que propone el modelo del proyecto europeo Prometheus: pasto, matorral y arbolado. En cuanto al NDVI, se ha fijado un primer valor que sirve como frontera, de modo que todos los píxeles con un valor inferior se considera que no pertenecen a la vegetación. Dado que para los píxeles restantes ya se tiene la certeza de que pertenecen a la vegetación, se ha fijado un segundo umbral que los divide dependiendo de si presentan un NDVI alto o bajo.

Para terminar, se han combinado ambos resultados ya umbralizados para obtener el modelo de combustible, que presenta un total de seis clases diferentes, ya que cada uno de los tres grupos de vegetación (pasto, matorral y arbolado) se divide en dos (NDVI alto y NDVI bajo).

Palabras clave: *satélite, LiDAR, vegetación, NDVI, MDS, MDT, combustibilidad.*

CARTOGRAFIA DE MODELS DE COMBUSTIBLE FORESTAL MITJANÇANT IMATGES DE SATÈL·LIT I LIDAR AEROTRANSPORTAT

Resum

En el context de la lluita contra incendis, aquest treball proposa una metodologia que permet la classificació de la coberta vegetal en funció de la seua combustibilitat. La zona triada per a dur a terme aquest estudi ha sigut la Devesa del Saler, localitzada al Parc Natural de l'Albufera de València. Les dades empleades van ser obtingudes des de sensors remots: imatges capturades pel satèl·lit QuickBird i núvols de punts adquirits pel sistema LiDAR muntat en un avió.

En primer lloc, va ser necessari aplicar un preprocessat a les dades de partida. D'una banda, s'han fusionat pel mètode de components principals les imatges pancromàtiques i multiespectrales capturades pel satèl·lit QuickBird. D'aquesta manera, s'obté una imatge que combina l'elevada resolució espacial del sensor pancromàtic amb la informació espectral de les quatre bandes del sensor multiespectral. De la imatge resultant, s'ha calculat l'Índex Normalitzat Diferencial de Vegetació (NDVI), que ofereix informació sobre l'estat de la vegetació segons el seu vigor. D'altra banda, s'ha filtrat el núvol de punts LiDAR per a eliminar els *outliers* i generar els models d'elevacions, tant el model digital de superfície (MDS) com el model digital del terreny (MDT). Mitjançant la diferència d'ambdós, s'aconsegueix el model digital de superfície normalitzat (MDSn), que mostra les alçàries dels objectes que es troben sobre la superfície.

Una vegada calculats el MDSn i el NDVI, s'han definit els respectius rangs de valors que permetran la seua llindejarització. Per al MDSn, s'han establert tres grups de vegetació basats en la classificació que proposa el model del projecte europeu Prometheus: past, matoll i arbratge. Quant al NDVI, s'ha fixat un primer valor que serveix com a frontera, de manera que tots els píxels amb un valor inferior es considera que no pertanyen a la vegetació. Com que per a la resta de píxels ja es té la certesa que pertanyen a la vegetació, s'ha fixat un segon llindar que els divideix depenent de si presenten un NDVI alt o baix.

Per a acabar, s'han combinat ambdós resultats ja llindejaritzats per a obtenir el model de combustible, que presenta un total de sis classes diferents, ja que cadascú dels tres grups de vegetació (past, matoll i arbratge) es divideix en dos (NDVI alt i NDVI baix).

Paraules clau: satèl·lit, LiDAR, vegetació, NDVI, MDS, MDT, combustibilitat.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Zona de estudio	5
4. Datos de partida	9
4.1 Imágenes de satélite	9
4.2 Datos LiDAR	12
4.3 Ortofotografía PNOA	15
5. Metodología	17
5.1 Esquema del proceso	18
5.2 Software empleado	19
5.3 Tratamiento de las imágenes de satélite	20
5.3.1 Preprocesado.....	20
5.3.3 NDVI	26
5.4. Tratamiento de los datos LiDAR	28
5.4.1. Preprocesado.....	28
5.4.2. Modelos Digitales de Elevaciones	31
6. Resultados	37
6.1. Umbralización NDVI	37
6.2. Umbralización MDSn	39
6.3. Modelo de combustible	43
6.4. Segmentación	46
7. Conclusiones	47
8. Referencias	49
9. Agradecimientos	51
10. Anexos	53

Índice de figuras

Figura 3.1. Península Ibérica	6
Figura 3.2. Costa mediterránea	6
Figura 3.3. Albufera de Valencia.....	6
Figura 3.4. Límite de la zona de estudio.....	7
Figura 4.1. Espectro electromagnético	10
Figura 4.2. Imágenes pancromáticas.....	11
Figura 4.3. Imágenes multiespectrales.....	11
Figura 4.4. Sistema LiDAR	12
Figura 4.5. Cobertura LiDAR del Proyecto PNOA.....	13
Figura 4.6. Extracción de datos LiDAR	14
Figura 4.7. Archivos LiDAR.....	14
Figura 4.1. Ortofotografías PNOA.....	16
Figura 5.1. Esquema del proceso	18
Figura 5.2. Herramienta cambio de proyección	20
Figura 5.3. Herramienta cambio de tamaño de píxel	21
Figura 5.4. Herramienta recorte de la zona.....	21
Figura 5.5. Coordenadas del recorte.....	22
Figura 5.6. Gráfica componentes principales	23
Figura 5.7. Estadísticas CP1 y Pan	23
Figura 5.8. Estadísticas CP1 y PanAj	24
Figura 5.9. Detalle pancromática	25
Figura 5.10. Detalle multiespectral.....	25
Figura 5.11. Detalle fusionada.....	25
Figura 5.12. Detalle color natural	27
Figura 5.13. Detalle NDVI.....	27
Figura 5.14. Herramienta creación shapefile.....	28
Figura 5.15. Shapefile límite de la zona sobre ortofoto	29
Figura 5.16. Datos LiDAR tras el recorte	30
Figura 5.17. MDS zona completa	35
Figura 5.18. MDT zona completa.....	35
Figura 5.19. MDS zoom detalle.....	35
Figura 5.20. MDT zoom detalle	35
Figura 5.21. MDSn zoom detalle edificios	36
Figura 6.1. Valores NDVI no vegetación.....	37
Figura 6.2. Valores NDVI vegetación	38

Figura 6.3. Comparación color natural, NDVI y NDVI umbralizado	39
Figura 6.4. Detalle color natural.....	40
Figura 6.5. Detalle MDSn	40
Figura 6.6. Pasto	41
Figura 6.7. Matorral.....	41
Figura 6.8. Arbolado.....	42
Figura 6.9. Dunas	42
Figura 6.10. Valores asignados al NDVI y MDSn umbralizados	43
Figura 6.11. Resultado multiplicación valores NDVI y MDSn umbralizados.....	44
Figura 6.12. Nuevos valores asignados al NDVI y MDSn umbralizados	44
Figura 6.13. Nuevo resultado multiplicación valores NDVI y MDSn umbralizados .	45
Figura 6.14. Detalle resultado modelo de combustible	45
Figura 6.15. Los tres grupos de bosque según Prometheus.....	46

1. Introducción

A lo largo de la historia, las diferentes civilizaciones han sentido la necesidad de representar su entorno con el objetivo de gestionar sus recursos. Con el paso de los años, el desarrollado de técnicas de posicionamiento global permitió obtener datos cada vez más precisos. Sin embargo, las nuevas tecnologías han revolucionado por completo la forma de percibir nuestro entorno. Hoy en día, disponemos de herramientas capaces de obtener enormes cantidades de información espacial de forma remota y nuestra labor consiste en desarrollar aplicaciones que hasta hace escasos años eran difícilmente imaginables.

En el campo de la lucha contra incendios, el conocimiento de la distribución de la vegetación y de su estructura vertical juega un papel fundamental en la predicción del comportamiento del fuego. Esta información se obtiene a partir del sistema LIDAR, que en combinación con la información espectral de las imágenes satelitales de alta resolución, permite una clasificación precisa de las diferentes cubiertas vegetales en función de su combustibilidad. El resultado de esta clasificación es lo que se denomina modelo de combustible, gracias al cual es posible planificar los recursos necesarios para la prevención y extinción de incendios.

2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es establecer una metodología que automatice lo máximo posible la generación de modelos de combustible de alta resolución. Para alcanzar este objetivo, se extraerá información del terreno a partir de la información multispectral de las imágenes satelitales y de las alturas obtenidas por los datos LiDAR. Para ello, se planteará una técnica que facilite el tratamiento de imágenes de satélite y de nubes de puntos LiDAR.

Teniendo en cuenta que disponemos de dos fuentes de datos, se obtendrán dos resultados distintos. Con las imágenes de satélite se creará un mapa del vigor vegetativo, a través del NDVI. Por otra parte, mediante del análisis de los datos LiDAR se generarán los modelos de elevaciones (MDS y MDT), que permitirán la creación de un mapa de alturas de los objetos que se encuentran sobre la superficie (MDSn). Combinando la información que ofrecen ambos mapas se alcanzará el modelo de combustible deseado.

Otro objetivo a destacar, es el deseo de poner de manifiesto la sustancial mejora de los resultados de los modelos de combustible gracias a la sinergia entre la información extraída de los diferentes sensores remotos.

Así mismo, en este trabajo se elaborará un estudio del tipo, estado y distribución de la vegetación existente en la Devesa del Saler (Albufera de Valencia) que permitirá a los expertos en medio ambiente llevar a cabo una gestión forestal sostenible.

3. Zona de estudio

La zona elegida para llevar a cabo este trabajo ha sido la Devesa del Saler, localizada en el Parque Natural de la Albufera de Valencia.

La Devesa del Saler forma parte de la restinga que encierra la Albufera de Valencia y la separa del mar Mediterráneo. Presenta una anchura máxima de 1 km, una longitud de unos 10 km y una superficie aproximada de 800 ha.

Su formación se debe a una antigua bahía que quedó encerrada a causa de los sedimentos transportados por la deriva litoral. Actualmente, la Albufera está comunicada con el mar a través de tres canales: la gola de Puchol, la gola del Perellonet y la gola del Perelló.

La zona de estudio está delimitada al norte por las instalaciones del Polideportivo El Saler, al sur por la Gola del Perellonet, al oeste por la carretera CV-500 y al este por el mar Mediterráneo.



Figura 3.1. Península Ibérica



Figura 3.2. Costa mediterránea



Figura 3.3. Albufera de Valencia



Figura 3.4. Límite de la zona de estudio

Cabe destacar que durante la década de los 60 y 70, se produjo un proceso de urbanización que alteró notablemente el entorno. Se arrasó una parte importante de las dunas y se construyeron edificios, viales, aparcamientos, un campo de golf... Sin embargo, desde 1979 (año de las primeras elecciones municipales democráticas tras la dictadura franquista) se ha desarrollado una política activa de recuperación del espacio natural destruido, favoreciendo la regeneración de las dunas (Sanjaume y Pardo, 2011).

4. Datos de partida

4.1 Imágenes de satélite

Las imágenes empleadas en este trabajo fueron facilitadas por el departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica.

Se trata de imágenes adquiridas por el satélite QuickBird, puesto en órbita en el año 2001 a una altura de 450 km.

Disponemos de dos imágenes capturadas por el sensor pancromático y otras dos capturadas por el sensor multiespectral, tomadas a fecha de 9 de abril de 2006. Se encuentran georreferenciadas respecto al sistema de referencia WGS84, en la proyección UTM zona 30N.

Por un lado, la resolución espacial es de 0.61 metros en el pancromático y de 2.44 metros en el multiespectral. Por otro lado, respecto a la resolución espectral, a parte del pancromático dispone de cuatro bandas correspondientes con los siguientes rangos del espectro electromagnético:

INFRARROJO	ROJO	VERDE	AZUL
760 – 900 nm	630 – 690 nm	520 – 600 nm	450 – 520 nm

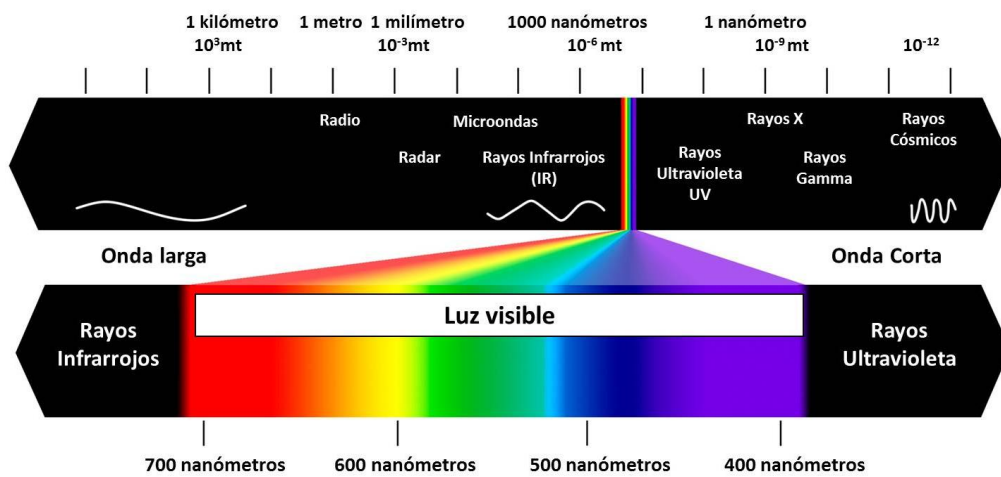


Figura 4.1. Espectro electromagnético

En cuanto al tamaño de las imágenes, todas ocupan la misma extensión, ya que la relación entre el tamaño de pixel y el número de filas y columnas es proporcional. Cada imagen pancromática contiene 16384 filas y columnas, siendo el tamaño de pixel de 0.6 metros. Mientras que la imagen multiespectral contiene 4906 filas y columnas, siendo el tamaño de pixel de 2.4.

$\text{Extensión}_{\text{PAN}} = 16384^2 \cdot 0,6^2 = 96636764,16\text{m}^2$ $\text{Extensión}_{\text{MS}} = 4906^2 \cdot 2,4^2 = 96636764,16\text{m}^2$

De esta manera, se obtiene un área total de casi 10000 hectáreas, de la que se recortará la zona de estudio para reducir el volumen de datos.

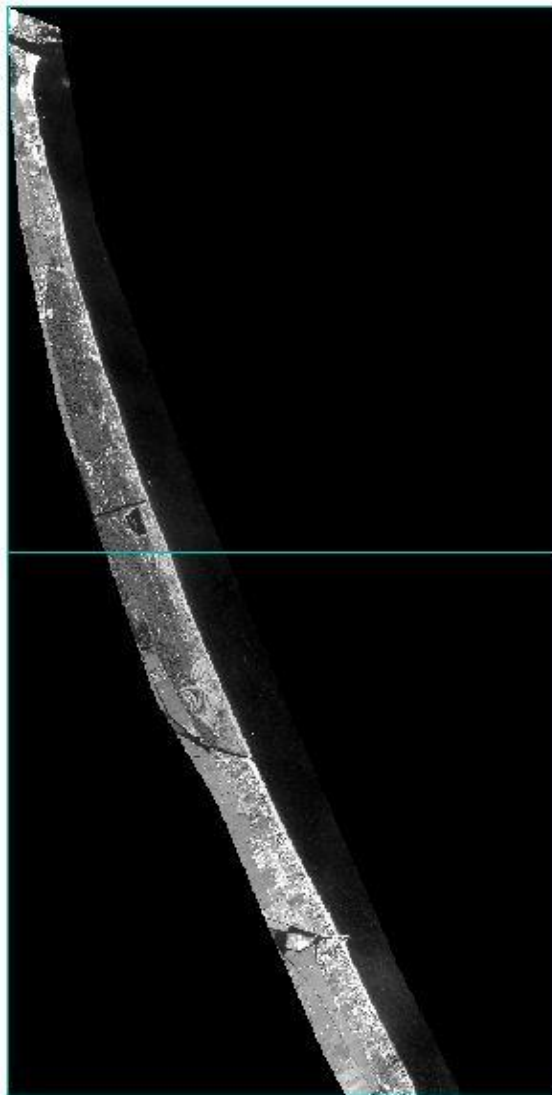


Figura 4.2. Imágenes pancromáticas

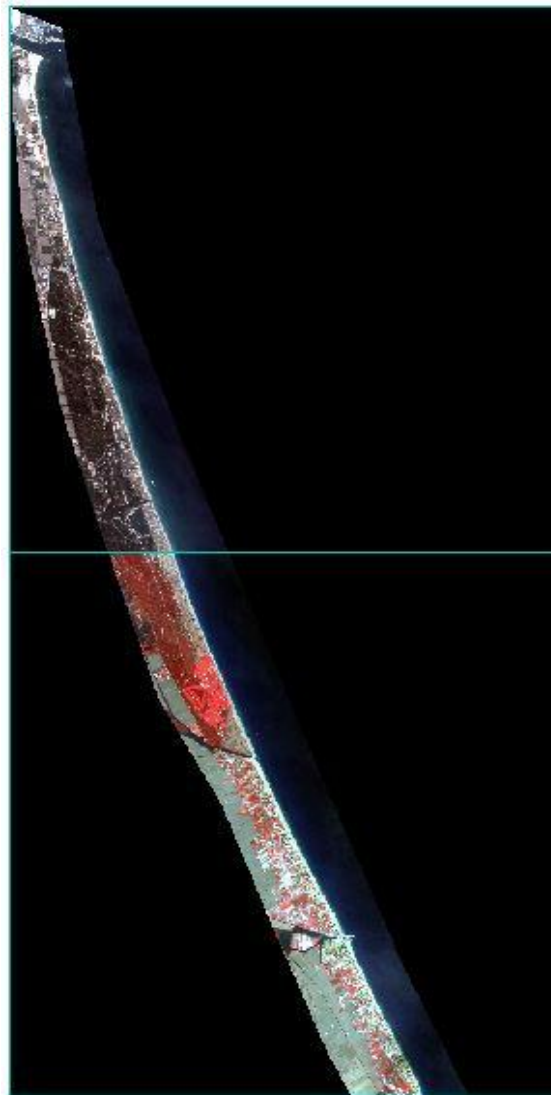


Figura 4.3. Imágenes multispectrales:
arriba (3, 2 y 1) y abajo (4, 3 y 2)

4.2 Datos LiDAR

El sistema LiDAR (Light Detection And Ranging) es un sensor activo que emite pulsos láser y recibe una señal cuando rebotan sobre la superficie, obteniendo de esta manera una nube de puntos georreferenciados. Consiste en un sistema aerotransportado formado por:

- Un emisor y receptor láser, que calcula la distancia a los objetos midiendo el tiempo que tarda cada pulso en volver al emisor.
- Un receptor GPS, que determina las coordenadas de cada pulso.
- Una unidad de medición inercial (IMU, Inertial Measurement Unit), que registra los giros del avión en los 3 ejes (roll, pitch, yaw).

La utilización de un ordenador a bordo permite la sincronización de todos los sistemas y el almacenamiento de las coordenadas tridimensionales.

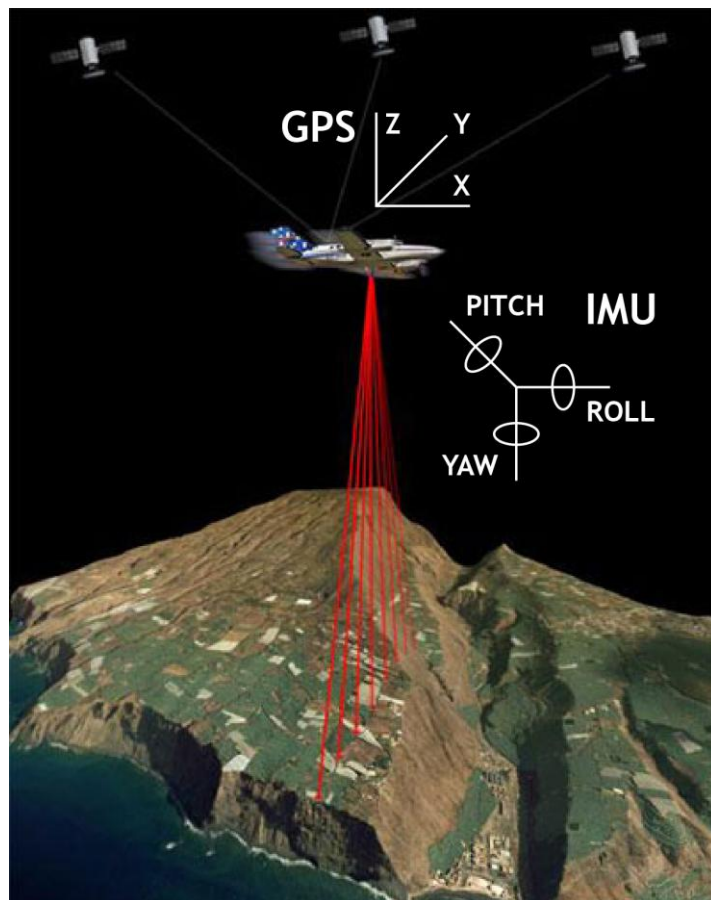


Figura 4.4. Sistema LiDAR

La elevada densidad de los puntos capturados, facilita la generación de modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficie (MDS), a partir de los cuales es posible generar un modelo de superficie normalizado (MDSn) que muestra la altura de los objetos.

Los datos LiDAR se han obtenido desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), aceptando la licencia de uso no comercial. A continuación se muestra un extracto de la web donde se explican las características técnicas:

“Ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos LiDAR, distribuidos en ficheros de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es un archivo LAZ (formato de compresión de ficheros LAS), en la información auxiliar se ofrece una herramienta de descompresión y visualización de ficheros LAZ y LAS. Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m², y posteriormente clasificadas de manera automática y coloreadas mediante RGB obtenido a partir de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de píxel de 25 o 50cm. Sistema geodésico de referencia ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero. Alturas ortométricas. No se dispone de ficheros LIDAR de todo el territorio nacional por el momento (consulte la cobertura LIDAR en <http://pnoa.ign.es/coberturalidar>).”



Figura 4.5. Cobertura LiDAR del Proyecto PNOA 2008-2012

En lugar de descargar los datos por municipio, se han obtenido desde el apartado de “Búsqueda en visor”, que permite dibujar un polígono para extraer los ficheros de nuestra área de interés.



Figura 4.6. Extracción de datos LiDAR desde el visor web

En total hemos descargado 13 ficheros en formato .LAZ, capturados en 2009:

```
PNOA_2009_LOTE8_VAL_728-4362_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_728-4364_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_728-4366_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4356_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4358_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4360_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4362_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4364_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_730-4366_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_732-4354_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_732-4356_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_732-4358_ORT-CLA-COL.LAZ
PNOA_2009_LOTE8_VAL_732-4360_ORT-CLA-COL.LAZ
```

Figura 4.7. Archivos LiDAR

4.3 Ortofotografía PNOA

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) se inicia en 2004 con el objetivo de obtener ortofotografías digitales de alta resolución (25-50 cm) de todo el territorio español.

Las imágenes se han obtenido desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), aceptando la licencia de uso no comercial. A continuación se muestra un extracto de la web donde se explican las características técnicas:

“Mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) más recientes disponibles, en formato ECW, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente. La unidad de distribución y descarga es la hoja del MTN50 (Mapa Topográfico Nacional 1:50.000), resultado de componer un mosaico con las ortofotos correspondientes a cada hoja del MTN50. Un mosaico de Máxima Actualidad por hoja MTN50 se forma seleccionando de entre toda la información de ortofotografía PNOA disponible, aquella que tenga una fecha de referencia más reciente, y en caso de coincidencia, se seleccionará la que tenga un tamaño de píxel menor. Cada mosaico va acompañado de un archivo de metadatos (XML) y un archivo shape (comprimido en formato ZIP) formado por recintos que indican, para cada píxel del mosaico, la resolución geométrica y la fecha de toma de la ortofotografía.”

En total hemos descargado dos archivos en formato .ECW, que utilizaremos como cartografía base para dibujar los shapefile necesarios y para comprobar los resultados obtenidos en los modelos de elevación tras los ensayos con diferentes parámetros.

PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h50_0722.ecw
PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30_h50_0747.ecw

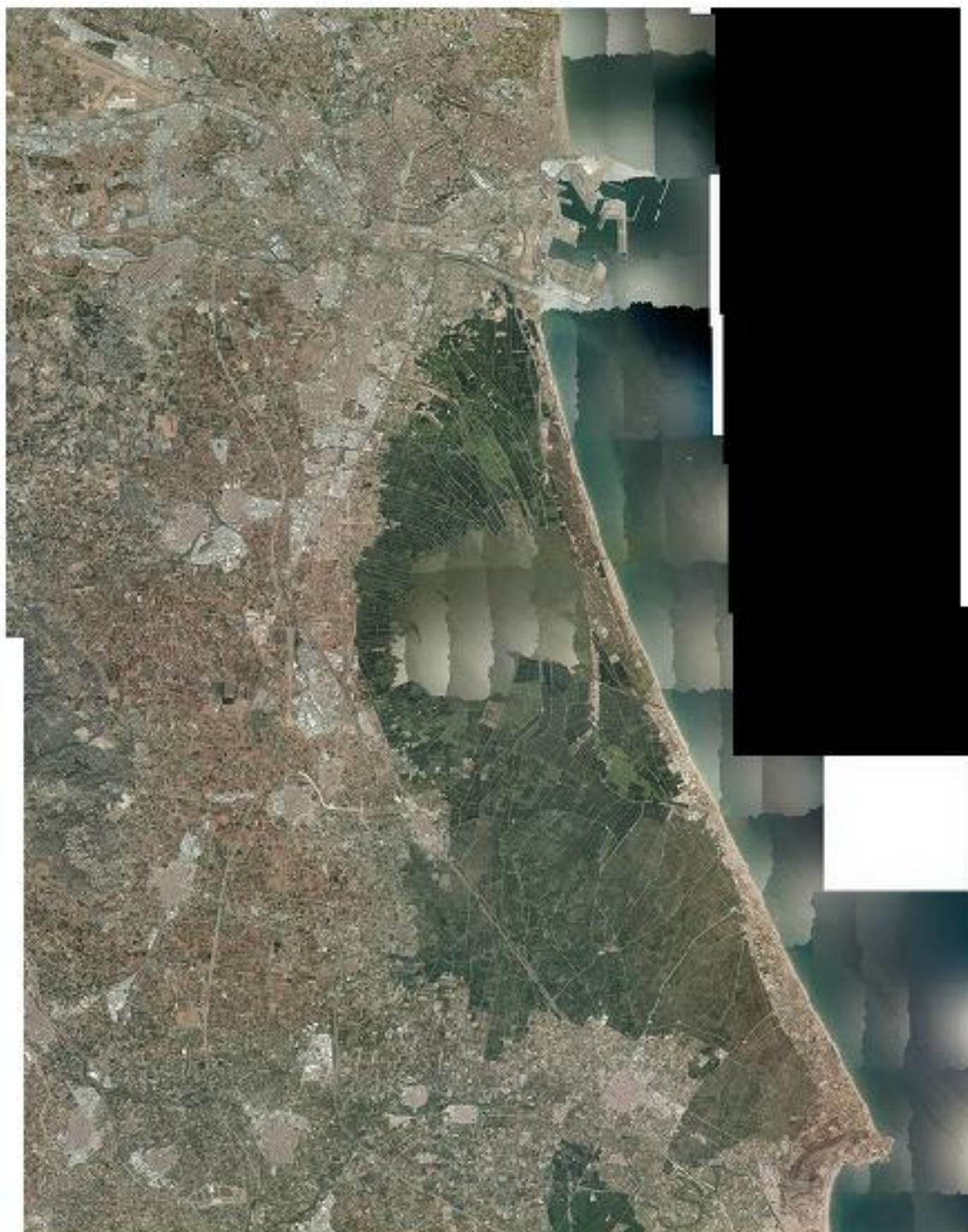


Figura 4.1. Ortofotografías PNOA

5. Metodología

El proceso seguido se divide en dos caminos atendiendo a las dos fuentes de información de las que se dispone.

Por un lado, para las imágenes de satélite:

- Seleccionar las imágenes del satélite QuickBird.
- Fusionar la imagen pancromática y la multiespectral por el método de componentes principales.
- Calcular el NDVI de la imagen resultante.
- Umbralizar el NDVI.

Por otro lado, para las nubes de puntos LiDAR:

- Seleccionar los datos LiDAR.
- Generar los modelos de elevaciones (MDS y MDT).
- Obtener el modelo de superficies normalizado (MDSn).
- Umbralizar el MDSn.

Finalmente, el resultado obtenido de los dos caminos se combina para concurrir en el mapa del modelo de combustible.

5.1 Esquema del proceso

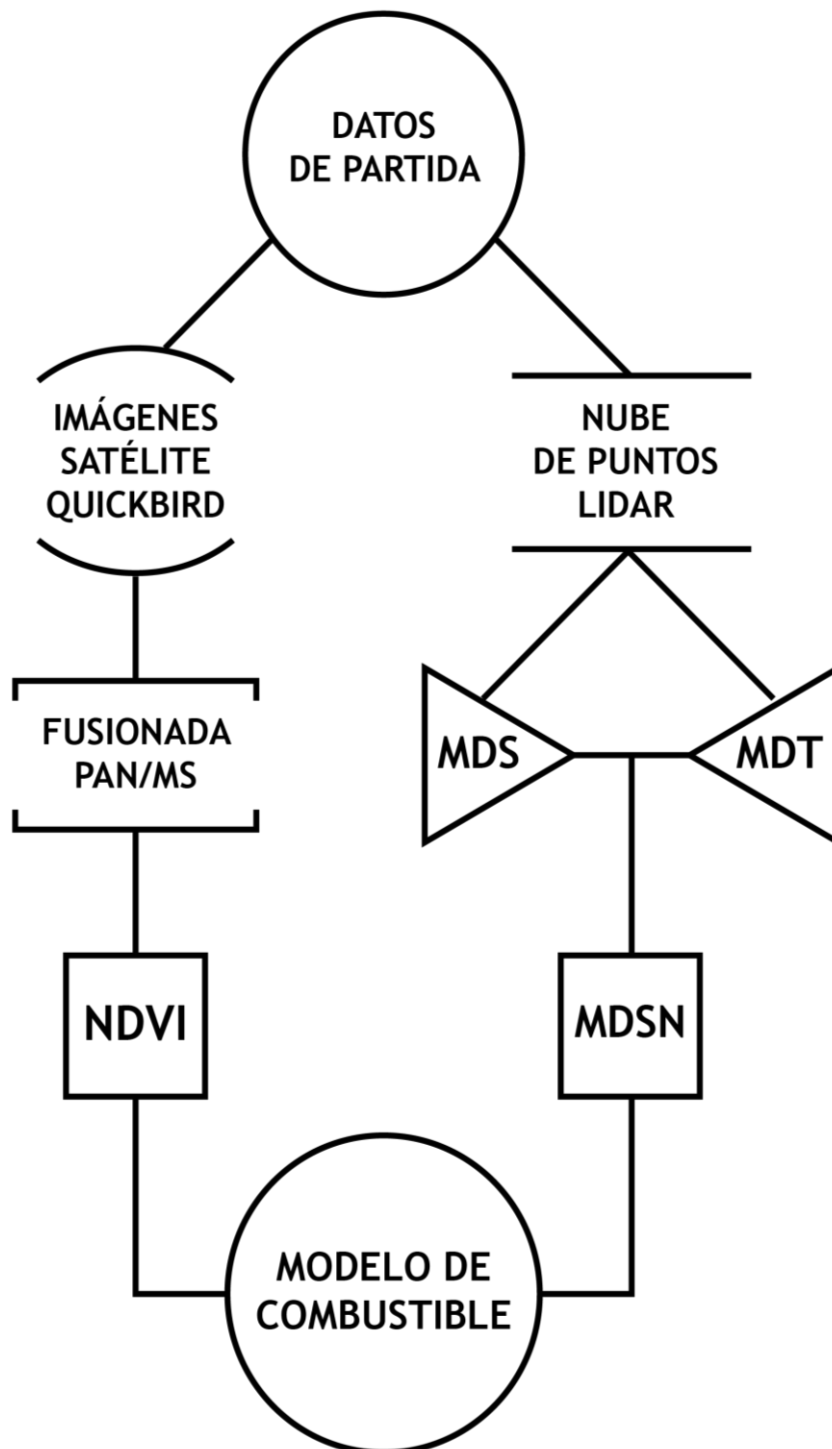


Figura 5.1. Esquema del proceso

5.2 Software empleado



LASTask Tools

Es una potente herramienta de visualización y edición de ficheros LAS. No obstante, la versión utilizada en este trabajo únicamente permite visualizar ficheros LAS y descomprimir ficheros LAZ. Este software ha sido descargado a través del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, desde el apartado de Información Auxiliar LIDAR:

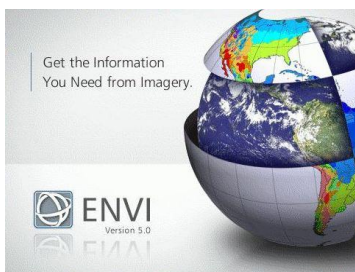
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>



Fusion

Es un software libre desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos para el tratamiento de los datos LiDAR, concretamente permite el filtrado de las nubes de puntos y la generación de modelos digitales de elevaciones. Se encuentra disponible en el siguiente enlace:

<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>



Envi

Es un software desarrollado por EXELIS para el análisis geoespacial y procesamiento de imágenes satelitales. En este trabajo se utilizará la versión 5.0 para la fusión de las imágenes pancromáticas con las multiespectrales, y posteriormente, para el cálculo del Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) de la imagen fusionada. Además, dispone de un módulo adjunto llamado ENVI Zoom, que servirá para la segmentación de la imagen en regiones formadas por píxeles con características homogéneas.



ArcGIS

Es una plataforma desarrollada por ESRI que agrupa diversas aplicaciones SIG. En este trabajo se empleará la versión 10.1 para la umbralización y clasificación de los datos, y finalmente, para la generación del modelo de combustible.

5.3 Tratamiento de las imágenes de satélite

5.3.1 Preprocesado

Dado que las imágenes ya estaban corregidas tanto radiométrica como geométricamente, el objetivo de este preprocesado es la fusión de las imágenes pancromáticas (alta resolución espacial) con las multiespectrales (alta resolución espectral).

En primer lugar, debido a que disponemos de dos imágenes pancromáticas y dos multiespectrales, hemos realizado los correspondientes mosaicos para trabajar con una imagen de cada. Para ello, hemos empleado la herramienta *Toolbox / Mosaicking / Georeferenced Mosaicking*.

Las imágenes originales están en el sistema de referencia mundial WGS84. Por ello, cambiamos al sistema de referencia terrestre europeo ETRS89, mediante la herramienta *Toolbox / Raster Management / Project Raster*.

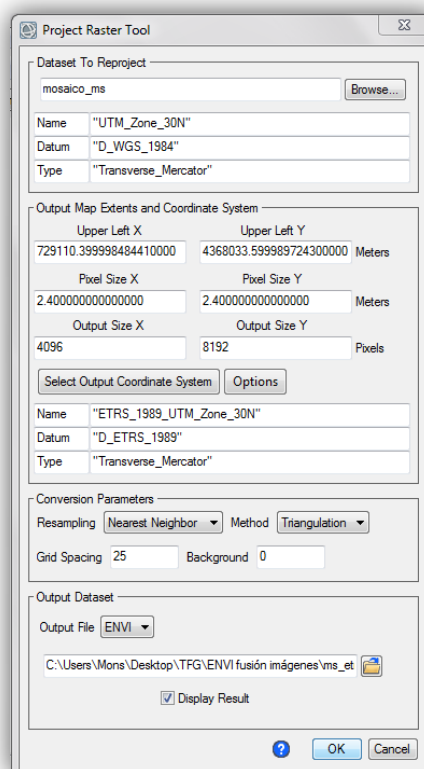


Figura 5.2. Herramienta cambio de proyección

Para poder realizar operaciones con ambas imágenes, deben tener el mismo tamaño de pixel. Como hemos dicho antes, la pancromática tiene un tamaño de pixel de 0.6 m, mientras que el de la multiespectral es de 2.4 m.

Por lo tanto, es necesario realizar un remuestreo de la imagen multiespectral para convertirla en una imagen con un tamaño de píxel de 0.6. Utilizamos la herramienta *Toolbox / Raster Management / Resize data* y dentro de ella seleccionamos *Set Output Dims by Pixel Size*.

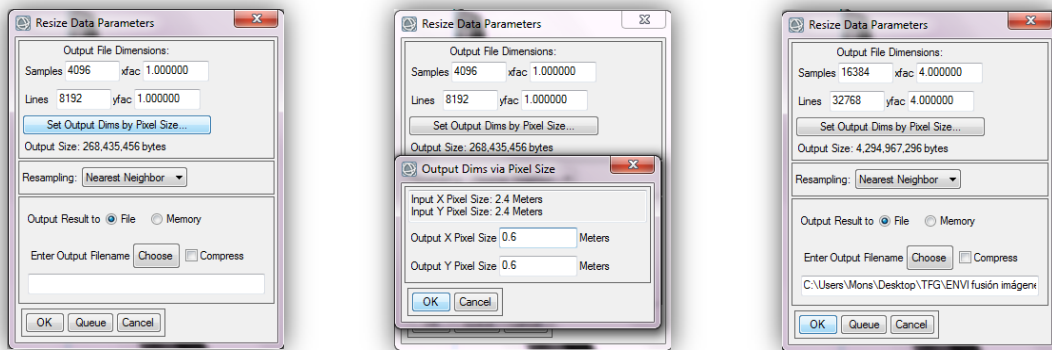


Figura 5.3. Herramienta cambio de tamaño de píxel

Observamos que el valor del *Output Size* ha aumentado. Esto se debe a que se ha dividido cada uno de los píxeles iniciales en cuatro píxeles más pequeños (1/4 del tamaño original). Sin embargo, el resultado debe ser visualmente idéntico a la imagen inicial, ya que los nuevos cuatro píxeles tendrán el mismo nivel digital que el píxel inicial.

A continuación, se ha recortado la zona de estudio para reducir el volumen de datos mediante *Toolbox / Raster Management / Resize Data*. Dentro de esta ventana seleccionamos *Spatial Subset*. Esta herramienta permite diferentes métodos para efectuar el recorte, en nuestro caso hemos decidido hacerlo por coordenadas desde la opción *Map*.

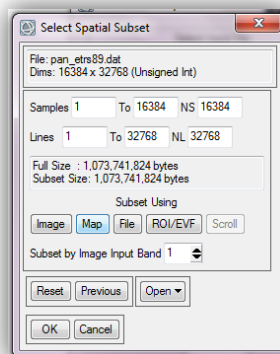


Figura 5.4. Herramienta recorte de la zona

Introducimos las coordenadas UTM del recorte, delimitado por la esquina superior izquierda y por la esquina inferior derecha:

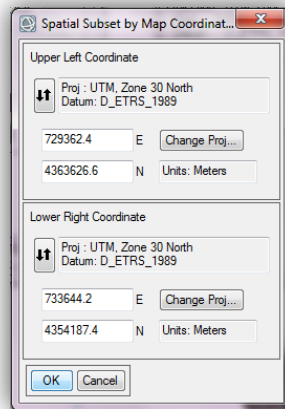


Figura 5.5. Coordenadas del recorte

Las coordenadas introducidas deben de ser múltiplos de 0.6 para aseguramos que ambas imágenes disponen exactamente del mismo número de píxeles y, por tanto, de la misma extensión de terreno.

5.3.2 Fusión PAN/MS

Una vez tenemos las imágenes en la misma proyección, con el mismo tamaño de pixel y con nuestra zona de estudio recortada, es el momento de comenzar la fusión de ambas imágenes. El programa ENVI dispone de una herramienta automática para realizar esta fusión, la cual ofrece un resultado aceptable. No obstante, hemos decidido llevarla a cabo por el método de componentes principales para obtener un resultado óptimo.

El método de componentes principales es una técnica utilizada para reducir el volumen de información, determinando nuevos factores que expliquen la mayor cantidad de la variabilidad de los datos, utilizando el menor número de factores posible.

Para aplicar este método, se sustituirá el primer componente principal por la imagen pancromática ajustada según la media y desviación típica. Para ello, empezamos ejecutando la herramienta que se encuentra en: *Transform / PCA Rotation / Forward PCA Rotation New Statistics and Rotate*.

La siguiente gráfica muestra la distribución de los datos, donde podemos observar que la inmensa mayoría de la información aparece en el primer componente principal:

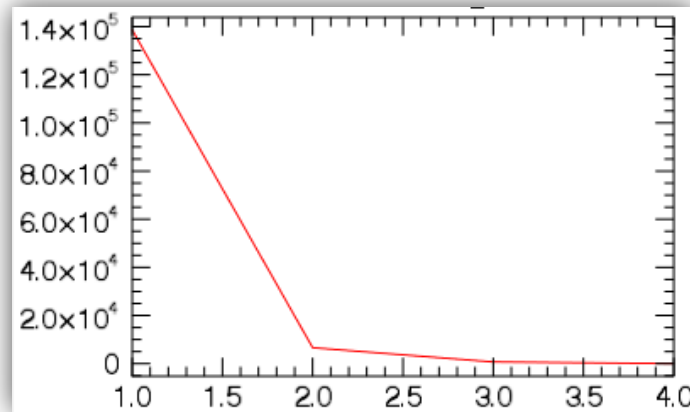


Figura 5.6. Gráfica componentes principales

A continuación se calculan las estadísticas, tanto de la imagen pancromática como del primer componente principal:

	μ	σ
CP1	0.000006	372.401823
Pan	157.483000	193.260828

Figura 5.7. Estadísticas CP1 y Pan

El siguiente paso consiste en ajustar la imagen pancromática respecto a la media y desviación típica de CP1. De esta forma, obtenemos una nueva imagen que llamaremos PanAj. Esta operación se realiza desde *Band Math*.

$$\text{PanAj} = (\text{Pan} \cdot a) + b$$

Siendo:

$$a = \sigma_{\text{CP1}} / \sigma_{\text{Pan}} = 1,926939$$

$$b = \mu_{\text{CP1}} - (\mu_{\text{Pan}} \cdot a) = -303,460126$$

Al calcular las estadísticas de PanAj, observamos que los valores de media y desviación típica obtenidos son similares a los de CP1 hasta el cuarto decimal, de modo que el ajuste es correcto.

	μ	σ
CP1	0.000006	372.401823
PanAj	0.000025	372.401832

Figura 5.8. Estadísticas CP1 y PanAj

Después creamos una nueva imagen sustituyendo CP1 por la PanAj, es decir, una imagen que contenga: panaj + CP2 + CP3 + CP4, para lo que utilizaremos la herramienta New File Builder. Se recomienda importar los componentes principales por separado para asegurarnos de que están en orden y en la banda correspondiente.

Banda 1 → PanAj Banda 2 → CP2 Banda 3 → CP3 Banda 4 → CP4
--

Finalmente, se realiza el proceso inverso empleando la herramienta que se encuentra en la siguiente ruta, donde introducimos la nueva imagen creada panaj_cp234 y el fichero de estadísticas de comp_principales generado anteriormente:

/ Transform / PCA Rotation / Inverse PCA Rotation

El resultado de este proceso ofrece una imagen que combina la alta resolución espacial de la imagen pancromática con la información espectral de la imagen multiespectral.

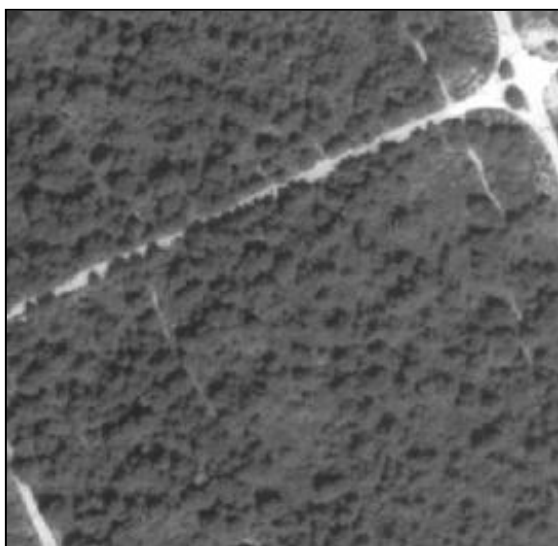


Figura 5.9. Detalle pancromática



Figura 5.10. Detalle multiespectral



Figura 5.11. Detalle fusionada

5.3.3 NDVI

NDVI son las siglas de Normalized Difference Vegetation Index (en castellano, Índice Normalizado Diferencial de Vegetación). Este índice se basa en un conjunto de parámetros numéricos que permiten evaluar el estado de la vegetación en función a la radiación que emite o refleja, es decir, dependiendo de la respuesta espectral de cada píxel en diferentes partes del espectro electromagnético.

La respuesta espectral de la vegetación sana, muestra un claro contraste entre la banda del rojo del espectro visible y el infrarrojo cercano. Mientras que en el visible las hojas absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el infrarrojo cercano la reflejan.

Por el contrario, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés (plagas, sequía...) la cantidad de agua disminuye, por lo que disminuye la reflectividad en el infrarrojo cercano y aumenta paralelamente en la banda roja. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otro tipo de cubiertas.

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1. Por lo general, valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación y, cuanto más próximo a 1 sea el valor, mejores serán las condiciones de vigor.

Las imágenes multiespectrales con las que estamos trabajando fueron adquiridas por el satélite QuickBird en abril, por lo tanto, en primavera. En esta época del año, la vegetación se encuentra en fase de crecimiento y presenta un elevado vigor vegetativo. El NDVI se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde NIR es el valor de reflectancia del infrarrojo cercano (*Near InfraRed*) y R es el valor de reflectancia del rojo

Desde ENVI podemos obtener el NDVI introduciendo la fórmula anterior en el *Band Math*, sin embargo, este software dispone de una herramienta para calcular este índice de forma automática desde */ Spectral / Vegetation / NDVI*.

A continuación se muestra el recorte de una zona donde se aprecian diferentes valores de vigor vegetativo, que se detallarán en el apartado de resultados.



Figura 5.12. Detalle color natural

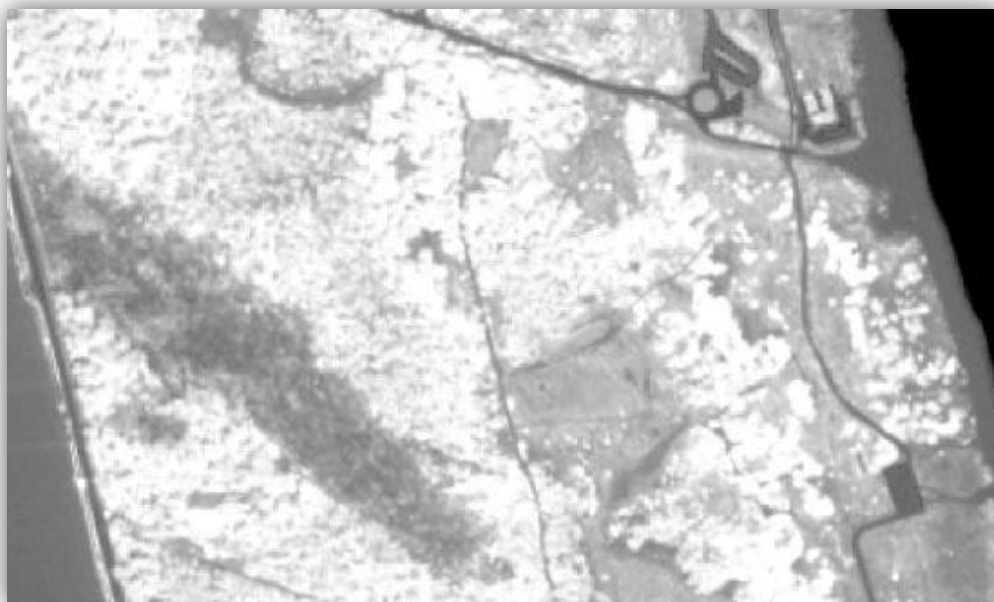


Figura 5.13. Detalle NDVI

5.4. Tratamiento de los datos LiDAR

5.4.1. Preprocesado

Los datos LiDAR descargados desde la web del CNIG están en formato .LAZ, pero para trabajar con ellos debemos convertirlos al formato .LAS mediante una descompresión. Para ello, la misma web del CNIG ofrece la descarga del software LASTaskTools de uso no comercial. Además de la descompresión de los archivos .LAS, este programa dispone de herramientas para el procesado de la nube de puntos, sin embargo, para este trabajo se ha utilizado el software FUSION, con el cual estamos más familiarizados.

Primero, se define la zona de estudio con el objeto de reducir el volumen de información para agilizar el procesado de los datos. Creamos en ArcCatalog un nuevo shapefile de tipo polygon y determinamos el sistema de coordenadas:

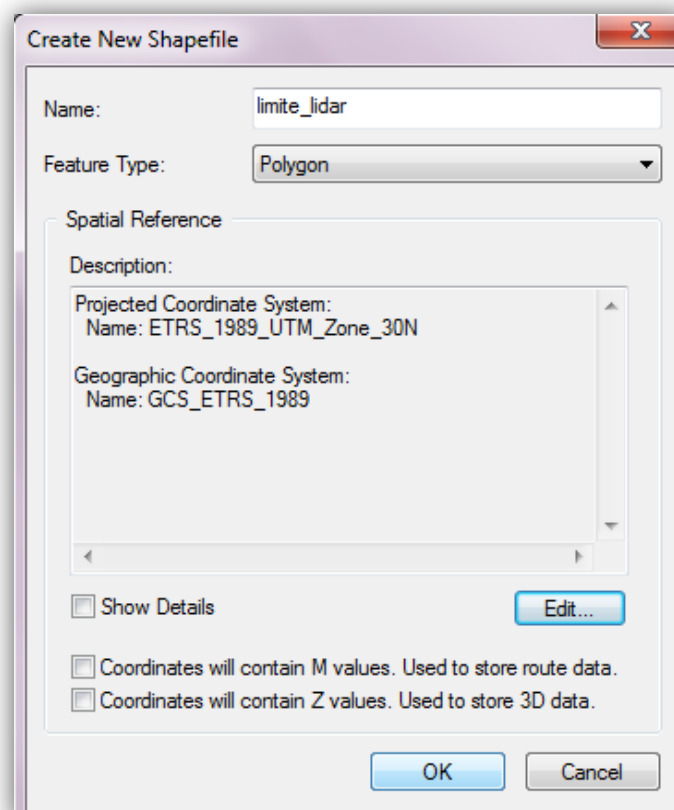


Figura 5.14. Herramienta creación shapefile

En ArcMap, cargamos el .shp creado y una imagen de referencia (por ejemplo, la ortofoto) sobre la que dibujaremos el límite de la zona de estudio utilizando el editor.



Figura 5.15. Shapefile límite de la zona sobre ortofoto

Una vez definido el contorno, comenzamos el tratamiento de la nube de puntos con FUSION. En primer lugar, tenemos que unir los diferentes datos .LAS en un solo archivo. Creamos un .TXT que incluya la ruta de cada uno y los unimos utilizando el comando MergeData:

```
MergeData [switches] DataFile OutputFile  
mergedata archivoslas.txt lasmerge.las
```

Después recortamos el archivo resultante lasmerge.las mediante el shapefile que hemos creado para definir nuestra área de interés. Utilizamos PolyClipData:

```
PolyClipData [switches] PolyFile OutputFile DataFile  
polyclipdata limite_lidar.shp recorte_lidar.las lasmerge.las
```

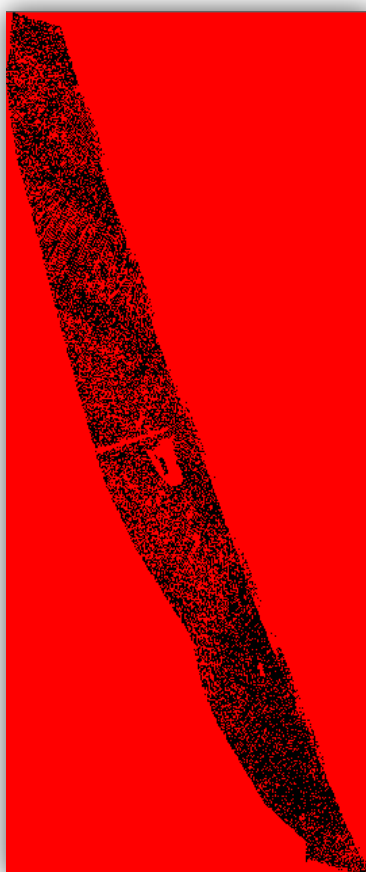


Figura 5.16. Datos LiDAR tras el recorte

A continuación, eliminamos los *outliers* filtrando *recorte_lidar.las* mediante *FilterData*. Tras realizar diferentes pruebas, se ha obtenido el mejor resultado introduciendo los valores 2 y 10 como *FilterParms* y *WindowSize* respectivamente:

```
FilterData [switches] FilterType FilterParms WindowSize OutputFile DataFile  
filterdata outlier 2 10 filtrado.las recorte_lidar
```

Observamos que desaparecen todos los outliers excepto 1, a más de 200m de altura. Para eliminar el outlier restante definimos un rango de alturas mediante ClipData, utilizando zmin y zmax en el apartado switches. Como valor mínimo introducimos -1.5, ya que en la zona de dunas puede aparecer alguna cota por debajo del nivel del mar. Como valor máximo introducimos 30, porque en la visualización no se ha detectado ningún árbol con una altura superior, por lo tanto, eliminaremos la parte más alta de los edificios sin alterar la vegetación:

```
ClipData [switches] InputSpecifier SampleFile [MinX MinY MaxX MaxY]
clipdata /zmin:-1.5 /zmax:30 filtrado.las filtrado_sinout.las
729362.4 4354187.4 733644.2 4363626.6
```

5.4.2. Modelos Digitales de Elevaciones

Una vez disponemos de la nube filtrada y sin outliers, procedemos a generar los modelos de elevaciones. Se trata de representación de las alturas en 2.5D, ya que para cada posición (x, y) le corresponde una única altura (z).

En primer lugar, calculamos el Modelo Digital de Superficie, también conocido como MDS (o DSM, por sus siglas en inglés). Este modelo emplea los primeros ecos de los pulsos láser, por lo que ofrece una superficie que incluye tanto el terreno como todos los elementos que se encuentran sobre él (árboles, edificios...). Se calcula mediante la herramienta CanopyModel. Definimos un tamaño de celda de 1, las unidades en metros y el sistema de coordenadas UTM (que se corresponde con el código 1) en la zona 30.

```
CanopyModel [switches] surfacefile cellsize xyunits zunits coordsys zone horizdatum
vertdatum datafile
canopymodel mds.dtm 1 m m 1 30 0 0 filtrado_sinout.las
```

Se ha obtenido un fichero en formato .dtm, que se transforma en .asc mediante DTM2ASCII.

```
DTM2ASCII [switches] inputfile outputfile
dtm2ascii mds.dtm mds_ascii.asc
```

A continuación, calculamos el Modelos Digital del Terreno, también conocido como MDT (o DTM, por sus siglas en inglés). Este modelo emplea los últimos ecos del pulso láser, por lo que ofrece una superficie con el suelo desnudo. Para ello, utilizaremos la herramienta GroundFilter, aplicando 5 filtros sucesivos, reduciendo de manera progresiva tanto el tamaño de ventana, como los valores g y w, manteniendo en todos los casos un total de 8 iteraciones. Se aplicará el primer filtro sobre una ventana de 100 metros, con un valor $g = 0.4$, un valor $w=4$.

```
GroundFilter /gparam:0.4 /wparam:4 /iterations:8  
groundfilter_1.las 100 filtrado_sinout.las
```

Sobre el archivo resultante groundfilter_1 se aplicará un segundo filtro, esta vez sobre una ventana de 75 metros, con un valor $g = 0.3$, un valor $w = 3$.

```
GroundFilter /gparam:0.3 /wparam:3 /iterations:8  
groundfilter_2.las 75 groundfilter_1.las
```

Sobre el archivo resultante grundfilter_2 se aplicará un tercer filtro sobre una ventana de 35 metros, con un valor $g = 0.2$ y un valor $w = 2$.

```
GroundFilter /gparam:0.2 /wparam:2 /iterations:8  
groundfilter_3.las 35 groundfilter_2.las
```

Sobre el archivo resultante `grundfilter_3` se aplicará un cuarto filtro sobre una ventana de 15 metros, con un valor $g = 0.1$ y un valor $w = 1$.

```
GroundFilter /gparam:0.1 /wparam:1 /iterations:8
grundfilter_4.las 15 grundfilter_3.las
```

Finalmente, utilizamos la herramienta `GridSurfaceCreate` para obtener el archivo `.dtm`. Del mismo modo que para el MDS, definimos un tamaño de celda de 1, las unidades en metros y el sistema de coordenadas UTM (que se corresponde con el código 1) en la zona 30:

```
GridSurfaceCreate [switches] surfacefile cellsize xyunits zunits coordsys zone
horizdatum vertdatum datafile
GridSurfaceCreate mdt.dtm 1 m m 1 30 0 0 grundfilter_5.las
```

Y lo convertimos a `.ascii` con `DTM2ASCII`:

```
DTM2ASCII [switches] inputfile outputfile
dtm2ascii mdt.dtm mdt_ascii.asc
```

Los resultados obtenidos son buenos, pero pueden mejorarse. Podemos observar como sigue apareciendo ligeramente el contorno de algunos edificios. Por ello, decidimos eliminarlos y volver a realizar todos los pasos, para evitar posibles alteraciones en los modelos. Creamos un nuevo shapefile, dibujando sobre la ortofoto el contorno de los edificios más elevados de la zona para poder recortarlos con `PolyClipData`, ya que esta herramienta también permite obtener como resultado la zona exterior a los polígonos.

Al repetir el proceso, observamos que tras aplicar FilterData desaparecen todos los outliers, por lo que no fue necesario realizar el paso de ClipData. En consecuencia, queda demostrado que los edificios estaban entorpeciendo la generación de los modelos. Seguidamente se muestra el código completo:

```
MergeData archivoslas.txt lasmerge.las

PolyClipData limite_lidar.shp recorte_lidar.las lasmerge.las

PolyClipData /outside edificios.shp sin_edificios.las
recorte_lidar.las

FilterData outlier 2 10 filtrado.las recorte_lidar

CanopyModel mds.dtm 1 m m 1 30 0 0 filtrado.las

DTM2ASCII mds.dtm mds_ascii.asc

GroundFilter /gparam:0.4 /wparam:4 /iterations:8
groundfilter_1.las 100 filtrado.las

GroundFilter /gparam:0.3 /wparam:3 /iterations:8
groundfilter_2.las 75 groundfilter_1.las

GroundFilter /gparam:0.2 /wparam:2 /iterations:8
groundfilter_3.las 35 groundfilter_2.las

GroundFilter /gparam:0.1 /wparam:1 /iterations:8
groundfilter_4.las 15 groundfilter_3.las

GroundFilter /gparam:0 /wparam:0.5 /iterations:8
groundfilter_5.las 5 groundfilter_4.las

GridSurfaceCreate mdt.dtm 1 m m 1 30 0 0 groundfilter_5.las

DTM2ASCII mdt.dtm mdt_ascii.asc
```

Desde ArcMap, los convertimos a formato GRID. A continuación se muestra la visualización.



Figura 5.17. MDS zona completa

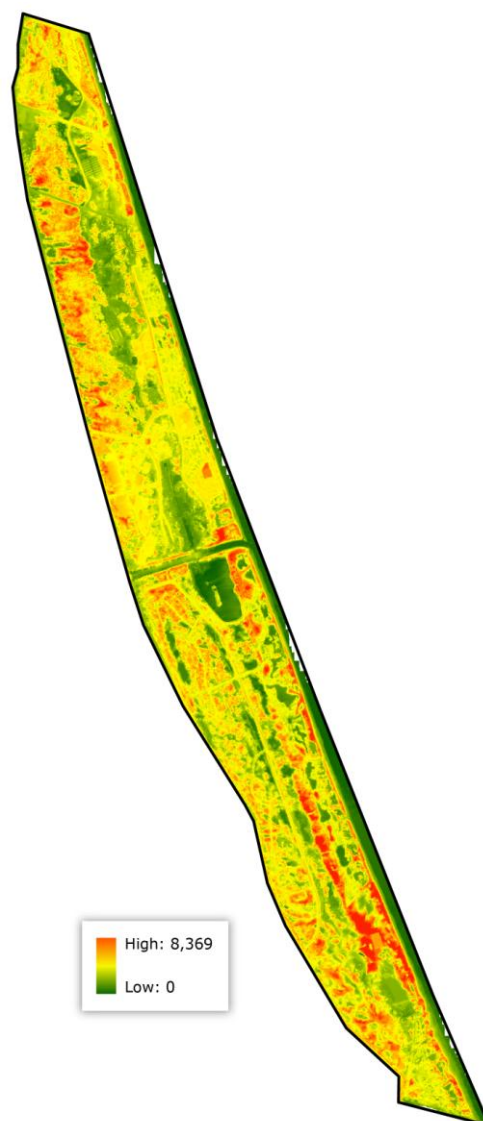


Figura 5.18. MDT zona completa

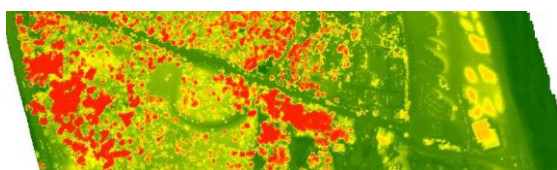


Figura 5.19. MDS zoom detalle

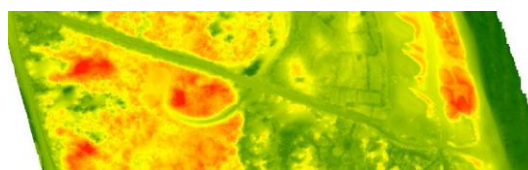


Figura 5.20. MDT zoom detalle

Una vez calculados los modelos de elevaciones, al MDS se le resta el MDT para generar un nuevo modelo denominado Modelo Digital de Superficie Normalizado, también conocido como MDSn (o nDSM, por sus siglas en inglés). Incluye únicamente las alturas de los objetos que se encuentran sobre el terreno. Esta operación se lleva a cabo desde ArcMap mediante la herramienta Raster Calculator.

$$\text{MDSn} = \text{MDS} - \text{MDT}$$

Sin embargo, de los objetos que se muestran, no todos se corresponden con diferentes tipos de vegetación, ya que con el shapefile únicamente hemos eliminado los edificios más altos, por lo que siguen apareciendo algunas edificaciones. No obstante, esto no supondrá ningún problema, como veremos más adelante.

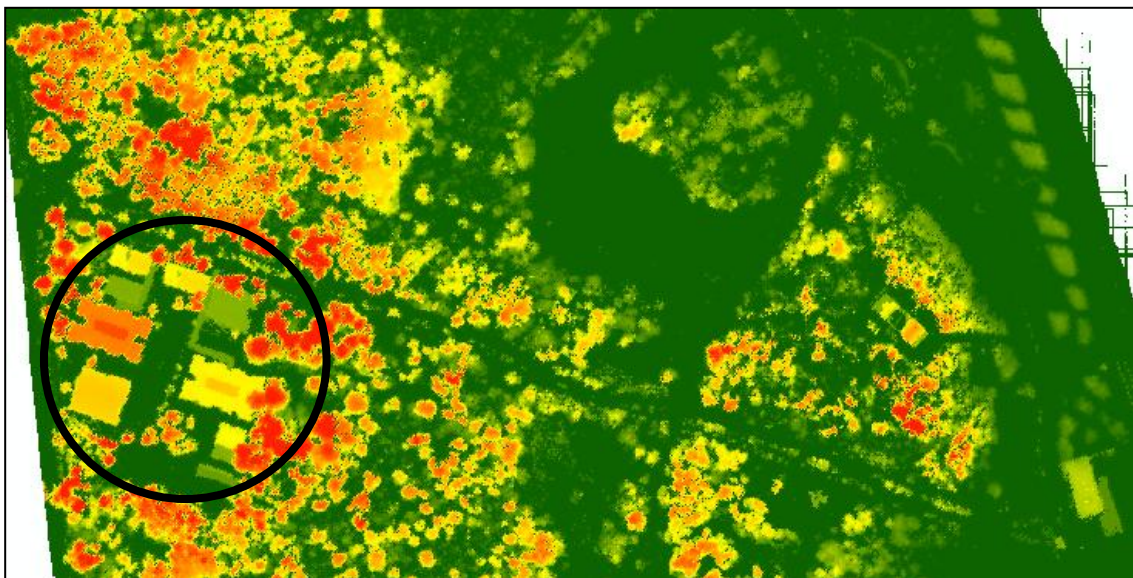


Figura 5.21. MDSn zoom detalle edificios

6. Resultados

NOTA: Las imágenes que aparecen en este apartado de resultados son simples pantallazos para ilustrar las explicaciones. Los mapas finales se adjuntan en el apartado "Anexos".

6.1. Umbralización NDVI

Como se ha dicho anteriormente, los valores del NDVI varían entre -1 y 1. Al aplicar este índice sobre la zona de estudio, se ha obtenido un valor mínimo = -0.350649 y un valor máximo = 0.636971.

Seguidamente se presentan dos tablas que exponen valores aproximados del NDVI para los diferentes tipos de cubiertas, que servirán como guía para definir los umbrales de vigor vegetativo:

NO VEGETACIÓN				
Agua	Playa	Carreteras	Caminos	Edificios
< 0	< 0.05	< 0.10	< 0.15	< 0.10

Figura 6.1. Valores NDVI no vegetación

VEGETACIÓN				
Área quemada	Dunas	Pasto	Arbolado	Campo de golf
0.10	0.10 – 0.20	0.20 – 0.30	0.30 – 0.40	0.50

Figura 6.2. Valores NDVI vegetación

A la hora de establecer el valor de NDVI que determine el punto de inflexión entre lo que se debe considerar vegetación y lo que no, podemos observar en las tablas anteriores que existe un conflicto entre los valores que ofrecen algunos caminos y los valores de dunas. Esto se debe principalmente a que las dunas poseen una cobertura vegetal muy heterogénea. En algunas áreas aparece vegetación dispersa que además presenta un porcentaje de humedad bajo, sin embargo, también existen otras extensiones donde la vegetación es más densa, incluso con presencia de matorral, lo cual eleva los valores hasta 0.30 en zonas puntuales.

Por lo tanto, es necesario encontrar un valor de NDVI lo suficientemente bajo que incluya las zonas que tienen una vegetación escasa y con poco vigor vegetativo, pero, al mismo tiempo, debe ser lo suficientemente alto para que no identifique los caminos como parte de ese tipo de vegetación.

Teniendo en cuenta que valores por encima de 0.10 suelen reflejar presencia de vegetación, se han realizado diversas pruebas definiendo el valor de corte entre el rango 0.10 y 0.20. Se ha obtenido el resultado óptimo introduciendo el valor 0.14, de modo que todos los píxeles con un valor mayor o igual serán considerados como vegetación.

Una vez establecido el primer umbral, que únicamente separa la vegetación del resto, es el momento de definir rangos basados en el vigor vegetativo de los elementos que ya tenemos la certeza que pertenecen a la vegetación. Analizando los valores de la tabla anterior, se ha decidido establecer una clasificación que diferencie entre valores altos y valores bajos, marcando dicha frontera en 0.26.

Así pues, los rangos del vigor vegetativo descrito por el NDVI quedan definidos de la siguiente forma:

No vegetación → NDVI < 0.14
Vigor bajo → 0.14 < NDVI < 0.26
Vigor alto → NDVI > 0.26

La umbralización y clasificación del NDVI según estos rangos, se realiza desde ArcMap mediante la herramienta que se encuentra en la siguiente ruta:

ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Reclass / Reclassify

A continuación se muestra el recorte de una zona de dunas con parte de vegetación arbustiva:

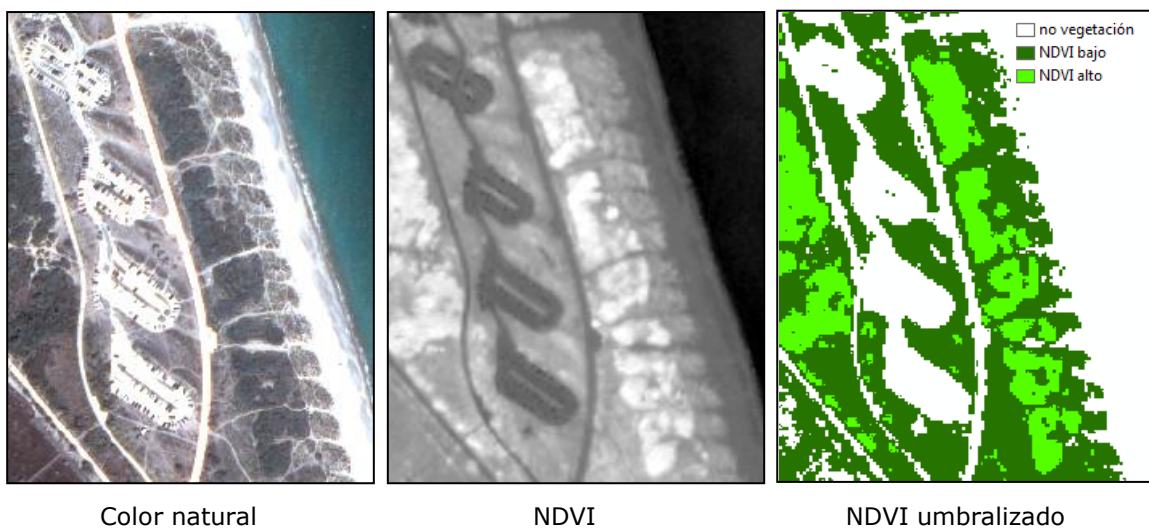


Figura 6.3. Comparación color natural (izquierda), NDVI (centro) y umbralizado (derecha)

6.2. Umbralización MDSn

Tras el cálculo del MDSn se ha observado que, además de la vegetación, aparecen otros elementos como por ejemplo algunas edificaciones. No obstante, esto no supone ningún inconveniente, debido a que cuando la información del MDSn se cruce con la del NDVI, desaparecerán todos los elementos que no pertenecen a la vegetación.

Por esta razón, atendiendo a la separación que establece el modelo de Prometheus (2000), se ha definido la diferencia entre las clases según los siguientes rangos de altura:

Pasto → **hasta 0,30 m**
Matorral → **0,30 - 4,00 m**
Arbolado → **más de 4,00 m**

Del mismo modo que para el NDVI, la umbralización y clasificación del MDSn según los rangos se realiza desde ArcMap, mediante la herramienta Reclassify. A continuación se muestra un recorte del resultado de una zona que incluye los tres grupos en los que se ha clasificado la vegetación:

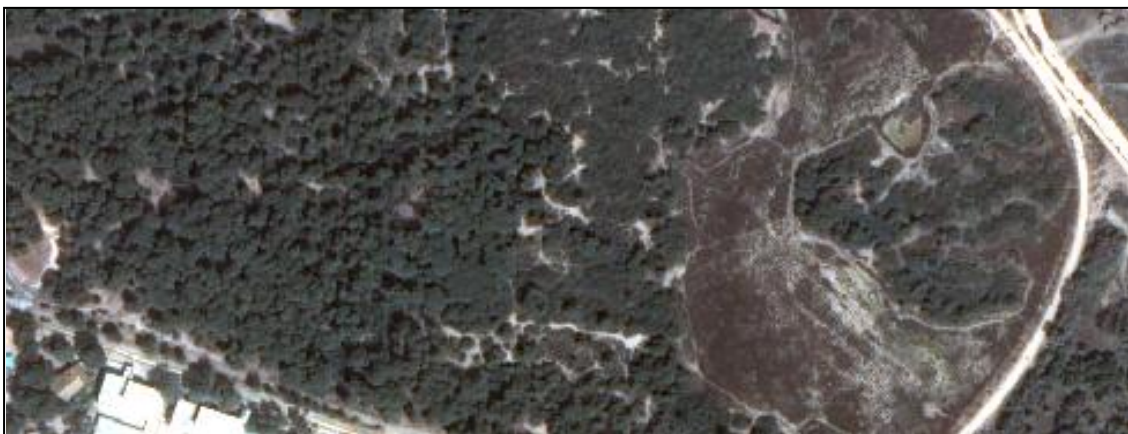


Figura 6.4. Detalle color natural

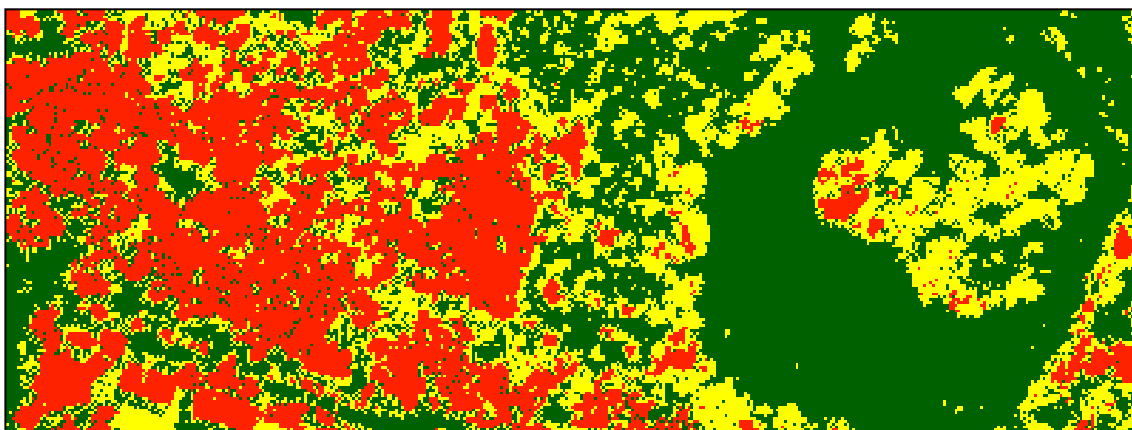


Figura 6.5. Detalle MDSn

- Pasto
- Matorral
- Arbolado

Seguidamente se muestran fotografías realizadas en la zona de estudio para ilustrar los grupos de vegetación existentes:



Figura 6.6. Pasto



Figura 6.7. Matorral



Figura 6.8. Arbolado

Además, la particularidad de la zona de estudio es la presencia de dunas, como podemos observar en la siguiente imagen de la franja cercana a la playa.



Figura 6.9. Dunas

6.3. Modelo de combustible

Los modelos de combustible se utilizan para clasificar las cubiertas vegetales en función de su distribución y estructura vertical, con el objetivo de determinar de manera precisa sus parámetros de combustibilidad y estudiar el comportamiento del fuego en caso de incendio. Así pues, un modelo de combustible únicamente describe las características físicas de la vegetación, sin tener en cuenta el tipo de especie. Una clasificación por especies no ofrece información útil para la gestión de un incendio, ya que una misma especie puede presentar diferentes parámetros de combustibilidad (Chuvieco y Martín, 2004).

Existen modelos de combustible desarrollados por diversos investigadores, aplicables a diferentes partes del mundo. Por ejemplo, el modelo propuesto en el proyecto Prometheus (2000), está desarrollado en un entorno europeo y su clasificación se basa específicamente en entornos mediterráneos (Ramírez, 2013).

Sin embargo, en el presente trabajo se propone un modelo que no estará basado exclusivamente en la altura del elemento propagador, sino que esta información se complementará con el vigor vegetativo que ofrece el NDVI.

Llegados a este punto, disponemos de dos mapas umbralizados con la caracterización de la zona de estudio en función de dos parámetros diferentes: el vigor vegetativo que ofrece el NDVI y la altura de los objetos que ofrece el MDSn. La combinación entre ambos resultados mediante su multiplicación con la herramienta *Raster Calculator*, produce el modelo de combustible.

Hay que tener en cuenta, que para realizar esta multiplicación es necesario clasificar cada umbral asignándole un valor tal que cada operación proporcione un resultado único para cada clase. Es decir, si se asignan valores que al multiplicarse proporcionen el mismo resultado, se mezclará la información perteneciente a diferentes tipos de cobertura. Por ejemplo, supongamos que se fijan los siguientes valores:

VALORES NDVI			VALORES MDSn		
NO VEGETACIÓN	VIGOR BAJO	VIGOR ALTO	PASTO	MATORRAL	ARBOLADO
1	2	3	1	2	3

Figura 6.10. Valores asignados al NDVI y MDSn umbralizados

Al calcular el producto de los dos mapas, de cada operación se obtendrá el siguiente resultado:

		NDVI		
		NO VEGETACIÓN	VIGOR BAJO	VIGOR ALTO
MDSn	PASTO	1	2	3
	MATORRAL	2	4	6
	ARBOLADO	3	6	9

Figura 6.11. Resultado multiplicación valores NDVI y MDSn umbralizados

Se puede observar que hay valores que se repiten, por lo que el resultado sería un mapa con seis clases (1, 2, 3, 4, 6 y 9) que mezclará información de cubiertas diferentes en los valores 2, 3 y 6. Además, los elementos que no pertenecen a la vegetación se han dividido innecesariamente, ya que serán eliminados del resultado final.

Por esta razón, es conveniente fijar el valor 0 para el umbral “no vegetación” del NDVI, de modo que al multiplicar por el MDSn, el resultado sea siempre 0 y los elementos que no pertenecen a la vegetación queden agrupados en una sola clase que se desactivará de la visualización.

Así pues, los nuevos valores asignados a los umbrales del NDVI y del MDSn son los siguientes:

VALORES NDVI			VALORES MDSn		
NO VEGETACIÓN	VIGOR BAJO	VIGOR ALTO	PASTO	MATORRAL	ARBOLADO
0	1	2	4	5	6

Figura 6.12. Nuevos valores asignados al NDVI y MDSn umbralizados

Al calcular nuevamente el producto de los dos mapas, de cada operación se obtendrá el siguiente resultado:

		NDVI		
		NO VEGETACIÓN	VIGOR BAJO	VIGOR ALTO
MDSn	PASTO	0	4	8
	MATORRAL	0	5	10
	ARBOLADO	0	6	12

Figura 6.13. Nuevo resultado multiplicación valores NDVI y MDSn umbralizados

Atendiendo a los valores de la tabla anterior, la propuesta de clasificación de los modelos de combustible resultaría la siguiente:

- MODELO 1 → Pasto de vigor bajo [4]
- MODELO 2 → Matorral de vigor bajo [5]
- MODELO 3 → Arbolado de vigor bajo [6]
- MODELO 4 → Pasto de vigor alto [8]
- MODELO 5 → Matorral de vigor alto [10]
- MODELO 6 → Arbolado de vigor alto [12]

Por último, desde la simbología se cambian los valores obtenidos por el texto que les corresponde y se aplican colores que faciliten su visualización.

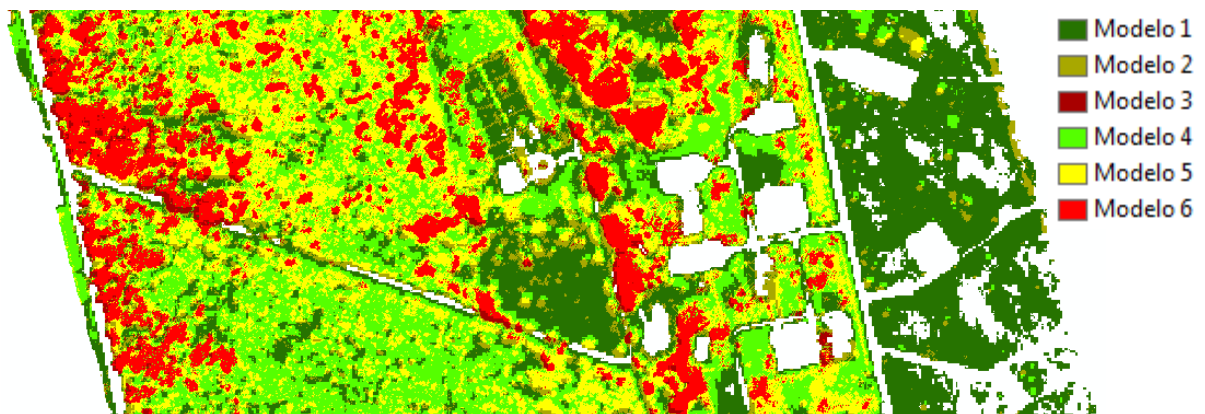


Figura 6.14. Detalle resultado modelo de combustible

6.4. Segmentación

Por otra parte, cabe destacar que una vez extraída la información de ambos sensores, inicialmente se siguió un camino diferente a la umbralización del NDVI y del MDSn explicadas en este documento. El objetivo era obtener la caracterización de la estructura vertical de la vegetación y no únicamente de la altura que ofrecen los primeros ecos de los pulsos láser, de modo que sería posible clasificar las áreas con arbolado en los tres grupos que define el modelo de Prometheus (2000):

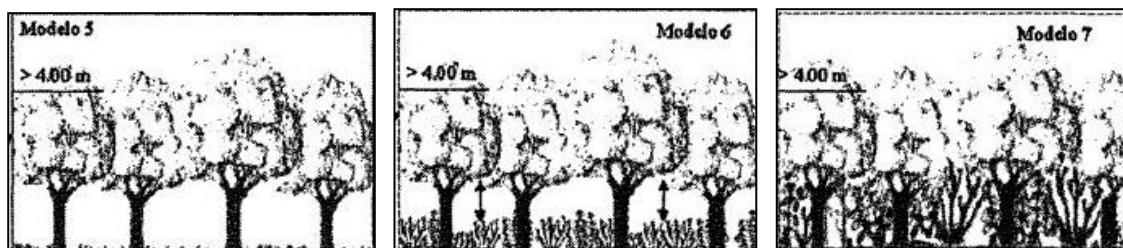


Figura 6.15. Los tres grupos de bosque según Prometheus

- Modelo 5 → Bosque sin combustibles de superficie.
- Modelo 6 → Bosque con combustibles de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles.
- Modelo 7 → Bosque con combustibles de superficie. No existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles (continuidad vertical).

Para ello, se creó una máscara desde ENVI definiendo un valor de NDVI que sirvió como frontera para discriminar los píxeles que pertenecen a la vegetación. Esta máscara se aplicó sobre el resultado de la fusión de las imágenes de satélite QuickBird. Después se realizó una segmentación mediante el software ENVI ZOOM para agrupar los píxeles con un nivel digital similar, lo que generó un shapefile que definía el contorno de los objetos detectados.

A continuación, se incorporó la información de los datos LiDAR con el objetivo de calcular la distribución vertical de los puntos para cada objeto detectado en la segmentación, de modo que sería posible identificar la altura media de la vegetación existente bajo la copa de los árboles. Este paso se realizó mediante el software LIDEX, desarrollado por el Grupo de Investigación de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), que actualmente se encuentra en fase beta. Sin embargo, no se alcanzaron los resultados esperados, por lo que finalmente se decidió seguir el camino basado en la definición de umbrales del NDVI y del MDSn detallado anteriormente.

7. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado una metodología que permite la generación de modelos de combustible en entornos mediterráneos mediante la sinergia entre la información espectral que ofrecen las imágenes de satélite y la información tridimensional del LiDAR aerotransportado. Se ha aplicado sobre la zona forestal de la Devesa del Saler y los resultados han demostrado que, gracias al procedimiento propuesto, es posible alcanzar una caracterización detallada del tipo, estado y distribución de la vegetación.

El modelo presentado ofrece una clasificación de la cubierta vegetal dividida en seis clases de combustible. No obstante, al disponer de la vegetación correctamente identificada, es posible definir diferentes clasificaciones con un mayor número de clases basadas en otros rangos en función de las exigencias de los expertos en gestión forestal, ya que ellos serán los usuarios finales del producto generado.

También cabe destacar que, a pesar de que el modelo de combustible generado puede considerarse como un producto en sí mismo, existen diversas herramientas que permiten su integración en sistemas de prevención, predicción y modelado de incendios para estudiar el comportamiento del fuego, como es el caso del simulador Wildfire Analyst (Ramírez, 2013).

Respecto a los datos de partida, la fecha de adquisición de los mismos no es relevante para el desarrollo del método, pero si se desea establecer una representación fiel a la realidad, los datos deberían ser más actuales. Las imágenes utilizadas fueron capturadas por el satélite QuickBird en 2006 y la nube de puntos fue obtenida por el sistema LiDAR en 2009, por lo que, además de la relativa antigüedad de los datos, la

diferencia de tres años entre ambas fuentes de información puede producir discrepancias en los resultados. Asimismo, debido a que el elemento distintivo de la metodología propuesta es la incorporación de la información sobre el vigor vegetativo, también habría sido útil disponer de imágenes satelitales correspondientes a diferentes fechas para comparar los resultados que ofrece el NDVI, y de esta manera, generar un mapa del vigor vegetativo todavía más preciso. Además, decir que en este trabajo se han utilizado imágenes capturadas por el satélite QuickBird por su alta resolución espacial. Sin embargo, su resolución espectral es únicamente de cuatro bandas, aparentemente suficiente para discriminar la vegetación, pero sería interesante evaluar los resultados que pueden ofrecer nuevos satélites que incluyan un mayor número de bandas y por lo tanto, obtengan información de otros rangos del espectro electromagnético, como por ejemplo el infrarrojo térmico.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, merece especial mención el trabajo realizado por el Grupo de Investigación de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), perteneciente al Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Entre sus múltiples proyectos, destaca el desarrollo del software LIDEX, que actualmente se encuentra en fase beta. Se trata de una herramienta que permite la extracción de parámetros forestales mediante LiDAR e imágenes de alta resolución, a través de una interfaz adaptada a las necesidades de los ingenieros en Geomática.

8. Referencias

CHUVIECO SALINERO, E., MARTÍN ISABEL, M. (2004) *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

ESTORNELL CREMADES, J., RUIZ FERNÁNDEZ, L.A. (2012) *Generación de MDE y MDS en una zona de vegetación arbórea y arbustiva mediante datos LiDAR e imágenes de satélite Quickbird*. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia.

GARCÍA GUTIÉRREZ, J., RIQUELME SANTOS, J.C. (2011) *Intelligent techniques on LiDAR for environmental applications*. Departamento de lenguajes y sistemas informáticos de la Universidad de Sevilla.

GIL YEPES, J.L., RUIZ FERNÁNDEZ, L.A., FERNÁNDEZ SARRÍA, A. (2012) *Detección y localización de árboles en áreas forestales empleando datos LIDAR e imágenes de alta resolución*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica de la Universidad Politécnica de Valencia.

SANJAUME SAUMELL, E., PARDO PASCUAL, J. E. (2011) *Las dunas de la Devesa del Saler*. Incluido en *Las dunas en España*, págs. 263-283. Sociedad Española de Geomorfología.

RAMÍREZ CISNEROS, J., BLANCO MARTÍNEZ, J., CERRILLO CUENCA, A., MARQUÉS RODRÍGUEZ, G., VALCARCE DIÑEIRO, R., LLORDÉN POZO, J.M. (2013) *Generación de cartografía de modelos de combustible a partir de datos LiDAR y análisis de imágenes orientado a objetos para su integración en Wildfire Analyst*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.

RECIO RECIO, J.A., RUIZ FERNÁNDEZ, L.A. (2009) *Técnicas de extracción de características y clasificación de imágenes orientada a objetos aplicadas a la actualización de bases de datos de ocupación del suelo*. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia.

ROLDÁN ZAMARRÓN, A., ANTOLÍN, R., CALZADO-MARTÍNEZ, C., GÓMEZ, A., MANZANERA, J.A., MEROÑO, J.E., PEDRAZZANI, D., PÉREZ, H.H., SANTOS, I., VALBUENA, R. (2008) *Proyecto LINHE: Desarrollo de nuevos protocolos de integración de sensores LiDAR, cámara digital, infrarrojo cercano e hiperespectral*. Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible.

SYED, S., DARE, P., JONES, S. (2005) *Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and lidar data; an object-oriented approach*. Surveying & Spatial Science Institute, Australia.

VICENTE FERRÓN, R., AGUILAR TORRES, M.A., AGUILAR TORRES, F.J. (2011) *Optimización de la clasificación supervisada basada en objetos aplicada a ambientes rurales a partir de ortoimágenes*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Almería.

9. Agradecimientos

Agradezco a mis tutores Alfonso Fernández Sarría y Maru Porres de la Haza su tiempo dedicado a la supervisión de este Trabajo de Fin de Grado, así como su apoyo y participación activa a lo largo de todo el desarrollo. También quiero dar las gracias a Josep Eliseu Pardo Pascual por su colaboración en el tratamiento de los datos LiDAR y en la posterior generación de los modelos de elevaciones.

Para concluir, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los compañeros que he tenido la oportunidad de conocer durante el Grado en Ingeniería Geomática y Topografía, por haber convertido estos años en la universidad en una experiencia tan enriquecedora.

10. Anexos

729000,000000 730000,000000 731000,000000 732000,000000 733000,000000 734000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000



vigor vegetativo



High : 0,636971

Low : -0,350649

NDVI

AUTOR: ALBERTO MONS GARCÍA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA,
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

SISTEMA DE REFERENCIA
ETRS89 ZONA 30N

ESCALA 1:35.000

729000,000000 730000,000000 731000,000000 732000,000000 733000,000000 734000,000000

729000,000000

730000,000000

731000,000000

732000,000000

733000,000000


734000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000



	No vegetación
	Vigor BAJO
	Vigor ALTO

NDVI UMBRALIZADO	
AUTOR: ALBERTO MONS GARCÍA	
 <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA, CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA</p>	SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89 ZONA 30N
	ESCALA 1:35.000

729000,000000

730000,000000

731000,000000

732000,000000

733000,000000

734000,000000

729000,000000 730000,000000 731000,000000 732000,000000 733000,000000 734000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000

4363000,000000
4362000,000000
4361000,000000
4360000,000000
4359000,000000
4358000,000000
4357000,000000
4356000,000000
4355000,000000



Altura (m)



High : 24

Low : 0

MDSn

AUTOR: ALBERTO MONS GARCÍA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA,
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

SISTEMA DE REFERENCIA
ETRS89 ZONA 30N

ESCALA 1:35.000



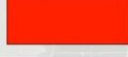
729000,000000 730000,000000 731000,000000 732000,000000 733000,000000 734000,000000


729000.000000 730000.000000 731000.000000 732000.000000 733000.000000 734000.000000

4363000.000000
4362000.000000
4361000.000000
4360000.000000
4359000.000000
4358000.000000
4357000.000000
4356000.000000
4355000.000000

4363000.000000
4362000.000000
4361000.000000
4360000.000000
4359000.000000
4358000.000000
4357000.000000
4356000.000000
4355000.000000



Altura (m)	
	$h < 0.3$
	$0.3 < h < 4$
	$h > 4$

MDSn UMBRALIZADO	
AUTOR: ALBERTO MONS GARCÍA	
	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA, CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA
	SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89 ZONA 30N
ESCALA 1:35.000	



729000.000000 730000.000000 731000.000000 732000.000000 733000.000000 734000.000000


729000.000000 730000.000000 731000.000000 732000.000000 733000.000000 734000.000000

4363000.000000
4362000.000000
4361000.000000
4360000.000000
4359000.000000
4358000.000000
4357000.000000
4356000.000000
4355000.000000

4363000.000000
4362000.000000
4361000.000000
4360000.000000
4359000.000000
4358000.000000
4357000.000000
4356000.000000
4355000.000000



	No vegetación
	Modelo 1
	Modelo 2
	Modelo 3
	Modelo 4
	Modelo 5
	Modelo 6

MODELO DE COMBUSTIBLE	
AUTOR: ALBERTO MONS GARCÍA	
	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA, CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA
	SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89 ZONA 30N
ESCALA 1:35.000	

729000.000000 730000.000000 731000.000000 732000.000000 733000.000000 734000.000000

