



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Establecimiento de rutas óptimas en la conducción de  
operaciones de infantería en la Comarca de O Morrazo a partir de  
datos geoespaciales en soporte SIG*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Álvaro Cabello Gosálvez

**DIRECTORES:** Iván Puente Luna

Mercedes Solla Carracelas

**CURSO ACADÉMICO:** 2016-2017

UniversidadeVigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Establecimiento de rutas óptimas en la conducción de  
operaciones de infantería en la Comarca de O Morrazo a partir de  
datos geoespaciales en soporte SIG*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Infantería de Marina

UniversidadeVigo



## **RESUMEN**

Este Trabajo Fin de Grado tiene por objeto la extracción automatizada de caminos en ámbitos rurales, calculando las rutas óptimas en base a la pendiente del terreno. Para ello, se desarrolla una herramienta en Matlab que permite obtener las coordenadas UTM (X, Y, Z) de todos los puntos del camino para, a continuación, calcular la longitud y la pendiente en cada tramo. La extracción de las coordenadas planimétricas se realiza a partir de ortofotografías aéreas mientras que la altimetría se obtiene de las nubes de puntos capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR. Ambas fuentes de datos están disponibles de forma gratuita en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Asimismo, para validar la herramienta y su funcionalidad, el estudio se completa teniendo en cuenta distintos vehículos que podrían ser utilizados por el Tercio de Armada y que presentan distintas restricciones de pendiente para su circulación. Se presenta un caso de estudio sobre una cuadrícula de 17 kilómetros cuadrados en la Comarca de O Morrazo (Pontevedra). Finalmente, las rutas óptimas extraídas de la herramienta serán importadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), de forma que se muestre también la versatilidad de la información obtenida y su integración en estudios de planificación territorial y análisis multicriterio (como por ejemplo, cercanía a núcleos de población, infraestructura viaria de primer orden, masas de agua, etc).

## **PALABRAS CLAVE**

Rutas óptimas, Optimización, Automatización, LiDAR, Ortofotografía, Matlab, SIG



# AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que confiaron en mí.

A mis tutores por su dedicada atención y su disponibilidad durante el periodo que se realizó este trabajo.

A mis compañeros de camareta Víctor y Pepe por su apoyo y las ideas que aportaron durante toda la realización del proyecto.

A Alfonso, Adrián y Tirso que me ayudaron en la comprensión de conceptos aplicados al trabajo y aportaron ideas para mejorarlo.

En especial a mis padres y a mi hermana por todo el apoyo que me dieron desde el principio.

Y a todos los que se interesaron en algún momento por mi trabajo.



## CONTENIDO

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                           | 1  |
| Índice de Figuras .....                                   | 3  |
| Índice de Tablas.....                                     | 7  |
| 1 Introducción y Objetivos .....                          | 9  |
| 1.1 Justificación .....                                   | 9  |
| 1.2 Objetivos .....                                       | 10 |
| 1.2.1 Objetivos generales.....                            | 10 |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....                         | 10 |
| 2 Estado del Arte .....                                   | 11 |
| 2.1 Optimización de rutas .....                           | 11 |
| 2.1.1 Ventajas del uso de rutas óptimas.....              | 12 |
| 2.1.2 Teoría de Grafos .....                              | 12 |
| 2.2 Sistemas de Información Geográfica .....              | 15 |
| 2.2.1 Concepto de SIG.....                                | 15 |
| 2.2.2 Reseña histórica de los SIG .....                   | 16 |
| 2.2.3 Uso de SIG para la optimización de rutas .....      | 17 |
| 2.2.4 SIG en el mundo militar .....                       | 17 |
| 2.3 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.....            | 19 |
| 2.3.1 Fotogrametría aérea .....                           | 20 |
| 2.3.2 LiDAR aéreo.....                                    | 21 |
| 2.3.3 Aplicaciones militares .....                        | 22 |
| 3 Desarrollo del TFG.....                                 | 25 |
| 3.1 Selección de la zona de estudio.....                  | 26 |
| 3.2 Herramientas de trabajo .....                         | 27 |
| 3.2.1 Matlab .....                                        | 27 |
| 3.2.2 RiSCAN Pro .....                                    | 28 |
| 3.2.3 Total GIS Converter .....                           | 28 |
| 3.2.4 GvSIG .....                                         | 28 |
| 3.2.5 Visor Iberpix 4.....                                | 28 |
| 3.3 Datos de partida .....                                | 28 |
| 3.3.1 Ortofotografía aérea.....                           | 31 |
| 3.3.2 LiDAR .....                                         | 33 |
| 3.4 Obtención de las coordenadas UTM de los caminos ..... | 35 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.1 Filtrado de las imágenes .....                                      | 35 |
| 3.4.2 Esqueletización de la imagen.....                                   | 40 |
| 3.4.3 Extracción de las coordenadas UTM de los caminos .....              | 42 |
| 3.5 Cálculo de las pendientes longitudinales .....                        | 44 |
| 3.6 Creación del grafo en Matlab .....                                    | 46 |
| 3.7 Algoritmo para cálculo de la ruta óptima (Algoritmo de Dijkstra)..... | 47 |
| 3.8 Implementación en gvSIG .....                                         | 48 |
| 4 Resultados y Discusión .....                                            | 51 |
| 4.1 Selección de la zona de estudio.....                                  | 51 |
| 4.2 Pruebas sobre el camino más corto .....                               | 55 |
| 4.2.1 URO VAMTAC ST5 .....                                                | 56 |
| 4.2.2 Vehículo de Combate Piraña IIIC versión ambulancia .....            | 58 |
| 4.2.3 Land Rover Defender .....                                           | 60 |
| 4.3 Comparación de los resultados .....                                   | 62 |
| 4.3.1 Comparación de distancias recorridas .....                          | 62 |
| 4.3.2 Comparación de las rutas tomadas .....                              | 62 |
| 4.4 Resultados con gvSIG .....                                            | 65 |
| 5 Conclusiones y Líneas Futuras .....                                     | 69 |
| 5.1 Conclusiones .....                                                    | 69 |
| 5.2 Líneas Futuras .....                                                  | 70 |
| 6 Bibliografía.....                                                       | 71 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1 Puentes de Königsberg .....                                                               | 13 |
| Figura 2-2 Explicación de <i>Every Planar Map is Four Coloreable</i> [7] .....                       | 13 |
| Figura 2-3 Ejemplo de grafo .....                                                                    | 13 |
| Figura 2-4 Fragmento del plano del Metro de Madrid [12] .....                                        | 15 |
| Figura 2-5 Ejemplo de capas en SIG [15] .....                                                        | 16 |
| Figura 2-6 Representación de toma de fotografías aéreas [15] .....                                   | 21 |
| Figura 2-7 Representación de solape entre pasadas [15] .....                                         | 21 |
| Figura 3-1 Workflow .....                                                                            | 26 |
| Figura 3-2 Localización de la Península do Morrazo [22] .....                                        | 27 |
| Figura 3-3 Zona de estudio.....                                                                      | 27 |
| Figura 3-4 Captura del proceso de descarga de datos [28].....                                        | 29 |
| Figura 3-5 Captura del proceso de descarga de datos [28].....                                        | 29 |
| Figura 3-6 Captura del proceso de descarga de datos [28].....                                        | 30 |
| Figura 3-7 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter .....       | 32 |
| Figura 3-8 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter .....       | 32 |
| Figura 3-9 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter .....       | 33 |
| Figura 3-10 Ejemplo de una nube de puntos de la zona de estudio visualizada en RiSCAN Pro.....       | 33 |
| Figura 3-11 Cuadrículas utilizadas para la extracción de la altimetría (zona de estudio en rojo).... | 34 |
| Figura 3-12 Proceso de extracción de la nube de puntos desde RiSCAN Pro .....                        | 34 |
| Figura 3-13 Selección del área a extraer en RiSCAN Pro.....                                          | 35 |
| Figura 3-14 Comparación imagen en escala de grises (izquierda) con filtro mediana (derecha) ....     | 36 |
| Figura 3-15 Filtro gaussiano con $\sigma = 5$ .....                                                  | 37 |
| Figura 3-16 Filtro gaussiano con $\sigma = 30$ .....                                                 | 37 |
| Figura 3-17 “ <i>Difference of Gaussians</i> ” .....                                                 | 37 |
| Figura 3-18 Detalles de la imagen tras aplicar el filtro DoG .....                                   | 38 |
| Figura 3-19 Detalles de la imagen tras ser binarizada.....                                           | 38 |
| Figura 3-20 Detalle tras la eliminación de grupos de menos de 400 píxeles aislados .....             | 39 |
| Figura 3-21 Ejemplo proceso de cierre de imagen.....                                                 | 39 |
| Figura 3-22 Ejemplo proceso de esqueletización.....                                                  | 40 |
| Figura 3-23 Ejemplo de la anchura del esqueleto de los caminos.....                                  | 40 |
| Figura 3-24 Rama origen de referencia usada para eliminar ramas menores de 23 píxeles .....          | 41 |
| Figura 3-25 Eliminación de ramas (rojo) y obtención del camino limpio (verde).....                   | 41 |
| Figura 3-26 Ejemplo limpieza de los esqueletos de los caminos .....                                  | 42 |
| Figura 3-27 Nube de puntos de la zona de estudio visualizada en Matlab.....                          | 42 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-28 Captura de pantalla explicación funcionamiento comando “ <i>rot</i> ” .....                    | 43 |
| Figura 3-29 Ejemplo nube de puntos de los caminos .....                                                    | 44 |
| Figura 3-30 Cálculo de la pendiente .....                                                                  | 44 |
| Figura 3-31 Captura de pantalla para explicar el funcionamiento de “ <i>knnsearch</i> ” .....              | 45 |
| Figura 3-32 Explicación “ <i>reshape</i> ” y diferencia de alturas entre los vecinos y la 1ª columna ..... | 45 |
| Figura 3-33 Captura de pantalla comparación diferencia de altura y pendiente (4ª columna) .....            | 46 |
| Figura 3-34 Comparativa de eliminación de duplicados mediante “ <i>unique</i> ” .....                      | 46 |
| Figura 3-35 Ejemplo de representación del grafo .....                                                      | 47 |
| Figura 3-36 Ejemplo búsqueda camino óptimo [32] .....                                                      | 47 |
| Figura 3-37 Ejemplo de resultado obtenido subrayado en verde .....                                         | 48 |
| Figura 3-38 Capa IFM de la Provincia de Pontevedra .....                                                   | 49 |
| Figura 4-1 Captura de pantalla visualización de la imagen importada en Matlab .....                        | 51 |
| Figura 4-2 Comparación de valores escala de grises (izquierda) y filtro mediana (derecha) .....            | 52 |
| Figura 4-3 Comparativa entre filtros LoG (izquierda) y DoG (derecha) .....                                 | 52 |
| Figura 4-4 Comparativa uso de “ <i>bwareopen</i> ” 100 píxeles (izquierda) y 700 píxeles (derecha) ....    | 53 |
| Figura 4-5 Nube de puntos que representa los caminos extraídos automáticamente .....                       | 53 |
| Figura 4-6 Nube de puntos que representa los caminos segmentados manualmente .....                         | 54 |
| Figura 4-7 Ejemplo cruce de caminos en la matriz con las coordenadas Z de cada píxel .....                 | 54 |
| Figura 4-8 Visualización del grafo .....                                                                   | 55 |
| Figura 4-9 Punto de partida .....                                                                          | 56 |
| Figura 4-10 Punto de llegada .....                                                                         | 56 |
| Figura 4-11 URO VAMTAC ST5 de IM [33] .....                                                                | 57 |
| Figura 4-12 Plot en 3D del resultado VAMTAC .....                                                          | 57 |
| Figura 4-13 Plot en 2D del resultado VAMTAC .....                                                          | 58 |
| Figura 4-14 Piraña IIIC Ambulancia [35] .....                                                              | 58 |
| Figura 4-15 Plot en 3D del resultado Piraña .....                                                          | 59 |
| Figura 4-16 Plot en 2D del resultado Piraña .....                                                          | 60 |
| Figura 4-17 Land Rover Defender [35] .....                                                                 | 60 |
| Figura 4-18 Plot en 3D resultado Land Rover Defender .....                                                 | 61 |
| Figura 4-19 Plot en 2D resultado Land Rover Defender .....                                                 | 61 |
| Figura 4-20 Comparación primer tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta) .....                | 63 |
| Figura 4-21 Comparación segundo tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta) .....               | 64 |
| Figura 4-22 Comparación tercer tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta) .....                | 65 |
| Figura 4-23 Visualización de la capa de puntos pertenecientes al camino óptimo .....                       | 66 |
| Figura 4-24 Trazado de la polilínea a partir de los puntos de la ruta óptima .....                         | 66 |
| Figura 4-25 Visualización de la polilínea (rojo) sobre la capa de masa forestal (azul) .....               | 67 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-26 Visualización de las diferentes áreas de vegetación a lo largo del camino ..... | 67 |
| Figura 4-27 Captura de pantalla de la tabla de atributos .....                              | 68 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1 Especificaciones técnicas Vuelo Fotogramétrico [29]..... | 30 |
| Tabla 3-2 Especificaciones técnicas Vuelo LiDAR [29] .....         | 31 |
| Tabla 4-1 Características URO VAMTAC ST5 [34] .....                | 57 |
| Tabla 4-2 Características Piraña IIIC Ambulancia [35] .....        | 59 |
| Tabla 4-3 Características Land Rover Defender [35].....            | 61 |
| Tabla 4-4 Comparativa distancia recorrida .....                    | 62 |
| Tabla 4-5 Tabla explicativa de las especies predominantes .....    | 68 |
| Tabla 4-6 Tabla explicativa del tipo de estrato .....              | 68 |



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Justificación

El planeamiento de desplazamientos en operaciones militares es de vital importancia para la seguridad de las fuerzas desplegadas y para asegurar el cumplimiento de las misiones encomendadas. Para mejorar la seguridad de las fuerzas durante los movimientos, es preciso realizar un conjunto de acciones antes, durante y después de su ejecución. Por ello, es imperativo efectuar un detallado planeamiento. Diversos factores influyen en la realización de los movimientos, siendo los más destacados:

- Existencia de rutas y condiciones de vialidad en función del tipo de vehículos que se desplazan (pendientes).
- Poblaciones a atravesar.
- Distancia a recorrer.
- Red de comunicaciones.
- Medios a trasladar.

Cada convoy necesita un estudio de los posibles itinerarios a utilizar para llegar al objetivo en el menor tiempo posible, así como los que se pueden emplear para regresar, considerando las rutas principales y alternativas disponibles, además de las diferentes vías de acceso y repliegue. También es necesario un estudio del terreno donde se vaya a realizar el movimiento, puesto que las características y relieve del mismo condicionarán el tipo de comunicaciones a emplear. Por ejemplo, la orografía influirá en el enlace de radiocomunicación si se transmite con ondas espaciales (VHF y UHF), por lo que sería necesario coordinar la utilización del espectro electromagnético para permitir el mando y control y la utilización eficiente de los inhibidores de frecuencia y otras contramedidas [1].

Tanto si los movimientos son tácticos como logísticos o si se realizan a pie o sobre vehículo, son operaciones de combate y se les debe tratar así. Requieren un planeamiento y coordinación mayor que otras operaciones. La probabilidad de encontrar al enemigo es mucho mayor durante los movimientos y por esa razón se necesita mayor detalle en su preparación [2].

Como expresa el dicho militar “*La infantería no conoce de obstáculos*”, no importan los obstáculos encontrados; la infantería será capaz de superarlos. Pero no es igual de sencillo si el desplazamiento se realiza a bordo de vehículos (unidades mecanizadas, artillería). En este caso, se depende de las capacidades de los vehículos para salvar los obstáculos naturales del terreno o artificiales que el enemigo instale. De este modo, la viabilidad de una línea de acción que se vaya a emplear contra el enemigo depende de los obstáculos encontrados en ella y de las posibilidades de nuestros vehículos para superarlos, por lo que un meticuloso estudio del terreno es preceptivo en la realización de operaciones.

El tiempo durante situaciones de combate es un recurso vital que puede salvar vidas de las tropas en peligro si se actúa oportunamente. Asimismo, en situaciones de emergencia puede que no se disponga del tiempo necesario para realizar un adecuado estudio del terreno de forma manual, por lo que disponer de una herramienta informática que calcule la ruta óptima para realizar nuestros movimientos supondría un gran ahorro de tiempo, tanto en la planificación como en el desplazamiento.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, con este Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG) se pretende agilizar el proceso de planeamiento de rutas óptimas y desplazamiento de unidades militares haciendo uso de sistemas informáticos como Matlab y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos generales

El presente TFG tiene por objetivo principal desarrollar una herramienta que agilice el planeamiento eficaz de los movimientos, tanto tácticos como logísticos, de las unidades militares en zona de operaciones. Más concretamente, la herramienta permitirá establecer rutas óptimas en función de las características del vehículo utilizado y, consecuentemente, de la pendiente del terreno. La idea primordial es automatizar todo lo posible el proceso. El usuario sólo seleccionaría de manera manual el punto de origen y el de destino de su desplazamiento. Las ortofotografías y barridos LiDAR de la zona de operaciones se pueden adquirir haciendo uso de fuentes de datos abiertos (open data, en inglés), o mediante su obtención *in situ*, pudiendo planearse por ejemplo, el itinerario óptimo para un convoy logístico entre dos bases de operaciones avanzadas (*Forward Operating Base* o FOB por sus siglas en inglés).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Actualmente, el empleo de los SIG en el mundo militar es de vital importancia debido al ahorro de tiempo que suponen respecto a cómo se conducían las operaciones en el pasado. Este TFG, además de desarrollar la herramienta de extracción de rutas óptimas, investiga sobre el empleo de los SIG en el planeamiento de desplazamientos tácticos de unidades en el campo de batalla. A continuación se enumeran los objetivos específicos:

1. Manejo de *software* específico como Matlab o SIG.
2. Manejo de *open data*, tanto fotografías PNOA de máxima actualidad como datos LiDAR del caso de estudio.
3. Desarrollo de un algoritmo en Matlab para la extracción automatizada de caminos en zonas rurales a partir de las ortofotografías (para planimetría) y utilización del modelo de nube de puntos (para altimetría).
4. Cálculo y extracción de rutas óptimas utilizando criterios de pendiente del terreno.
5. Importar los datos en un programa SIG para analizar el potencial de los datos de rutas óptimas generados en estudios de análisis multicriterio; por ejemplo, establecer la ruta que mejor se ajuste a las necesidades de la unidad en caso de que necesite pasar cerca de un núcleo de población, existencia de masas de agua para su abastecimiento o acceso a una vía de comunicación de primer orden.

## 2 ESTADO DEL ARTE

A lo largo del presente capítulo, se detalla cómo surge el concepto de ruta óptima a partir de la Teoría de Grafos y se describen las ventajas de la utilización de estos métodos. A continuación, se describe lo que es un Sistema de Información Geográfica y se presentan las ventajas del uso de estos sistemas frente a los métodos tradicionales de trabajo, incluyendo ejemplos de aplicación de esta tecnología y, en concreto, en el ámbito militar.

Posteriormente, se presenta la tecnología a partir de la cual se toman los datos para la realización de este trabajo; levantamiento fotogramétrico y ortofotografías del PNOA, tecnología LiDAR y los programas informáticos utilizados.

Por último, se mencionan varios ejemplos en los que se aplican los métodos previamente descritos y sus ventajas en el planeamiento de desplazamientos.

### 2.1 Optimización de rutas

El concepto de optimización de rutas se puede definir como el proceso de diseño de la ruta de menor coste para el usuario. La ruta con menor distancia espacial a recorrer no siempre es la ruta óptima. Para explicar esto, se pueden tomar como ejemplo las calles de una gran ciudad en hora punta, siendo el criterio a utilizar, el recorrido de menor tiempo de desplazamiento. Así, además de la longitud espacial recorrida, se definirá un coste en función de la densidad de tráfico y de otros condicionantes como la dirección de las calles o su carácter peatonal o privado. Al establecer el recorrido, el coste será mayor en aquellos tramos cuya densidad de tráfico sea más elevada, llegando incluso a ser de valor infinito en las vías donde circulación esté prohibida. De esta manera, el camino óptimo entre dos puntos de la ciudad bajo estos criterios, puede distar considerablemente de ser la ruta más corta [3].

La medición de este coste puede ser: en el tiempo empleado para realizar el desplazamiento, en el coste monetario del combustible consumido para ejecutar el trayecto, o en la distancia recorrida para completar el itinerario. Estos tres principios están íntimamente relacionados y, generalmente, si se aumenta uno de ellos los otros también lo harán. La aplicación de este sencillo concepto supone un gran ahorro en costes y una reducción del tiempo empleado para realizar los desplazamientos.

Este concepto es de gran utilidad para todas las empresas, cuyo último fin es siempre reducir al máximo sus gastos e incrementar sus beneficios. De la misma forma, la optimización de rutas también tiene gran aplicabilidad en el ámbito militar. Las unidades militares realizan desplazamientos con asiduidad y el empleo de rutas óptimas es esencial para ganar tiempo y abaratar el coste de los traslados. Esta concepción está más orientada a los movimientos por tierra, donde el terreno y las vías de comunicación son los factores clave. En tiempo de paz, el traslado de unidades por medios aéreos o por

vía marítima es más sencillo de planear, ya que no se cuenta con el inconveniente del terreno. Sin embargo, la situación cambia en tiempo de guerra, debido a que durante los desplazamientos se deben tener en cuenta consideraciones tácticas para evitar que el enemigo interfiera en nuestros desplazamientos.

El estudio de este principio se remonta al siglo XVIII, con el surgimiento de la Teoría de Grafos, como se detallará en el apartado 2.1.2.

### 2.1.1 Ventajas del uso de rutas óptimas

Desde el punto de vista de una empresa de tipo logístico o que precise de constantes movimientos de mercancías o vehículos, el uso de rutas óptimas para este traslado es esencial. Las ventajas de la optimización de las rutas de transporte son las siguientes:

- Ahorro de costes logísticos. Es habitual para las empresas diseñar los itinerarios dividiendo la ciudad en sectores o dejar que el propio conductor decida la ruta de reparto. No obstante, la práctica demuestra que las rutas generadas por un algoritmo de optimización son más eficientes que las realizadas por una persona experta. Las rutas óptimas implican menos kilómetros, menos tiempo de desplazamientos y más ahorro en combustible gastado. Por lo tanto, pueden suponer un gran ahorro de los costes logísticos de despacho.
- Ahorro en tiempo de trabajo. El diseño manual de rutas de transporte consume gran cantidad de tiempo para un trabajador. Si además hay que tener en cuenta el uso de varios tipos de vehículos, con diferentes capacidades de carga, el tiempo empleado es mucho mayor. El uso de un *software* informático para esta tarea reduce el tiempo de diseño en gran proporción y, probablemente, se obtendrá un mejor resultado.
- Aumento de la satisfacción de los clientes. El diseño de rutas mediante *software* informático ofrece, a mayores, la opción de incluir requisitos personalizados de cada cliente, como por ejemplo la franja horaria de reparto para asegurar que el cliente va a recibir el pedido; de este modo se garantiza la satisfacción del usuario con el servicio, a la vez que la empresa se asegura la resolución del pedido. Mediante los métodos de optimización de rutas se consigue, por tanto, incrementar la tasa de reparto y con ella disminuir los costes de logística inversa; es decir, los costes de vuelta del artículo al almacén y su nuevo almacenaje.
- Mejor empleo de los vehículos. El empleo de rutas óptimas permite evaluar cada día cuántos vehículos se van a utilizar. No es necesario el empleo de todos los vehículos a la hora de realizar desplazamientos. Este método permite reducir los parques de vehículos, los costes de combustible y conductores, así como el mantenimiento de los mismos.
- Atender a más clientes. Los *software* de optimización de rutas permiten un mayor control de los vehículos, aumentando así hasta un 15% el número de clientes atendidos diariamente [4].

### 2.1.2 Teoría de Grafos

En Matemáticas y en Ciencias de la Computación, la Teoría de Grafos estudia las propiedades de los grafos. Un grafo es un conjunto, no vacío, de objetos llamados vértices (o nodos) y una selección de pares de vértices, llamados aristas que pueden ser orientados o no. Típicamente, un grafo se representa mediante una serie de puntos (los vértices) conectados por líneas (las aristas).

El inicio de esta teoría tuvo lugar en 1736, en un artículo de Leonhard Euler. El trabajo surgió a raíz de la problemática de los puentes de Königsberg. Durante el Siglo XVIII, la ciudad de Königsberg, en Prusia Oriental estaba dividida en cuatro zonas por el río Pregel. Había siete puentes que comunicaban estas regiones, tal y como se muestra en la Figura 2-1. Los habitantes de la ciudad hacían paseos dominicales tratando de encontrar una forma de caminar por la ciudad, cruzando cada puente una sola vez, y regresando al lugar de partida [5].

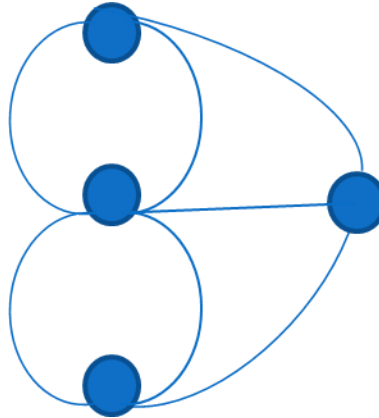


**Figura 2-1 Puentes de Königsberg**

El trabajo de Leonhard Euler en 1736, también se considera uno de los primeros resultados topológicos en geometría. En 1852, Francis Guthrie planteó el problema de los cuatro colores, que trataba de colorear cualquier mapa de países con sólo cuatro colores y de tal forma que dos países vecinos nunca tengan el mismo color (*Every Planar Map is Four Coloreable*). Este problema, que no fue resuelto hasta un siglo después por Kenneth Appel y Wolfgang Haken, puede ser considerado como el nacimiento de la Teoría de Grafos (Figura 2-2). Al tratar de resolverlo, se definieron los términos y conceptos teóricos fundamentales de los grafos [6].

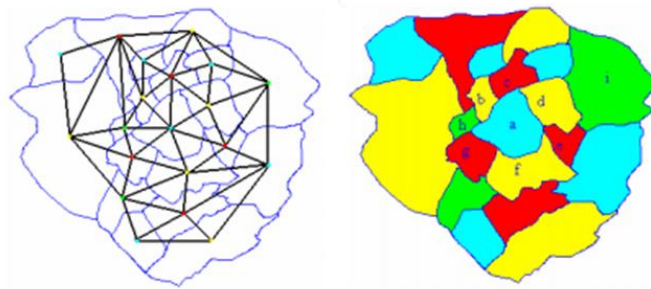


**Figura 2-2 Explicación de *Every Planar Map is Four Coloreable* [7]**

Un grafo  $G$  es un par  $(V, E)$ , donde “ $V$ ” y “ $E$ ” son conjuntos, junto con una aplicación:

$$\gamma G : E \rightarrow \{\{u, v\} : u, v \in V\} \quad (\text{Ec. 1})$$

Al conjunto “ $V$ ” se le llama conjunto de vértices; al conjunto “ $E$ ” conjunto de lados o aristas, y a la aplicación “ $\gamma G$ ” (o simplemente  $\gamma$ ) aplicación de incidencia.

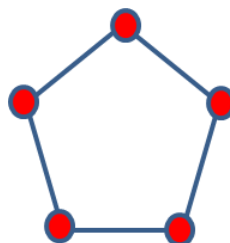


**Figura 2-3 Ejemplo de grafo**

En teoría de grafos, sólo queda lo esencial del dibujo. La forma de las aristas no es relevante, pues solo importa a que vértices están unidas; tampoco importa la posición de los vértices, que se puede variar para obtener un dibujo más claro.

Muchas redes de uso cotidiano pueden ser modeladas con un grafo, por ejemplo una red de carreteras que conecta ciudades, una red eléctrica o la red de drenaje de una ciudad [5].

### **2.1.2.1 Aplicaciones de los grafos**

La Teoría de Grafos y la optimización de rutas han sido el objeto de numerosos estudios en diversos campos de aplicación como la recogida de RSU (Residuos Sólidos Urbanos), transporte y recogida de materiales peligrosos, diseño de rutas para minusválidos y transporte urbano de pasajeros. En ellos, se hacen los estudios tomando los puntos de origen y final como nodos, y los trayectos entre ellos como aristas en un grafo, a las que se les asigna un determinado peso y dirección si están dirigidos. A continuación, se recogen cuatro ejemplos de aplicación de dicha Teoría.

#### **2.1.2.1.1 El Problema del Cartero Chino**

El problema del cartero chino, también conocido como problema del circuito del cartero, el problema de los correos o problema de la inspección y selección de rutas, es el primer problema de rutas por arcos en el que se plantea la posibilidad de construir un ciclo Euleriano con coste óptimo. Fue planteado originalmente por el matemático chino Kwan Mei-Ko en un artículo de un diario chino en 1960 y traducido al inglés en 1962. Lo que Mei-Ko planteaba era el problema al que se enfrenta el cartero para repartir la correspondencia recorriendo la menor distancia posible, que matemáticamente consiste en encontrar un *tour* en el grafo de longitud mínima. Este problema dio lugar a multitud de variantes [8].

#### **2.1.2.1.2 Recogida de RSU**

La recogida de RSU es uno de los principales campos de aplicación de las rutas óptimas en el mundo civil. El objetivo perseguido es el ahorro de tiempo y combustible de los camiones de recogida en los trayectos dentro de poblaciones urbanas. Requiere la convergencia de diversas áreas de conocimiento relacionadas, entre las que se incluyen los análisis de generación de basuras y los estudios sobre diseño de recorridos en red. Las redes de recogida de RSU se diseñan dependiendo de la zona, la estacionalidad y del día de la semana para optimizar el paso de los camiones por las diferentes áreas residenciales de las ciudades.

La mayoría de estos estudios fueron llevados a cabo por la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU [9].

#### **2.1.2.1.3 Transporte público**

Las rutas de transporte de pasajeros consisten en la recogida de los clientes en puntos prefijados, llamados paradas, distribuidos geográficamente a lo largo de un territorio. La eficiencia de las rutas depende en gran medida de la distribución geográfica de las paradas y su distancia al punto de destino. La finalidad de estas rutas de cara a la empresa, es recoger al máximo de clientes con el menor coste de combustible posible.

El tiempo es otro de los parámetros fundamentales de la optimización de rutas, ya que debe ser lo más rápida posible. Para esto se deben tener en cuenta las vías por las que se va a circular, ya que la velocidad máxima para la circulación depende del tipo de vía, autopistas, vías urbanas, etc [10].

Se pueden aplicar los mismos requisitos para el caso de transporte ferroviario o de metro urbano. A modo de ejemplo, el plano del Metro de Madrid mostrado en la Figura 2-4 se puede entender como un grafo en el que las estaciones son los nodos y los tramos contenidos entre ellas son las aristas. El peso asignado a cada arista puede depender, además del tiempo empleado en el desplazamiento, de la frecuencia de cada línea de metro y del tiempo entre trasbordos. En este caso, han implementado numerosos algoritmos que determinan la ruta óptima entre todas las paradas de metro, dependiendo de si se quieren realizar los menores transbordos posibles o emplear la ruta más rápida [11].



Figura 2-4 Fragmento del plano del Metro de Madrid [12]

#### 2.1.2.1.4 Rutas para minusválidos

Con el objetivo de poder conocer y disfrutar el patrimonio arquitectónico de una ciudad, se desarrollaron herramientas para la creación de rutas aptas para personas con movilidad reducida. Dependiendo de las limitaciones de la persona se pueden tomar diferentes rutas: para personas que usen muletas, sillas de ruedas, etc.

La accesibilidad ha pasado a ser una característica básica a tener en cuenta desde el inicio de cualquier proyecto, lo que introduce la cuestión de cómo intervenir el patrimonio histórico para hacerlo accesible y poder solucionar incidencias relacionadas con la accesibilidad física que permitan adoptar medidas para eliminar los obstáculos en el entorno físico, especialmente para aquellos colectivos de personas que sufren algún tipo de discapacidad. A pesar de ello, la posibilidad de actuación sobre estos bienes es limitada debido a las necesidades de conservación de los mismos como parte fundamental de la cultura [13].

## 2.2 Sistemas de Información Geográfica

### 2.2.1 Concepto de SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son el resultado de la aplicación de las llamadas tecnologías de la información a la gestión de la información geográfica. El término Sistema de Información Geográfica (SIG) tiene tres acepciones: el SIG como disciplina; el SIG como proyecto (cada una de las realizaciones prácticas, de las implementaciones existentes) y el SIG como *software* (es decir los programas y aplicaciones de un proyecto SIG). La acepción principal es la de SIG como proyecto, sistema de información que gestiona información geográfica, es decir, información georreferenciada [14].

Se puede definir un SIG como: base de datos computarizada que contiene información espacial. Es una tecnología informática para gestionar y analizar información espacial. Se trata de un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en capas (Figura 2-5) y tablas de atributos o bases de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas [15].

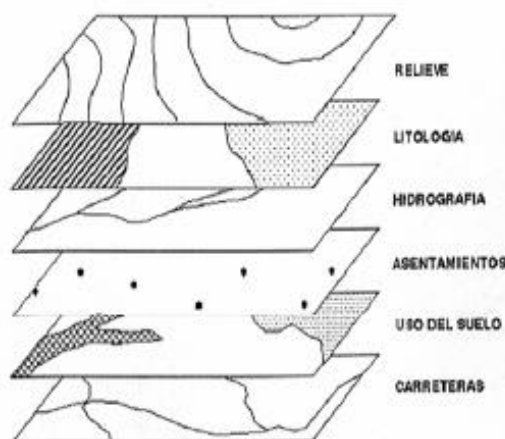


**Figura 2-5 Ejemplo de capas en SIG [15]**

En cualquier caso, un SIG se compone de datos, hardware, *software*, recursos humanos y un esquema organizativo [14].

### 2.2.2 Reseña histórica de los SIG

Los SIG han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas. Con el paso de los años, la popularización de tecnologías y desarrollos llevados a cabo por estos sistemas han redefinido la disciplina e incorporado elementos impensables en sus inicios.

En la década de los cincuenta se inicia una corriente que propone nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis que acabarán conformando, diez años más tarde, el llamado paradigma cuantitativo o de análisis espacial, principal fundamento teórico de los SIG. Otras innovaciones tecnológicas y nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis de datos desarrollados posteriormente en los años sesenta y setenta, propiciaron, junto a la disponibilidad de nueva información (teledetección), el nacimiento de los SIG [3].

El origen de los SIG se remonta a principios de la década de los sesenta del pasado siglo, cuando un grupo de diversos especialistas acometieron con instrumental informático el procesamiento de volúmenes considerables de datos geográficos para diferentes propósitos: planeamiento regional, percepción del paisaje, asignación de usos del suelo, etc.; el hecho de no tratarse de técnicos informáticos condicionó, en cierta medida, la evolución de los SIG. El *Canada Geographyc Information System* (CGIS) es considerado el primer SIG y se desarrolló en Canadá bajo la responsabilidad del Departamento Federal de Energía y Recursos. Este sistema estaba dirigido al tratamiento de datos del inventario rural. La aparición del CGIS no solo supuso el nacimiento de los SIG, sino que sentó las bases para el desarrollo de nuevas técnicas tales como la codificación y almacenamiento de información geográfica.

Paralelamente a Canadá, Estados Unidos produce sus propias aportaciones al campo de los SIG. En el Laboratorio de Harvard ve la luz Synagraphic Mapping System (SYMAP), en el año 1964. Esta aplicación basaba su entrada en una serie de puntos, líneas y áreas, y es el punto de inicio de los SIG vectoriales. En 1969 se desarrolla el GRID en el Laboratorio de Harvard haciendo uso de elementos de una versión anterior de SYMAP. Se trata de una aplicación informática en la cual la información es almacenada en cuadrículas, lo cual marcó un importante hito ya que, hasta ese momento, las cuadrículas regulares eran únicamente empleadas para las salidas de aplicaciones *software*; no como información de entrada de los mismos. Este hecho supuso el punto de inicio de los SIG ráster.

Estos pioneros que desarrollaron prototipos de SIG (CGIS, SYMAP, GRID, etc), que funcionaban en equipos grandes y costosos, que precisaban muchas instrucciones manuales, y cuya finalidad última era generar e imprimir mapas. En pocos años mejoraron los equipos informáticos y se perfeccionaron

los programas, de tal forma que se amplió el ámbito de las aplicaciones y creció la aceptación entre profesionales y en el mundo universitario [16].

Entre 1970 y 1972 se afianza la expresión "Sistemas de Información Geográfica" y comienza su auge, debido a la capacidad para abordar problemas prácticos. En la década de los ochenta, diversos factores han contribuido a hacer, de los SIG actuales, herramientas maduras y versátiles. Por un lado, aparecen avances técnicos que afectan a todas las fases de manejo de información: en la captura, cuya expresión más refinada son los datos de teledetección por satélite y los de SPG (Sistemas de Posicionamiento Global), y en la visualización, merced a periféricos más precisos y veloces. Por otro, se gana velocidad y exactitud en los procesos de cálculo, por la aplicación de depurados algoritmos al tratamiento de las bases temáticas y a la geometría de los objetos, a la par que los resultados se generalizan en documentos de nuevo estilo, como las técnicas de hipermedia y realidad virtual.

El reciente progreso de los SIG muestra tendencias a la especialización y a implementarse en ordenadores personales, para conquistar segmentos diferenciados del mercado. Con todo ello, los SIG han logrado un elevado estatus entre los diversos sistemas informáticos [3].

### 2.2.3 Uso de SIG para la optimización de rutas

El empleo conjunto de herramientas SIG con el establecimiento de rutas óptimas está muy extendido, pues permite integrar los beneficios del tratamiento de información geográfica con los algoritmos de cálculo de rutas óptimas. Mediante el uso de la tecnología SIG, con la ayuda del GPS (*Global Positioning System*), así como con mapas digitales de la red viaria nacional, muchas empresas se sumaron a una nueva forma más rápida y eficiente de diseño de sus rutas de distribución, disminuyendo en gran medida sus gastos de transporte y aumentando la productividad de su flota. Mediante la tecnología SIG, los sistemas de gestión de almacenes y los sistemas de administración de transporte logran despachar una gran cantidad de pedidos usando diferentes vehículos y diseñando las rutas de reparto en pocos minutos.

Cada día son más las empresas que se suman al uso de sistemas SIG en conjunción con el establecimiento de rutas óptimas debido a los factores previamente comentados. Para su empleo, existe *software* que combina estas dos capacidades, como por ejemplo gvSIG o ArcLogistics, los cuales son sistemas SIG que tienen implementados algoritmos para el cálculo de rutas óptimas.

Entre los ejemplos de uso de los SIG para el cálculo de rutas óptimas se encuentran el proyecto "*Herramienta de Cálculo de Rutas Óptimas según Parámetros de Accesibilidad Física en Itinerarios Urbanos*" realizado por Pau Queraltó i Ros, Francesc Valls Dalmau y Rolando Biere Arenas (Universidad Politécnica de Cataluña) [13] y "*Optimización de la Localización y Recogida de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*" por Jordi Marí Pastor (Universidad Complutense de Madrid) [17].

### 2.2.4 SIG en el mundo militar

El SIG militar queda definido como un conjunto de hardware, *software*, procedimientos y organización, todos ellos integrados en un sistema de Mando y Control (C2) posibilitando un almacenamiento, análisis y actualización de información geográfica necesaria para la toma de decisiones.

El SIG militar deberá estar encuadrado en los tres niveles de planeamiento: estratégico, operativo y táctico, lo cual permitirá:

- Estudio de cambios temporales en zonas de operaciones.
- Actualización de posibles zonas objetivo.
- Análisis de líneas de operaciones.
- Localización de objetivos o puntos de interés.
- Establecer bases de datos de objetivos militares.

- Evaluación en base a parámetros preestablecidos, posibles zonas para la obtención de agua, despliegue de instalaciones logísticas, ubicaciones factibles para el despliegue de artillería, etc.

Resulta necesario en todos los niveles de conducción militar, que los comandantes de las distintas unidades posean información de tipo geográfico necesaria para la planificación y conducción de operaciones, ya que es en el escenario geográfico donde se deberá aplicar la fuerza para la ejecución de sus operaciones.

Toda información necesaria debe ajustarse a los factores de información militar: Misión, Enemigo, Terreno y Tiempo Atmosférico. La capacidad para obtener dicha información, pasa por los adelantos tecnológicos de la época, los cuales han pasado por saltos cualitativos y cuantitativos, quedando demostrado a lo largo de la historia como los SIG han permitido a los mandos de unidades cumplir sus cometidos de forma eficaz. Por otra parte, la cantidad de información generada por los conflictos modernos resulta ingente, y es por ello que resulta necesario su canalización y sistematización. Así pues, los SIG deben contar con características particulares que permitan de forma rápida y eficaz satisfacer las necesidades de los Comandantes. Podemos resumir todas estas características de los SIG en un conjunto de aspectos que tiene presente no solo los niveles de conducción de operaciones, sino también los aspectos militares que influyen en la toma de decisiones:

#### Necesidades geográficas:

- Disponer de cartografía digital actualizada y los atributos del teatro de operaciones, orientada al nivel de conducción en el que se trate.
- Debe contar con información geográfica común, así como específica, y de esta forma fomentar un mayor aprovechamiento.
- La cartográfica debe poder ser editable, de forma que los usuarios puedan materializar cambios generales y concretos.
- La meteorología debe estar presente en su base de datos.

#### Necesidades tecnológicas:

- Los SIG deben disponer de plataformas hardware y *software* que permitan satisfacer las necesidades de información geográfica del usuario.
- Deben permitir la posibilidad de consultas inteligentes.
- La configuración ha de ser flexible, de tal forma que pueda compaginarse con imágenes satelitales, GPS, vídeo, ortofotografías, etc.
- Resulta imprescindible la posibilidad de analizar, integrar y procesar información haciendo uso de bases de datos gráficas y relacionales. De este modo, los Comandantes de unidades podrán tomar decisiones validadas al relacionar bases de datos y atributos, incluyendo aspectos como antecedentes de terreno, enemigo, fuerzas propias, etc.
- Deben permitir la interacción con los usuarios para aumentar su eficiencia en el intercambio de información (rapidez y oportunidad).

#### Necesidades de carácter administrativo:

- Debe poder manejar cantidades ingentes de información, porque resulta fundamental el análisis y concreción de los requerimientos de información temática en el entorno militar.
- Precisa de una organización administrativa encargada del análisis y recopilación de los aspectos geográficos necesarios.
- De cara a un uso eficiente de los SIG, es necesario disponer de personal no solo cualificado en entornos computacionales, sino también en materia geográfica.
- Los SIG, centrándonos en la atmósfera militar, abarcan multitud de materias, aplicaciones y niveles de conducción. Resulta necesario establecer una clasificación de los mismos que permita ordenarlos para una mayor claridad. A continuación se van a indicar algunas

aplicaciones militares de los SIG en el entorno de personal, inteligencia, operaciones y logística.

Desde el punto de vista de personal:

- Despliegue de unidades administrativas.
- Ubicación y características de la población civil en la zona.
- Ubicación de zonas protegidas, como hospitales, edificios religiosos o escuelas.

Desde el punto de vista de la inteligencia:

- Conocimiento de la información del escenario para establecer posibilidades.
- Discriminación de áreas en función de su peligrosidad en base a características del terreno y de la acción enemiga.
- Detección de objetivos de sabotaje.

Desde el punto de vista de las operaciones:

- Localización de objetivos.
- Localización de puestos de observación.
- Localización de puntos críticos.
- Localización de áreas favorables para el empleo de municiones fumígenas.
- Estudio de obstáculos naturales y artificiales.
- Determinación de zonas idóneas para la reunión de tropas.
- Selección de zonas para el uso de medios mecanizados, blindados, aerotransportados, etc.

Desde el punto de vista de la logística:

- Establecer una división territorial.
- Localización de zonas adecuadas para desplegar instalaciones logísticas.
- Detección de zonas de explotación hidrográfica [16] [18].

Un ejemplo de uso de un SIG en el mundo militar es el sistema de mando y control TALOS de apoyos de fuegos de morteros, artillería, fuego naval y aéreo. Integra una serie de capacidades para planear y coordinar los apoyos de fuegos en un único terminal. Posee la opción de poder visualizar todo el campo de batalla sobre un mapa informático en formato SIG, situar la localización de las unidades propias y enemigas, y calcular los datos de tiro de forma automática. Las unidades se conectan a este sistema vía radio mediante una red de datos en frecuencias VHF y UHF a través del sistema PR4G, y los soportes empleados son ordenadores portátiles y PDA's. Está implementado en todos los ejércitos, en el Cuerpo de Infantería de Marina es usado principalmente por el Grupo de Artillería de Desembarco (GAD) y las Compañías de Armas de los Batallones de Desembarco.

## **2.3 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea**

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), tiene como objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales con resolución de 25 o 50 cm y modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión de todo el territorio español, con un período de actualización de 2 o 3 años, según las zonas. Se trata de un proyecto cooperativo y cofinanciado entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas.

Se realiza un vuelo fotogramétrico único y un tratamiento riguroso de los datos cumpliendo con unas especificaciones técnicas consensuadas entre todas las Administraciones Públicas participantes. Este planteamiento de producción descentralizada y cooperativa entre las distintas administraciones es acorde con el espíritu de la Directiva Inspire para el establecimiento de una Infraestructura de datos geográficos en Europa, que persigue que el nivel de detalle máximo de la información geográfica se capture una sola vez y que se comparta abiertamente entre los distintos agentes sociales que tengan necesidad de la

misma. Tanto los recubrimientos de ortoimágenes como los Modelos Digitales de Elevaciones forman parte de los "datos básicos de referencia" recogidos en dicha Directiva.

La fotografía aérea es la base para la realización de cartografía y la información geográfica en general, ocupación del suelo, urbanismo y ordenación del territorio, catastro, gestión forestal, hidrografía, etc. Utilizando los mismos datos fotogramétricos de partida, se consigue además una perfecta coherencia geométrica y temporal de las bases de datos cartográficos y geográficos existentes en todas las administraciones. Las características de los productos obtenidos en el PNOA, satisfacen las necesidades de todas las administraciones implicadas.

La dirección del proyecto es asumida por el Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y se coordina con los demás Ministerios interesados y con cada Comunidad Autónoma, que a su vez coordina a las Consejerías competentes (Obras públicas, Agricultura, Medio Ambiente, etc.). La producción se realiza de manera descentralizada por cada equipo autonómico, siendo el Instituto Geográfico Nacional el responsable de la validación final, y la integración de los productos resultantes [19].

Respecto al PNOA LiDAR, el objetivo de este proyecto es cubrir todo el territorio de España mediante nubes de puntos con coordenadas X, Y, Z obtenidas mediante sensores LiDAR aerotransportados, con una densidad de 0,5 puntos/m. La precisión altimétrica obtenida es mejor de 20 cm. Estas nubes de puntos tienen múltiples aplicaciones: obtención de modelos digitales del terreno y de superficies (con edificios y vegetación), estudios de zonas inundables, detección automática de edificaciones nuevas, cálculo del coeficiente de admisibilidad de pastos de la PAC, estudios de visibilidad y cobertura de antenas, entre otras muchas.

Estas coberturas se han realizado mediante colaboración y cofinanciación entre el Ministerio de Fomento (por medio del IGN y el CNIG), el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (por medio de la Dirección General del Agua, las Confederaciones Hidrográficas y el FEGA) y el Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas (por medio de la Dirección General del Catastro), además de las Comunidades Autónomas.

Los datos se distribuyen a través del Centro de Descarga del CNIG en ficheros digitales de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es 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 sensores LiDAR y posteriormente clasificadas de forma automática y coloreadas en RGB a partir de las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de píxel de 25 o 50cm. El sistema geodésico de referencia es 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. Las coordenadas Z son altitudes ortométricas [19].

### *2.3.1 Fotogrametría aérea*

La fotogrametría es la ciencia que utiliza las fotografías para realizar mediciones. Es una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas hechas sobre una o varias fotografías. El método general de la fotogrametría analiza el paso de la información bidimensional a la información tridimensional.

La Fotogrametría Aérea se basa en los resultados obtenidos con un avión en vuelo realizando tomas fotográficas, verticales, distanciadas adecuadamente entre sí y a una altura prefijada y constante. Para conseguir los objetivos en el diseño de un proyecto de vuelo fotogramétrico es necesario que:

- La cámara vuele a altura constante, recorriendo el terreno a levantar.
- El obturador de la cámara nadiral se dispare a intervalos regulares.
- Cada dos fotogramas consecutivos se dispondrá de recubrimiento adecuado.
- Distribución de las pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas.

- Barrido del terreno en franjas que dispongan de recubrimiento lateral.

La escala de las fotografías condiciona la escala de los mapas que se pueden obtener y el tamaño de los objetos que se pretendan detectar. Fijada la escala de la fotografía y conocida la distancia principal de la cámara de toma, la altura de vuelo  $H$  se expresa según la siguiente fórmula:

$$\frac{f}{H} = \frac{1}{E} \rightarrow H = f \times E \quad (\text{Ec. 2})$$

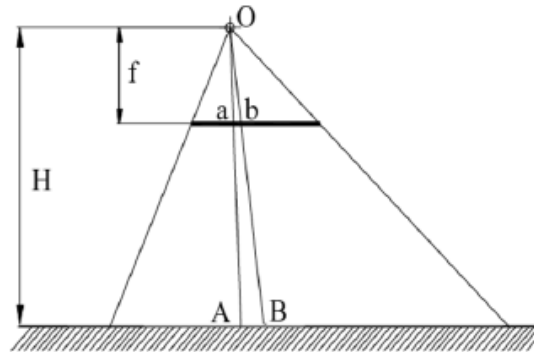


Figura 2-6 Representación de toma de fotografías aéreas [15]

La mayoría de los vuelos fotogramétricos no se realizan con una única pasada fotográfica, se necesita la adición de varias líneas de vuelo. Tienen que solaparse con las líneas de vuelo adyacentes y el recubrimiento lateral tiene que ser mínimo para reducir lo máximo posible el número de tomas (Figura 2-7). El espacio entre líneas centrales de estas pasadas paralelas,  $A$ , se determina según:

$$A = S(1 - \frac{q}{100}) \quad (\text{Ec. 3})$$

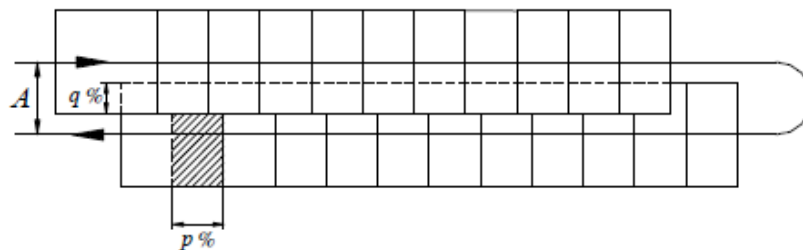


Figura 2-7 Representación de solape entre pasadas [15]

### 2.3.2 LiDAR aéreo

LiDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología que permite medir la distancia a un objeto desde un emisor de láser, utilizando un haz láser pulsado.

Aunque la invención del láser se remonta a la década de los años sesenta, la falta de tecnología de apoyo, impidió la explotación de este artillugio en el campo de la cartografía hasta varias décadas después. La introducción de tecnología de georreferenciación directa en la década de los noventa, sumado a los avances en la tecnología informática, fueron la clave que permitió el desarrollo del láser y sistemas de escaneo para usar en el campo de la cartografía topográfica.

Además, el procesamiento de los datos de medición láser es relativamente sencillo, lo que ha hecho que esta tecnología se use para una gran variedad de aplicaciones.

Hablando de plataformas embarcadas, los altímetros láser utilizados para medir perfiles de terreno desde una aeronave, han sido empleados desde 1965. Igual que otros dispositivos de medición de distancias, se han utilizado la comparación de fase y el eco de un pulso para medir la distancia desde la

aeronave hasta el suelo. El desarrollo acelerado de perfiladores láser embarcados tuvo lugar durante las décadas de los años setenta y ochenta, pero en la práctica solo se usaron para estudios conducidos a lo largo de líneas individuales o corredores estrechos.

La introducción de la georreferenciación directa fue esencial para la creación de láser escáneres, porque no había ningún método viable para reconstruir la trayectoria del sensor solamente con la medición de la distancia láser, por lo que no se podían determinar las coordenadas terrestres de los puntos láser.

Características del LiDAR aéreo:

- Modelado del terreno de alta resolución (de cinco a quince centímetros en altura).
- Permite el modelado de ciudades.
- Puede ser empleado en caso de desastre natural.
- Permite la monitorización de la deformación costera por el efecto del mar.
- Tiempo de pulso entre 33 y 167 kHz.
- Puede operar hasta una altura de diez kilómetros.
- Puede ser usado sobre plataforma de ala fija o ala rotatoria.

Las ventajas que ofrece el LiDAR aéreo sobre otros sistemas son:

- El LiDAR aéreo es capaz de generar rápidamente un denso y preciso modelo de la topografía y la estructura vertical de la superficie del objeto a estudiar.
- Es una herramienta atractiva para usuarios en varias áreas de aplicación, debido a que el coste de obtención de datos, punto a punto, es significativamente menor que otras formas tradicionales de colección de datos.

Para cualquier aplicación que precise de una alta densidad y alta precisión en el levantamiento de modelos, el láser escáner ofrece unas capacidades técnicas únicas, unos costes de operación en el terreno bajos y un reducido tiempo de post-procesado comparado con métodos de obtención tradicionales.

Tipos de LiDAR aéreo:

1. Para mapeado de áreas extensas: sistemas montados sobre aeronaves de ala fija, entre 600 y 6000 metros de altitud. Son capaces de cubrir grandes hileras con una buena tasa de adquisición de datos.
2. De mapeado de un corredor: son sistemas que se montan sobre helicópteros, entre 60 y 600 metros de altitud. Son capaces de recoger datos con mayor densidad y producir datos de mayor resolución [20].

### 2.3.3 Aplicaciones militares

La fotografía aérea para el mundo militar es de gran importancia desde hace décadas. Al principio se utilizaban globos para fotografiar posiciones enemigas y movimientos de tropas. Después se pasó al avión como manera de tomar fotografías. Al igual que con la mayoría de las innovaciones tecnológicas, los principales avances se hicieron con el inicio de la guerra. Durante la Primera Guerra Mundial se produjo la introducción de la película de rodillo para reemplazar las placas de vidrio. Las aeronaves también fueron adaptadas y diseñadas para maximizar la cobertura y optimizar la calidad, por ser rápidas y estables. A principios de 1918 unidades francesas estaba imprimiendo hasta 10.000 fotografías de una noche durante los períodos de máxima actividad. Reino Unido, EE.UU. y Alemania tenían unidades de reconocimiento aéreo sofisticados, habiendo superado muchos obstáculos técnicos. Sin embargo, con los medios de la época existían ciertos problemas; desde arriba, la identificación de un soldado de otro no fue fácil.

Después de la guerra muchas empresas se pusieron en marcha para utilizar las habilidades y técnicas recién adquiridas para fines más pacíficos, como la cartografía. Por ejemplo: desde 1930 Alemania realizó un mapa del país a escala 1:25.000, y de las ciudades a escala 1:10.000. El desarrollo técnico y la innovación aumentó una vez más durante la Segunda Guerra Mundial y la importancia de

reconocimiento aéreo era ya apreciado en el Reino Unido. Cuando finalizó la guerra en 1945, a diferencia de después de la Primera Guerra Mundial, la Fuerza Aérea Británica se puso a trabajar en el Reino Unido. El objetivo era capturar a todo el país a una escala de seis pulgadas (1:10,560), con las ciudades a escalas superiores. Se llamó Operación Revue.

En los años cuarenta y cincuenta se llevaron a cabo grandes sondeos por los EE.UU., Reino Unido y los militares rusos, incluyendo grandes áreas de la Europa continental. Gran parte del trabajo fue realizado en secreto por cuestiones de seguridad y el inicio de la Guerra Fría. Fue a mediados y finales de los noventa que el valor de reventa de la fotografía aérea fue realmente reconocido. La fotografía aérea había entrado en la era digital. Ahora era fácil de escanear y de reproducir, aumentando también la gama de productos y aplicaciones de la fotografía, Modelos Digitales de Elevación, ortofoto y modelado de edificios en 3D fueron más fáciles de producir y con un coste menor.

Durante el año 2007 la mayoría de la fotografía aérea fue tomada digital. Estas cámaras estaban equipadas con GPS y unidades inerciales, que mejoran la precisión y el tiempo para crear las ortofotos. Portales web como Google Earth están haciendo la fotografía (así como otros SIG de datos) a disposición del público en general, a nivel mundial [21].

Las aplicaciones del LiDAR en el mundo militar son muchas, pero se pueden destacar:

- Medición de la velocidad de misiles de crucero.
- Detección de enemigo mediante imágenes.
- Detección de minas.
- Detección de amenazas químicas y biológicas.
- Sorteo de obstáculos por medios aéreos autónomos.
- Ingeniería inversa para el rediseñado y fabricación de piezas de repuesto descatalogadas por el fabricante.
- Inteligencia militar y detección de guerrillas en jungla.
- Sistemas de detección en el campo de seguridad.



### 3 DESARROLLO DEL TFG

En la Figura 3-1 se presenta un *Workflow* con todas las actividades y procesos a seguir para el desarrollo del presente TFG.

En primer lugar se describirá la obtención y preparación de los datos, así como la extracción automatizada de los caminos en ámbitos rurales a partir del uso combinado de ortofotografías aéreas y nubes de puntos LiDAR. El proceso continúa calculando las pendientes existentes entre los puntos contiguos de los caminos e implementándolos en un grafo. Finalmente se hace uso del algoritmo de Dijkstra para calcular la ruta óptima entre dos puntos del terreno seleccionados por el usuario, teniendo en cuenta la limitación de la pendiente máxima afrontable que no podría sobrepasar el vehículo en cuestión.

Por último, la metodología concluye con la exportación final de la ruta óptima a gvSIG, un Sistema de Información Geográfica de acceso libre, en el cual se analizará su intersección con la capa del Inventario Forestal Nacional, cuya información será de gran interés militar para el planeamiento de las operaciones en el campo.

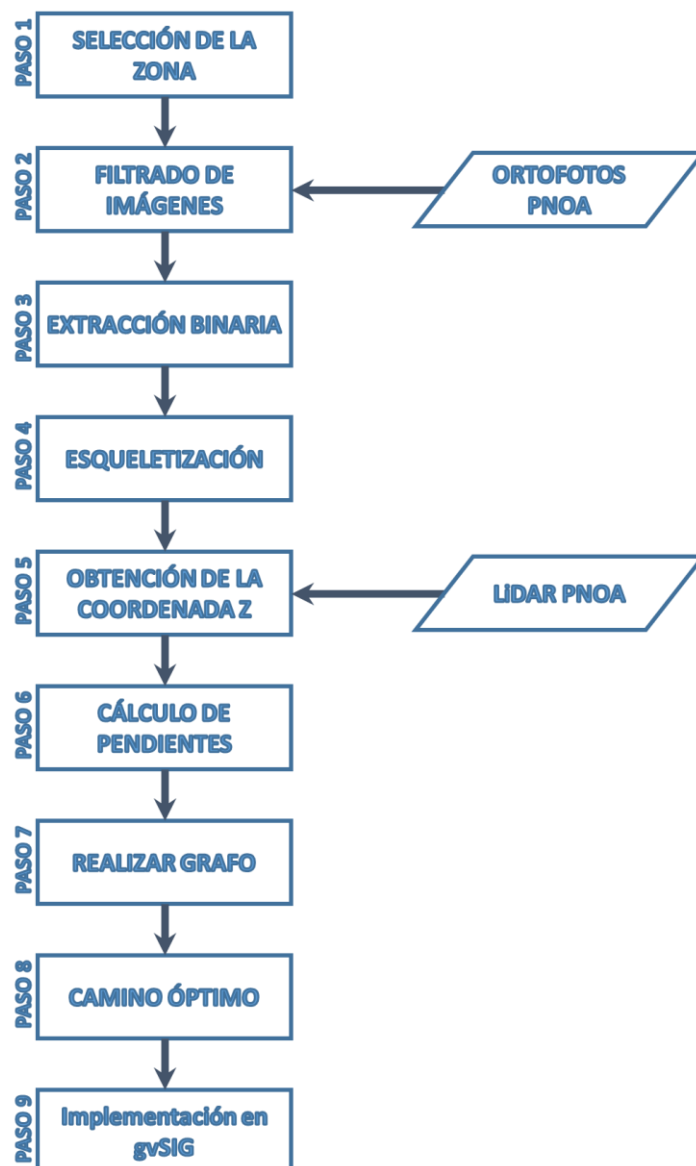


Figura 3-1 Workflow

### 3.1 Selección de la zona de estudio

Para la realización del TFG, se eligió una zona de estudio en la Península de O Morrazo, que se encuentra en Galicia, en la provincia de Pontevedra (Figura 3-2). Forma parte de las Rías Baixas gallegas y está situada entre las Rías de Pontevedra (al norte) y de Vigo (al sur). Tiene aproximadamente 40 kilómetros de largo por 10 de ancho y cuenta con unos 115 kilómetros cuadrados de área. Su línea media está formada por una elevación que la recorre de este a oeste. Su istmo va desde Ponte Sampaio a la ciudad de Pontevedra. Termina en Cabo Home, su extremo meridional, a poca distancia de las Islas Cíes, integradas en el Parque Nacional de las Islas Atlánticas.

La Península se divide en cuatro ayuntamientos: Marín, Moaña, Cangas y Bueu. Tiene un censo de 83.109 habitantes y unos 200 núcleos de población.

En la Figura 3-3 se observa la zona concreta de estudio, la cual se seleccionó por tener abundantes caminos rurales y estar alejada de poblaciones, para asemejarla lo máximo posible a una zona de operaciones real.

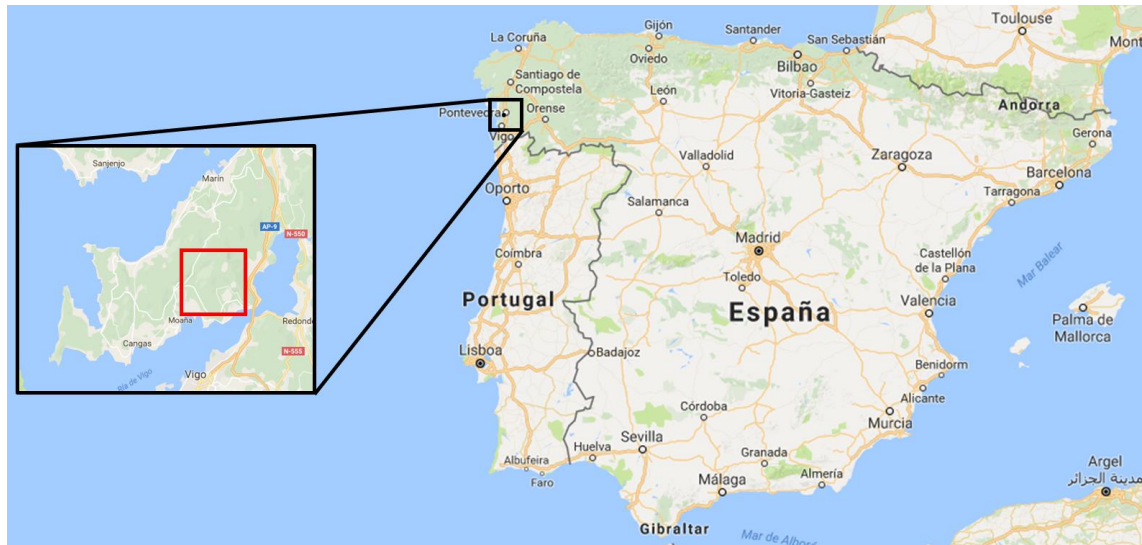


**Figura 3-2 Localización de la Península do Morrazo [22]**

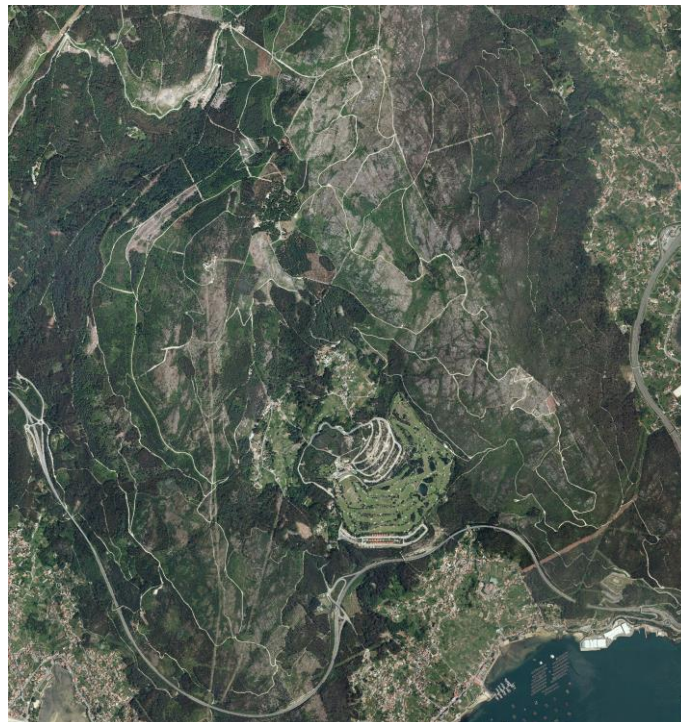


**Figura 3-3 Zona de estudio**

## **3.2 Herramientas de trabajo**

### **3.2.1 Matlab**

Matlab es un producto de la empresa MathWorks, afincada en Massachussets, Estados Unidos. Esta empresa, se dedica al desarrollo de software para cálculo técnico, utilizado por ingenieros y científicos. Es una herramienta muy potente, que ofrece una gran variedad de posibilidades. Su lenguaje está basado en matrices [23]. Para el tratamiento de las imágenes se hizo uso de la versión R2016b, con licencia académica por la Universidad de Vigo.

En la realización del presente estudio se emplearon las aplicaciones del programa Image Segmenter y el Color Thresholder. El programa convierte a las imágenes en matrices y cada píxel es un elemento de la matriz. Debido a esta razón, se simplifica en gran medida todo el tratamiento de las ortofotos.

### 3.2.2 RiSCAN Pro

Es un *software* diseñado por la empresa austríaca RIEGL. Tiene más de treinta años de experiencia investigando, desarrollando y produciendo medidores láser, distanciómetros y escáneres. Este *software* se emplea como complemento a un sistema de láser escáner para visualizar los datos obtenidos. Cuenta con gran cantidad de herramientas para realizar el tratamiento de las nubes de puntos. La versión empleada en el trabajo es la v.1.8.1 [24].

### 3.2.3 Total GIS Converter

Es una herramienta para convertir archivos SIG. Puede soportar múltiples formatos originales (“*.ecw*”, “*.shp*”, “*.dxf*”, etc) y convertirlos a formatos “*.tif*”, “*.jpg*”, “*.png*”, “*.bmp*” y “*.pdf*”. Es un programa de pago.

### 3.2.4 GvSIG

Es un Sistema de Información Geográfica, que permite gestionar datos espaciales y realizar análisis sobre estos. Es un *software* gratuito y con licencia GPL (General Public License). Este proyecto fue impulsado por la Comunidad Valenciana (Las siglas “gv” provienen de “Generalitat Valenciana”). En la actualidad la gestión y el mantenimiento del proyecto lo realizan tanto entidades empresariales como no-empresariales [25].

El programa gvSIG está orientado al manejo de información geográfica. Se caracteriza por una interfaz amigable y sencilla, con capacidad para acceder ágilmente a los formatos más usuales (ráster y vectoriales). GvSIG además es capaz de integrar datos en una vista, tanto locales como remotos, a través de un origen WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service) WCS (Web Coverage Service) O JDBC (Java Database Connectivity).

Está orientado a usuarios finales de información geográfica, profesionales o personal de Administraciones Públicas (Ayuntamientos, Diputaciones, Consejerías o Ministerios). También resulta de especial interés para los ambientes universitarios, debido a su componente I+D+I (Investigación + Desarrollo + Innovación) [26].

### 3.2.5 Visor Iberpix 4

El Visor Iberpix 4 es una aplicación web que tiene como objetivo proporcionar una herramienta de cartografía digital para facilitar la localización de diferentes espacios a lo largo de todo el territorio nacional español (incluyendo Islas Canarias, Islas Baleares, Ceuta y Melilla). Desarrollada en JavaScript y HTML5, no necesita instalación previa para su uso. Tiene incluidos los Mapas Topográficos Nacionales (MTN) 1:2.000.000, MTN 1:200.000, MTN 1:50.000, MTN 1:25.000, ortofotos del PNOA, y la ocupación del suelo (Corine). Permite también la medición de distancias y superficies [27].

## 3.3 Datos de partida

El conjunto de datos con los que comenzó el estudio se obtuvo de la página oficial del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) por medio del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (IGN). A modo de ejemplo se detalla la descarga de la ortofotografía desde la página web del IGN (Figura 3-4, Figura 3-5 y Figura 3-6). El proceso sería el mismo para la descarga de datos LiDAR. Se selecciona el producto que se desee descargar y la división administrativa de la zona (Comunidad Autónoma, Provincia o Municipio). Para la descarga de datos, se seleccionó el Municipio de Moaña. También existe la posibilidad de realizar la descarga según la hoja del MTN50.

Cada fichero que se descarga de esta web, trae consigo un archivo en formato “*.xml*” con los metadatos de la toma. Las especificaciones técnicas de cada vuelo realizado se pueden descargar de la página del PNOA en la pestaña “Especificaciones técnicas”. Para los vuelos Fotogramétrico y LiDAR, las especificaciones técnicas están recogidas en la Tabla 3-1 y Tabla 3-2 respectivamente.



Centro de Descargas  
Centro Nacional de Información Geográfica

Nº Archivos: 0

Presentación Catálogo de productos Búsqueda en visor Búsqueda avanzada Equipamiento Geográfico de Referencia Nacional Ayuda

Centro de Descargas/ Catálogo de productos

Mapa Web contacto RSS f t

### Catálogo de productos

Infórmese de todas las actualizaciones de los productos del Centro de Descargas en nuestro [servicio de novedades RSS](#).

► PNOA MÁXIMA ACTUALIDAD:

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.

[Descargar Gráfico con fechas de vuelo](#)

[ampliar imagen](#)

► ORTOFOTOS HISTORICAS DEL PNOA:

Mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), desde el año 2004, 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 histórico por hoja MTN50 se forma seleccionando, de entre toda la información de ortofotografía PNOA disponible, aquella que tenga el mismo año de vuelo. Cada año se cubre una superficie diferente del territorio nacional (ver

Figura 3-4 Captura del proceso de descarga de datos [28]



Centro de Descargas  
Centro Nacional de Información Geográfica

Nº Archivos: 0

Presentación Catálogo de productos Búsqueda en visor Búsqueda avanzada Equipamiento Geográfico de Referencia Nacional Ayuda

Centro de Descargas/ Búsqueda Avanzada

Mapa Web contacto RSS f t

### Búsqueda Avanzada

Búsqueda Avanzada

Seleccione Producto: **Ortofoto PNOA Máxima Actualidad**

Seleccione División administrativa: **Municipio**

Moaña

Moaña

Seleccione Hoja del MTN50:

Seleccione tipo de archivo: Todos

[Ver descripción de los productos](#)

[Ver mapa con la numeración del MTN50](#)

Buscar

Figura 3-5 Captura del proceso de descarga de datos [28]



**Centro de Descargas**  
Centro Nacional de Información Geográfica

Nº Archivos: 0

Presentación | Catálogo de productos | Búsqueda en visor | Búsqueda avanzada | Equipamiento Geográfico de Referencia Nacional | Ayuda

Centro de Descargas / Paso 1

**Paso 1- Resultados de su búsqueda**

Volver a buscar

1  
página 1 de 1

| Producto                        | Archivo                                    | Formato        | Tamaño(MB) | Seleccionar            |
|---------------------------------|--------------------------------------------|----------------|------------|------------------------|
| Ortofoto PNOA Máxima Actualidad | <b>PNOA_MA_OF_ETRS89_HU29_h50_0223.ecw</b> | ECW            | 1930,02    | <a href="#">Añadir</a> |
| Ortofoto PNOA Máxima Actualidad | PNOA_MA_OF_ETRS89_HU29_h50_0223.xml        | XML(METADATOS) | 0,05       | <a href="#">Añadir</a> |
| Ortofoto PNOA Máxima Actualidad | PNOA_MA_OF_ETRS89_HU29_h50_0223.zip        | SHAPE          | 0,01       | <a href="#">Añadir</a> |

1  
página 1 de 1

Figura 3-6 Captura del proceso de descarga de datos [28]

### Especificaciones técnicas asociadas al Vuelo Fotogramétrico Digital

|                                  |                                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Sistema geodésico de referencia  | ETRS89                                                          |
| Proyección cartográfica          | UTM                                                             |
| Tipo de cámara empleada          | Fotogramétrica digital                                          |
| Campo de visión de la cámara     | Entre 50° y 80° sexagesimales                                   |
| Fecha de tomas                   | Del 1 de mayo al 30 de septiembre de 2014                       |
| Horario de tomas                 | Altura del Sol sobre el horizonte $\geq 40^\circ$ sexagesimales |
| Dirección de toma de las pasadas | Dirección este - oeste                                          |
| Recubrimiento longitudinal       | 60%                                                             |
| Recubrimiento transversal        | $\geq 25\%$ medio                                               |

Tabla 3-1 Especificaciones técnicas Vuelo Fotogramétrico [29]

### Especificaciones técnicas asociadas al Vuelo LiDAR

|                                  |                                                                 |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Sistema geodésico de referencia  | ETRS89                                                          |
| Proyección cartográfica          | UTM                                                             |
| Tipo de sensor                   | Sensor LiDAR                                                    |
| Campo de visión transversal      | 50°                                                             |
| Fecha de tomas                   | Con buenas condiciones meteorológicas                           |
| Horario de tomas                 | Altura del Sol sobre el horizonte $\geq 40^\circ$ sexagesimales |
| Dirección de toma de las pasadas | Dirección Este - Oeste                                          |
| Recubrimiento transversal        | $\geq 15\%$ medio                                               |

Tabla 3-2 Especificaciones técnicas Vuelo LiDAR [29]

#### 3.3.1 Ortofotografía aérea

La ortofotografía empleada forma parte del mosaico de máxima actualidad de ortofotografías aéreas correspondientes a la hoja 0223 del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000 (MTN50), que cubre parte de la Comunidad de Galicia. El tamaño del píxel es de 25 cm y el año de captura de los datos es el 2014. El mosaico es RGB, en el sistema geodésico de referencia ETRS89 y se descarga en formato “.ecw” [29].

Esta ortofoto se caracteriza por su gran calidad y resolución, sin embargo son precisamente dichas características las que suponen una importante problemática para la capacidad de trabajo de los ordenadores empleados. Se decide por tanto convertirla a formato “.jpg”, mediante el programa Total GIS Converter, con el fin de evitar dicho inconveniente. Los pasos que se siguieron quedan reflejados en la Figura 3-7, Figura 3-8 y Figura 3-9. En primer lugar, se escoge el archivo (Paso 1º), se pulsa en la opción “JPG” (Paso 2º) y se selecciona manualmente la zona a convertir (Pasos del 3º al 6º). Posteriormente, en el apartado de “Parts” se selecciona la opción “1” en el campo “Horizontal Parts” para obtener una única imagen y evitar así tener que trabajar con varias (Pasos 7º y 8º). Por último se determina la resolución deseada y comienza el proceso de generación de la ortofoto (Pasos 9º y 10º).

Como resultado se obtuvo una ortofotografía de la zona de estudio de 16,9 kilómetros cuadrados, con un tamaño de 3856 x 4080 píxeles. Sobre el terreno cubre una distancia de 4 x 4,23 kilómetros en los ejes X e Y cartesianos respectivamente, con lo que se obtiene una resolución en el terreno de 1,03 metros, que se aproxima en términos generales a 1 metro.

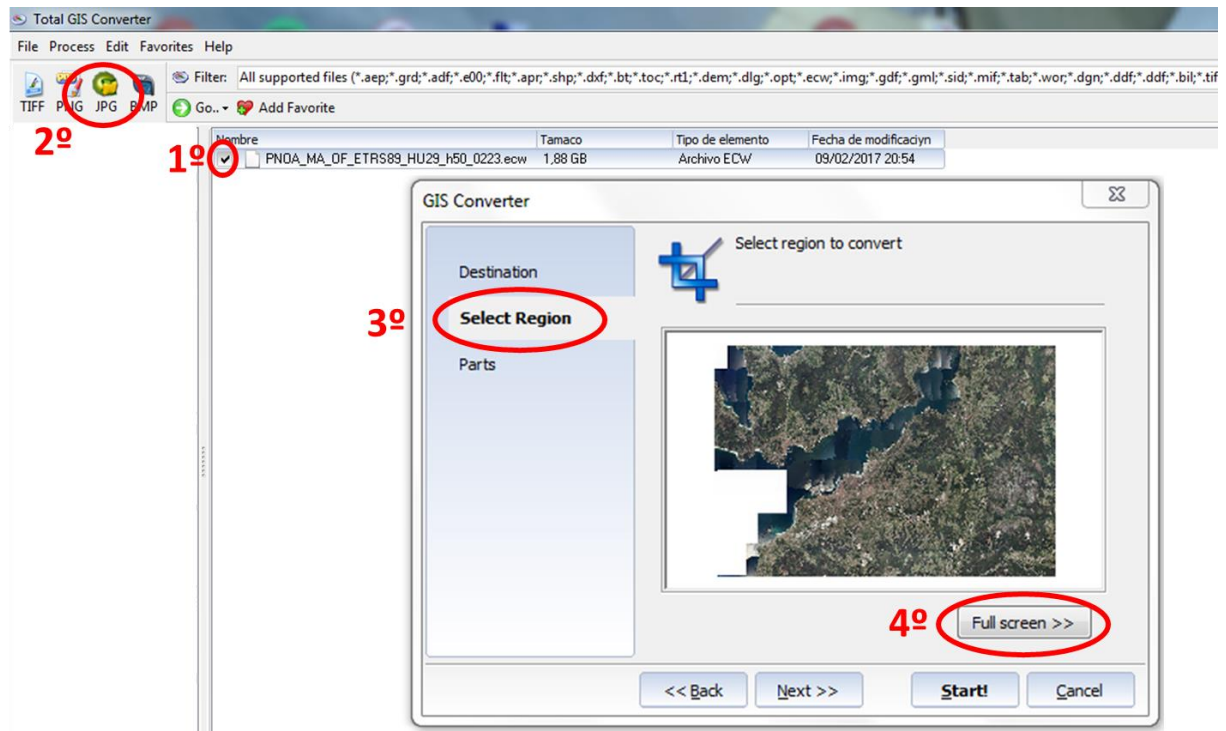


Figura 3-7 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter

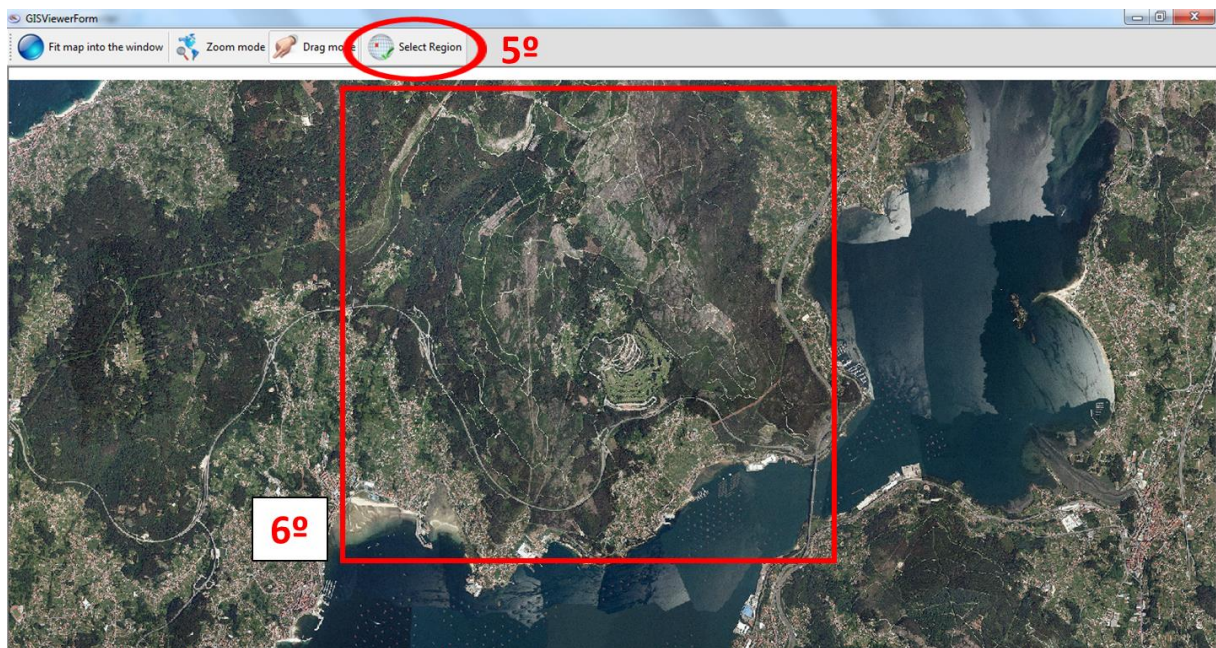


Figura 3-8 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter

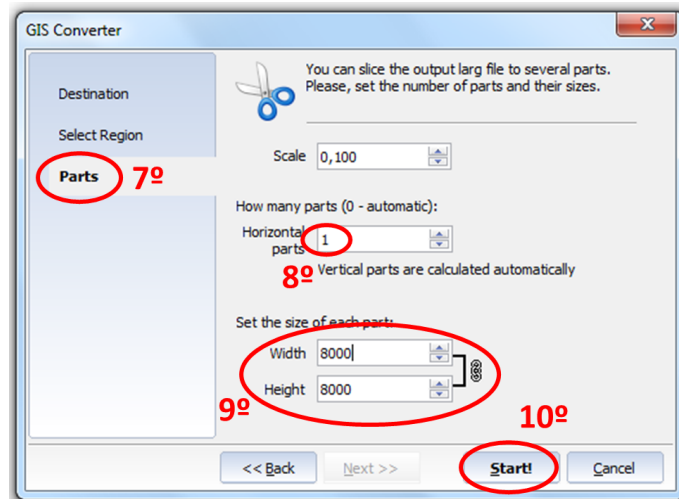


Figura 3-9 Captura de pantalla proceso de conversión de archivos con Total GIS Converter

### 3.3.2 LiDAR

Los ficheros de LiDAR se descargaron en formato “.laz” (comprimido) y se convirtieron a formato “.las” para poder visualizar su contenido. Estos ficheros contienen la información altimétrica de la zona de estudio. Las nubes de puntos contenidas se visualizaron con el programa RiSCAN Pro (Figura 3-10). Estas nubes contienen una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup> y se descargan en cuadrículas de cuatro kilómetros cuadrados. Además cada punto se colorea con RGB a partir de ortofotos obtenidas del PNOA. Son 12 las cuadrículas empleadas para la extracción de la nube de puntos LiDAR, y su distribución en planta está recogida en la Figura 3-11.

A fin de proceder a la extracción de la nube de puntos perteneciente a la zona de estudio y evitar importar un gran número de puntos innecesarios, se seleccionó manualmente la cuadrícula mediante la herramienta “Selection mode” del RiSCAN Pro (Paso 1º en Figura 3-12). A continuación, se creó un área llamada “Polydata” que incluía la zona de estudio más un margen de seguridad alrededor de ésta (Pasos 2º y 3º en Figura 3-13).



Figura 3-10 Ejemplo de una nube de puntos de la zona de estudio visualizada en RiSCAN Pro

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 522-4688 | 524-4688 | 526-4688 |
| 522-4686 | 524-4686 | 526-4686 |
| 522-4684 | 524-4686 | 526-4684 |
| 522-4682 | 524-4682 | 526-4682 |

**Figura 3-11 Cuadrículas utilizadas para la extracción de la altimetría (zona de estudio en rojo)**

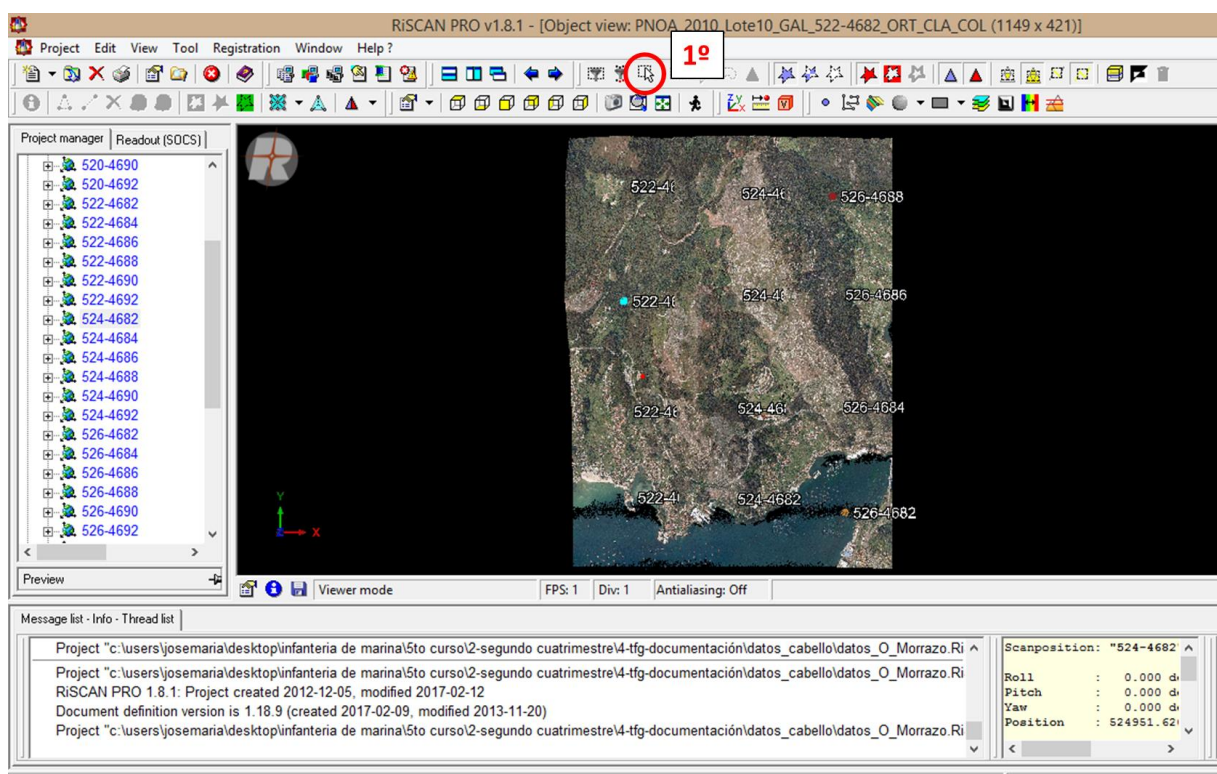


**Figura 3-12 Proceso de extracción de la nube de puntos desde RiSCAN Pro**

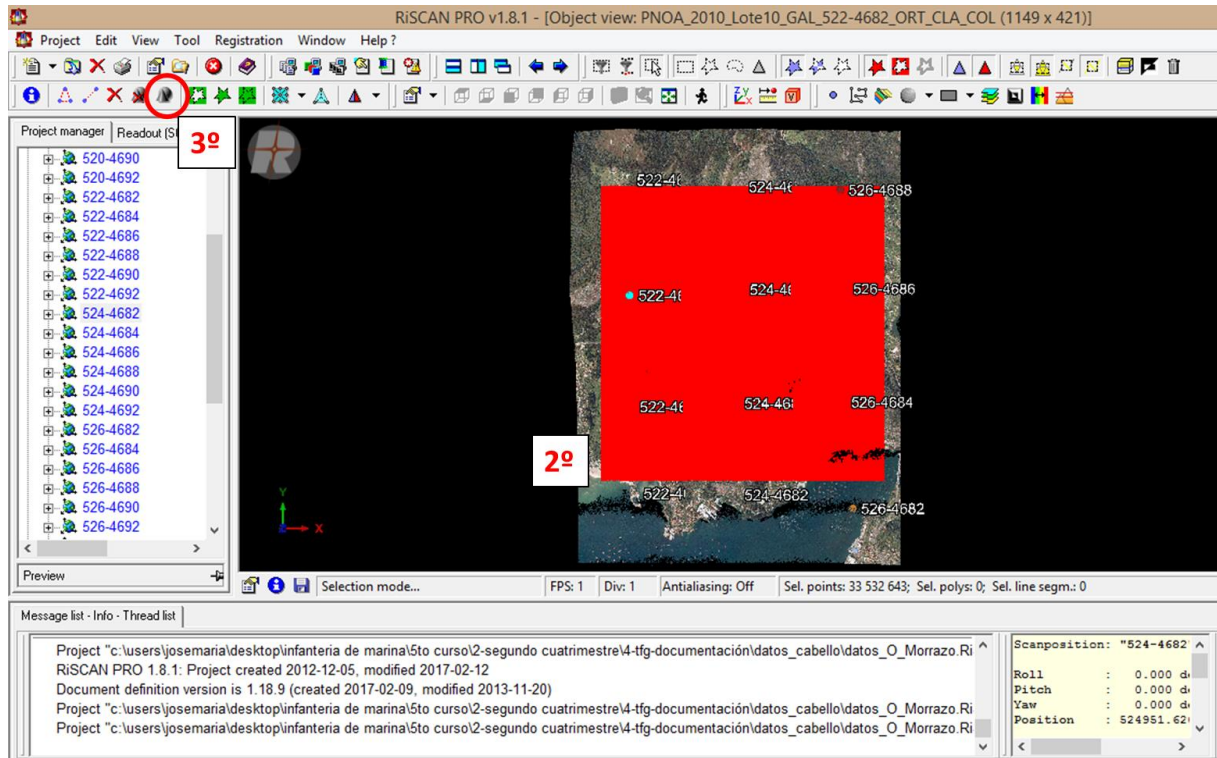


Figura 3-13 Selección del área a extraer en RiSCAN Pro

### 3.4 Obtención de las coordenadas UTM de los caminos

#### 3.4.1 Filtrado de las imágenes

El filtrado trata de resaltar o suprimir, de forma selectiva, información contenida en una imagen a diferentes escalas espaciales, para destacar algunos elementos de la misma, o también para ocultar valores anómalos (ruido, errores). Mediante diferentes combinaciones de parámetros asignados a los diferentes píxeles de la imagen se pueden conseguir efectos distintos. En general, los efectos indeseados se relacionan con el aspecto borroso que tienen las imágenes satelitales o las fotografías aéreas, debido a la dispersión y la reflectividad atmosféricas. El filtrado de las imágenes normalmente es necesario antes de la aplicación de un detector de bordes [30].

Este proceso comienza con la importación de las imágenes “.jpg” a Matlab mediante el comando “*imread*” y de esta forma se convierten en matrices. Al ser una ortofoto en RGB, Matlab crea tres matrices de cada imagen, una por el componente rojo R, otra por el componente verde G y una última por el componente azul B. En el proyecto, el tipo de dato de cada píxel es unit8, es decir, de valores entre 0 y 255. Para simplificar el filtrado, se pasó a una matriz en escala de grises mediante el comando “*rgb2gray*”. Este comando transforma las tres matrices de cada imagen en una en la que cada componente de la matriz (cada píxel) tiene un valor desde 0, color negro, hasta 255, color blanco.

A fin de mejorar el resultado obtenido y reducir el ruido en la imagen, se aplicó un filtro de paso bajo. Estos filtros suavizan la imagen y son útiles cuando éstas tienen gran cantidad de ruido y se quiere eliminar. Existen varias posibilidades:

- Filtro de la media simple: asigna al píxel central la media de todos los píxeles incluidos en la ventana. La matriz de filtrado estaría compuesta por unos y el divisor sería el número total de elementos en la matriz.
- Filtro de media ponderada: los elementos de la matriz de filtrado no son todos 1 sino que se da más peso a uno de ellos (generalmente el central) para obtener un resultado más parecido a la imagen original y evitar que aparezca borrosa.

- Filtro de la mediana: tiene la ventaja de que el valor final del píxel es un valor real presente en la imagen y no un promedio, de este modo se reduce el efecto borroso que tienen las imágenes que han sufrido un filtro de media. Además el filtro de la mediana es menos sensible a valores extremos. El inconveniente es que resulta más complejo de calcular ya que hay que ordenar los diferentes valores que aparecen en los píxeles incluidos en la ventana y determinar cuál es el valor central.
- Filtros adaptativos: son considerablemente más complejos ya que los coeficientes de ponderación se recalculan para cada uno de los píxeles en función del histograma de los ND que aparecen en la ventana. Se han utilizado con gran éxito filtros adaptativos para eliminar el speckle de las imágenes de radar y para detectar, con un solo filtro, diferentes elementos [30].
- Filtros gaussianos: simulan una distribución gaussiana bivalente. El valor máximo aparece en el píxel central y disminuye hacia los extremos tanto más rápido cuanto menor sea el parámetro de desviación típica " $\sigma$ ". El valor de cada punto es el resultado de promediar con distintos pesos los valores vecinos a ambos lados de dicho punto. Este tipo del filtro también tiene el problema del difuminado de los bordes, pero no es tan acusado como el caso de la media simple. Reduce especialmente el ruido tipo gaussiano, que tiene su origen en las diferencias de ganancias del sensor, ruido en la digitalización, y que produce pequeñas variaciones en la imagen [31].

En primer lugar, mediante el comando "*medfilt2*" de Matlab, se aplicó el filtro de mediana a la imagen en escala de grises (imagen derecha Figura 3-14).

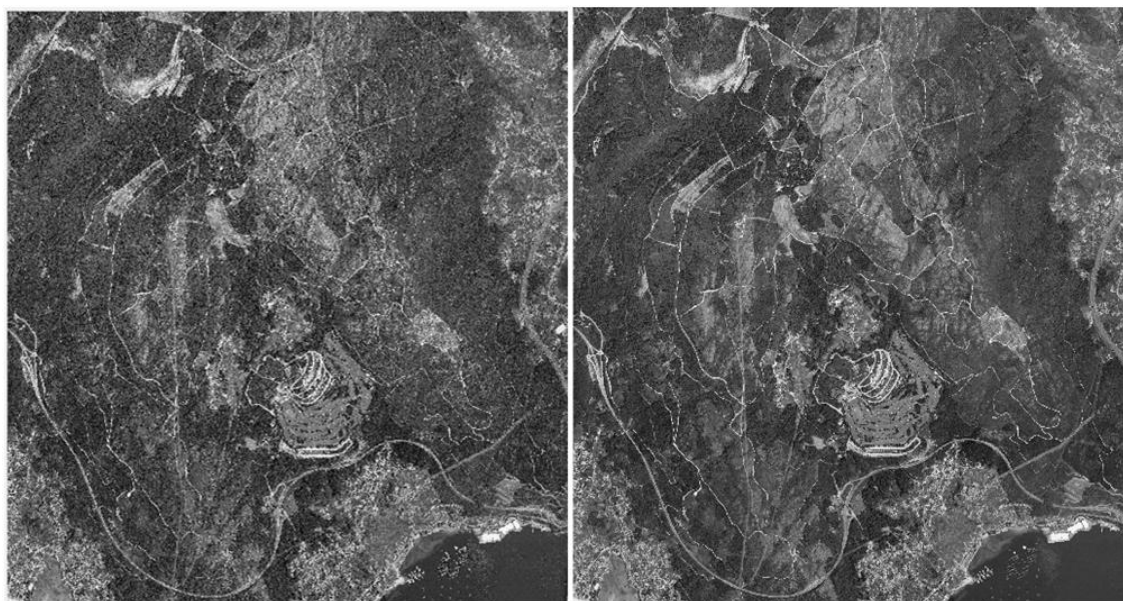


**Figura 3-14 Comparación imagen en escala de grises (izquierda) con filtro mediana (derecha)**

Posteriormente, a esa imagen se le aplicó un filtro gaussiano. Estos filtros son matrices de la forma  $N \times N$  (máscara) y se crean mediante el comando "*fspecial*". Para crear un filtro gaussiano se selecciona la opción '*Gaussian*'. Matlab da la opción de elegir el tamaño de la máscara que se quiere implementar, y para el trabajo se usó un tamaño de  $10 \times 10$ . El filtro que se empleó es un filtro DoG (*Difference of Gaussians*), que es el resultado de la diferencia de dos filtros gaussianos con distintos núcleos de suavizado con desviación típica " $\sigma$ " (Figura 3-15 y Figura 3-16). Este filtro se emplea en multitud de campos científicos como en arquitectura o medicina. En este proyecto se seleccionó una diferencia de " $\sigma$ " de 25 (Figura 3-17), gracias a la cual se extrajeron los bordes de la ortoimagen.

Matlab recomienda el uso del comando "*imgaussfilt*" para crear filtros de tipo gaussiano, pero haciéndolo con "*fspecial*" nos permite crear la máscara DoG y visualizarla antes de la convolución sobre la imagen.

| Editor - FiltradoYEsqueletizacion.m |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Variables - Gauss1                  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Gauss1                              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 10x10 double                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1                                   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |        |
| 1                                   | 0.0061 | 0.0071 | 0.0080 | 0.0087 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0087 | 0.0080 | 0.0071 | 0.0061 |
| 2                                   | 0.0071 | 0.0083 | 0.0094 | 0.0102 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0102 | 0.0094 | 0.0083 | 0.0071 |
| 3                                   | 0.0080 | 0.0094 | 0.0106 | 0.0115 | 0.0120 | 0.0120 | 0.0115 | 0.0106 | 0.0094 | 0.0080 |
| 4                                   | 0.0087 | 0.0102 | 0.0115 | 0.0125 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0125 | 0.0115 | 0.0102 | 0.0087 |
| 5                                   | 0.0090 | 0.0106 | 0.0120 | 0.0130 | 0.0135 | 0.0135 | 0.0130 | 0.0120 | 0.0106 | 0.0090 |
| 6                                   | 0.0090 | 0.0106 | 0.0120 | 0.0130 | 0.0135 | 0.0135 | 0.0130 | 0.0120 | 0.0106 | 0.0090 |
| 7                                   | 0.0087 | 0.0102 | 0.0115 | 0.0125 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0125 | 0.0115 | 0.0102 | 0.0087 |
| 8                                   | 0.0080 | 0.0094 | 0.0106 | 0.0115 | 0.0120 | 0.0120 | 0.0115 | 0.0106 | 0.0094 | 0.0080 |
| 9                                   | 0.0071 | 0.0083 | 0.0094 | 0.0102 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0102 | 0.0094 | 0.0083 | 0.0071 |
| 10                                  | 0.0061 | 0.0071 | 0.0080 | 0.0087 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0087 | 0.0080 | 0.0071 | 0.0061 |

Figura 3-15 Filtro gaussiano con  $\sigma = 5$

| Editor - FiltradoYEsqueletizacion.m |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Variables - Gauss2                  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Gauss1 Gauss2                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 10x10 double                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1                                   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |        |
| 1                                   | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 |
| 2                                   | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 |
| 3                                   | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 |
| 4                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| 5                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 |
| 6                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 |
| 7                                   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| 8                                   | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0101 | 0.0101 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 |
| 9                                   | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 |
| 10                                  | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0099 | 0.0099 | 0.0099 |

Figura 3-16 Filtro gaussiano con  $\sigma = 30$

| Editor - FiltradoYEsqueletizacion.m |             |             |             |            |             |             |            |             |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Variables - gauss                   |             |             |             |            |             |             |            |             |             |             |
| Gauss1 Gauss2 gauss                 |             |             |             |            |             |             |            |             |             |             |
| 10x10 double                        |             |             |             |            |             |             |            |             |             |             |
| 1                                   | 2           | 3           | 4           | 5          | 6           | 7           | 8          | 9           | 10          |             |
| 1                                   | -0.0038     | -0.0028     | -0.0019     | -0.0013    | -9.3396e-04 | -9.3396e-04 | -0.0013    | -0.0019     | -0.0028     | -0.0038     |
| 2                                   | -0.0028     | -0.0016     | -5.7598e-04 | 1.8576e-04 | 5.9077e-04  | 5.9077e-04  | 1.8576e-04 | -5.7598e-04 | -0.0016     | -0.0028     |
| 3                                   | -0.0019     | -5.7598e-04 | 5.9077e-04  | 0.0015     | 0.0019      | 0.0019      | 0.0015     | 5.9077e-04  | -5.7598e-04 | -0.0019     |
| 4                                   | -0.0013     | 1.8576e-04  | 0.0015      | 0.0024     | 0.0029      | 0.0029      | 0.0024     | 0.0015      | 1.8576e-04  | -0.0013     |
| 5                                   | -9.3396e-04 | 5.9077e-04  | 0.0019      | 0.0029     | 0.0034      | 0.0034      | 0.0029     | 0.0019      | 5.9077e-04  | -9.3396e-04 |
| 6                                   | -9.3396e-04 | 5.9077e-04  | 0.0019      | 0.0029     | 0.0034      | 0.0034      | 0.0029     | 0.0019      | 5.9077e-04  | -9.3396e-04 |
| 7                                   | -0.0013     | 1.8576e-04  | 0.0015      | 0.0024     | 0.0029      | 0.0029      | 0.0024     | 0.0015      | 1.8576e-04  | -0.0013     |
| 8                                   | -0.0019     | -5.7598e-04 | 5.9077e-04  | 0.0015     | 0.0019      | 0.0019      | 0.0015     | 5.9077e-04  | -5.7598e-04 | -0.0019     |
| 9                                   | -0.0028     | -0.0016     | -5.7598e-04 | 1.8576e-04 | 5.9077e-04  | 5.9077e-04  | 1.8576e-04 | -5.7598e-04 | -0.0016     | -0.0028     |
| 10                                  | -0.0038     | -0.0028     | -0.0019     | -0.0013    | -9.3396e-04 | -9.3396e-04 | -0.0013    | -0.0019     | -0.0028     | -0.0038     |

Figura 3-17 “Difference of Gaussians”

El resultado obtenido se convolucionó sobre la imagen previa (con filtro mediana) aplicando el comando “conv2”. En la imagen obtenida tras aplicar el filtro DoG (Figura 3-18) se pueden diferenciar los bordes y los propios caminos en color blanco. Para poder extraer las vías y operar con ellas posteriormente, se debe transformar la imagen obtenida en una matriz lógica de “unos” y “ceros”, siendo ésta una matriz binaria. Matlab permite binarizar de forma sencilla usando el comando “imbinarize”. Este comando tiene un límite para diferenciar entre lo que se transforma en “unos” y lo

que se transforma en “ceros”, siendo éste ajustable dependiendo del fin que se le quiera asignar. Para el presente trabajo, el límite se fijó en 0,5. Para la visualización de la imagen binaria, Matlab establece que los píxeles que contienen un cero sean visualizados en color negro mientras que aquellos que contienen un uno lo sean de color blanco.

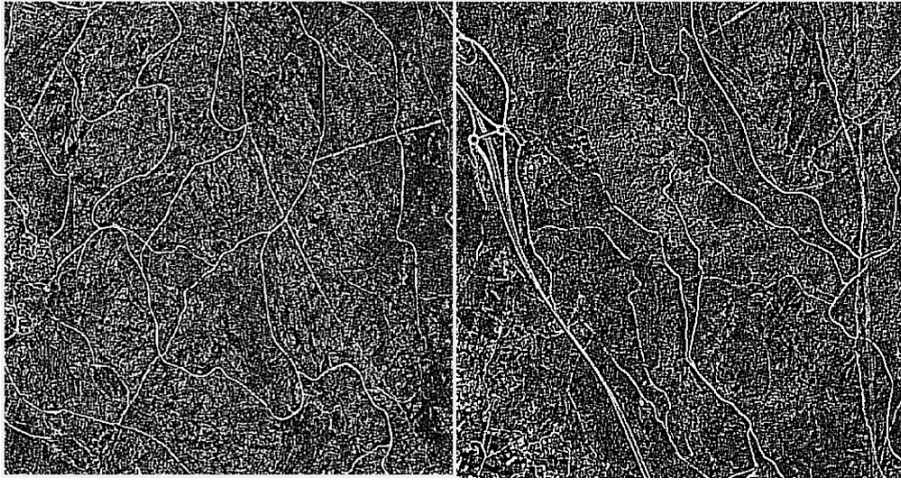


**Figura 3-18 Detalles de la imagen tras aplicar el filtro DoG**

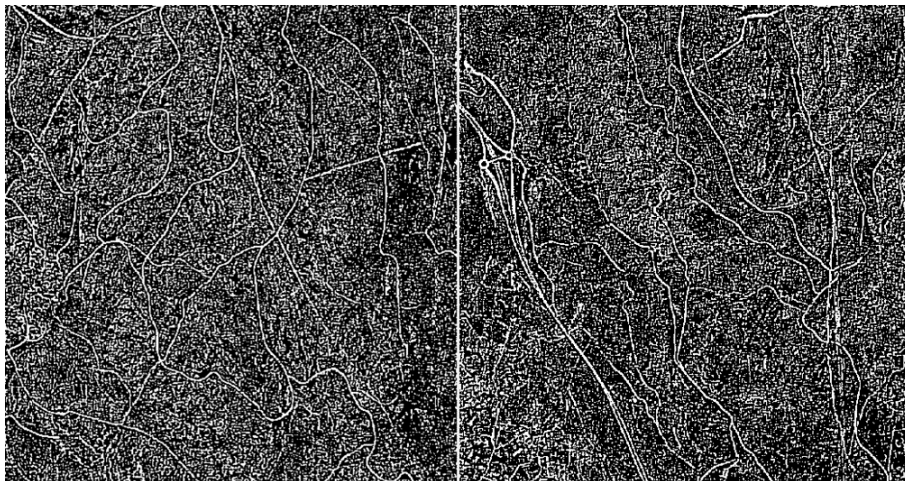


**Figura 3-19 Detalles de la imagen tras ser binarizada**

Como se puede observar en la Figura 3-19, existen una gran cantidad de píxeles aislados que no pertenecen a los caminos y que por tanto, su extracción no es de interés para el usuario. Para reducirlos, se hizo uso del comando “*bwareaopen*”. Este comando permite eliminar las agrupaciones de píxeles inferiores a un límite que marca el usuario y para este caso de estudio, se fijó en 400, es decir, el programa elimina las agrupaciones de 400 píxeles o menores.

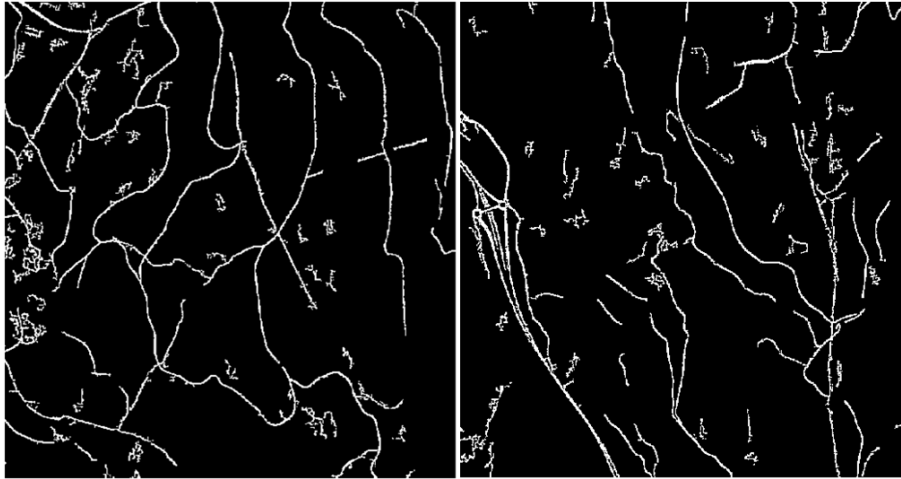


Figura 3-20 Detalle tras la eliminación de grupos de menos de 400 píxeles aislados

Tras este proceso, se puede observar la pérdida de muchas partes de los caminos (Figura 3-20). Este fenómeno puede estar ocasionado por diversas causas, entre estas: que los caminos estén cubiertos por vegetación, que no exista un suficiente contraste de color con las áreas de alrededor, o que al ser segmentados por ejemplo, por varios árboles aislados, el tramo que sí es detectado por el programa tenga un número de píxeles menor al introducido en el comando *"bwareaopen"*, con la consiguiente eliminación no deseada de dichos tramos.

Una vez que la imagen está limpia, se puede realizar el proceso de cierre de la misma. Si se intentara realizar este proceso en el apartado anterior, el resultado sería que muchos de los píxeles que producen el ruido en la imagen, se agruparían y no se podrían eliminar con el comando *"bwareaopen"*. La imagen quedaría muy distorsionada y no se podrían distinguir los caminos.

La unión de esos tramos se conoce como cierre de la imagen. Para ello se utilizaron los operadores morfológicos recogidos en el comando *"imdilate"* y posteriormente el comando *"imerode"* para que el camino tuviese su tamaño original. Tras esta acción se consigue cerrar los pequeños intervalos abiertos en los caminos (Figura 3-21), aunque es insuficiente para grandes tramos cubiertos por densa arboleda, ya que no se pueden recuperar.



Figura 3-21 Ejemplo proceso de cierre de imagen

### 3.4.2 Esqueletización de la imagen

Una vez obtenida la imagen binaria de los caminos se procedió a esqueletizar los mismos, ya que es la manera de minimizar fallos durante el establecimiento de la ruta óptima. Se empleó para ello el comando *“bwmorph”*, encargado de realizar operaciones morfológicas sobre una imagen binaria. Este comando, al introducir la opción *‘skel’*, permite extraer el esqueleto de un objeto en una imagen binaria, eliminando los píxeles contiguos a objetos pero sin romper la continuidad de éstos, como se observa en la Figura 3-22. Por defecto, el comando extrae los caminos con una anchura de 1 píxel (Figura 3-23) [23].

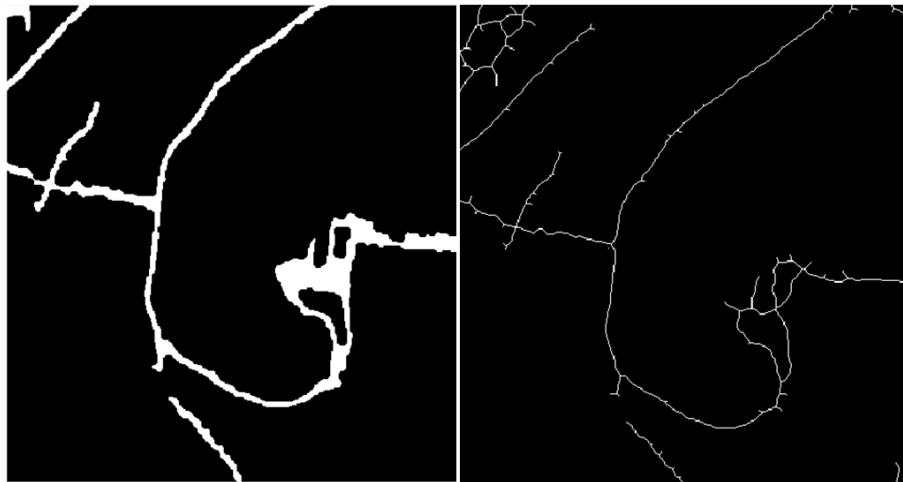


Figura 3-22 Ejemplo proceso de esqueletización

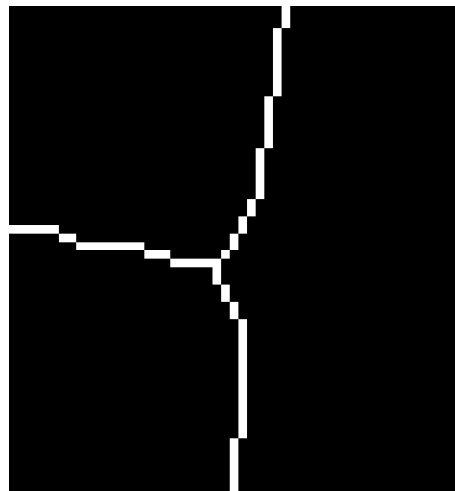


Figura 3-23 Ejemplo de la anchura del esqueleto de los caminos

El comando *“bwmorph”* permite además obtener las intersecciones de los caminos y los puntos en los que éstos comienzan y terminan. Esto es de gran utilidad debido a que se pueden emplear para limpiar los esqueletos de pequeñas prolongaciones no deseadas, que se generan al disminuir el grosor del camino. Para obtener estas intersecciones se introduce *‘branchpoints’* y la opción *‘endpoints’* para conocer los puntos donde terminan.

Con la finalidad de limpiar el esqueleto, en primer lugar se deben identificar los cruces y los puntos finales de los caminos. Para identificar qué ramas son las que se quieren eliminar, el segundo paso es medir las distancias entre todos los píxeles de la matriz mediante el comando *“bwdistgeodesic”*. Este comando empieza a medir desde un punto extremo del esqueleto (extremo inferior derecho por defecto) y calcula la distancia (en píxeles) desde ese extremo a todos los puntos de la matriz donde hay camino (Figura 3-24). El tercer paso es establecer un número de píxeles de referencia para discernir las ramas

de los caminos. La referencia que se tomó fue la longitud desde el punto más alejado de la matriz (representado en la imagen de la izquierda de la Figura 3-24 por un “0”) hasta el primer cruce de caminos (representado en la imagen de la derecha de la Figura 3-24 por un “23”). Para esta imagen la distancia calculada fue de 23 píxeles, por lo que aquellas ramas con un número menor o igual a éste fueron eliminadas, y las mayores se tomaron como caminos (imagen superior izquierda Figura 3-25). El cuarto paso consiste en localizar estas ramas e introducirlas en una matriz (imagen superior derecha Figura 3-25). Por último, se procede a su eliminación restando la matriz con las ramas a la matriz original, obteniéndose una matriz resultante con el esqueleto sin outliers (imagen inferior Figura 3-25).

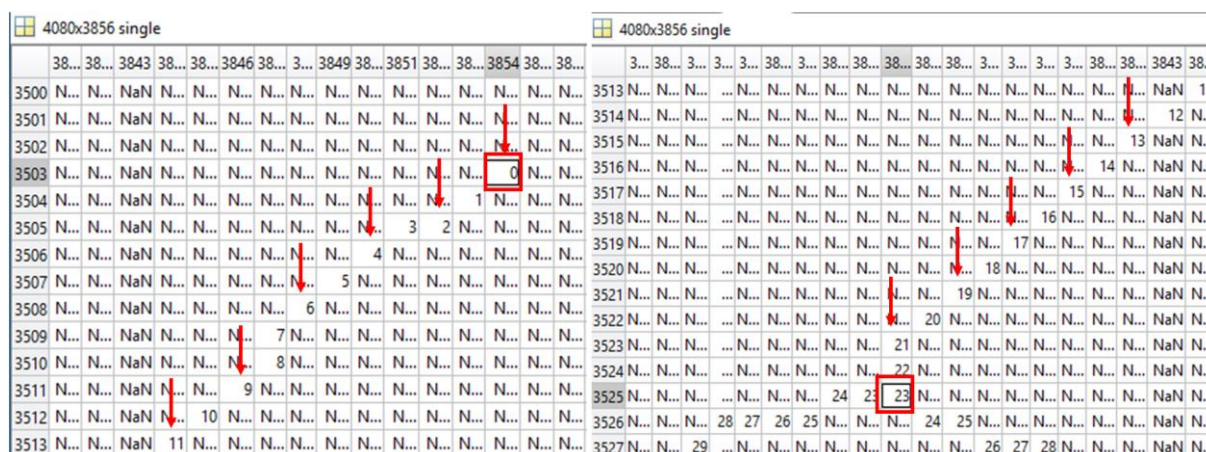


Figura 3-24 Rama origen de referencia usada para eliminar ramas menores de 23 píxeles

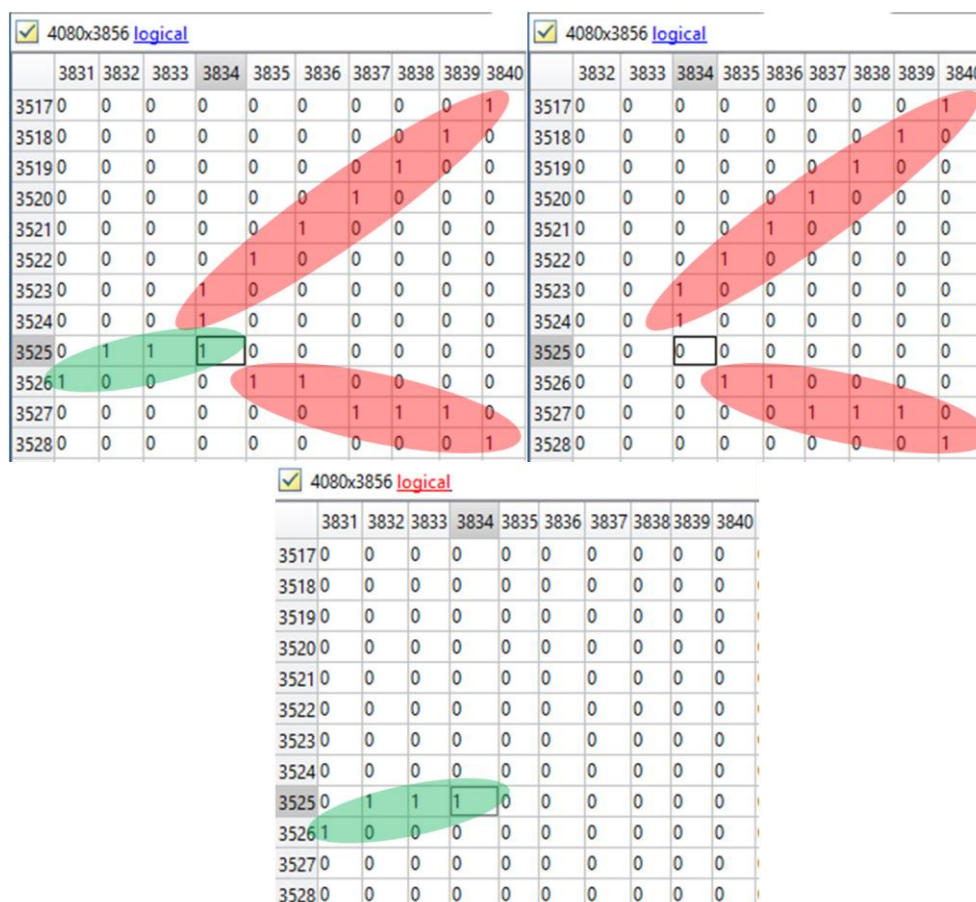


Figura 3-25 Eliminación de ramas (rojo) y obtención del camino limpio (verde)

Mediante el comando “*imshow*” podemos comprobar el resultado de este proceso (Figura 3-26).

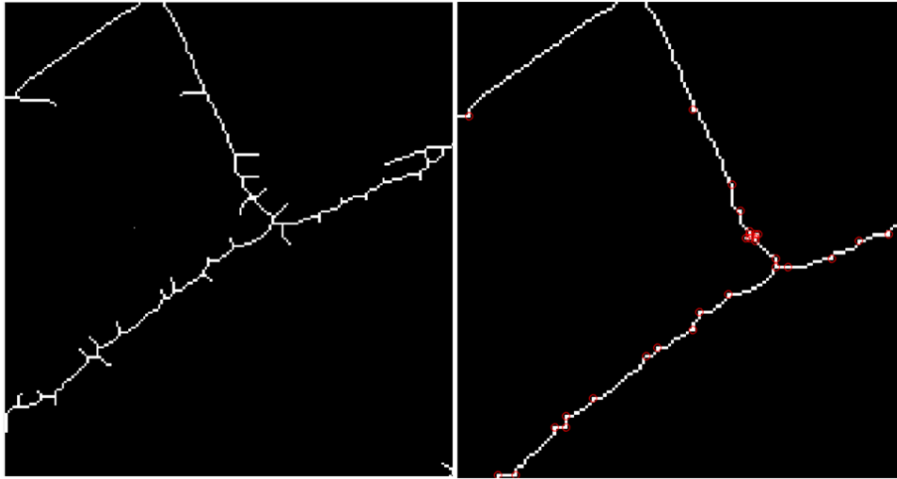


**Figura 3-26 Ejemplo limpieza de los esqueletos de los caminos**

### 3.4.3 Extracción de las coordenadas UTM de los caminos

Con el fin de obtener las coordenadas relativas XY de los caminos en la imagen, se hizo uso del comando de Matlab *“find”*. Este comando busca índices y valores entre los elementos de la matriz que no son “ceros”. Para definir las coordenadas se buscaron los valores iguales a 1, es decir, los píxeles blancos. Se transformó la matriz de píxeles en una matriz de dos columnas, conteniendo la coordenada relativa X en la primera columna y la coordenada relativa Y en la segunda.

Paralelamente, se extrajo la nube de puntos LiDAR del área de estudio desde el programa RiSCAN Pro. Se seleccionaron las nubes de puntos descargadas de la página del PNOA y se exportaron a formato “.txt”. A continuación se importaron en Matlab en forma de una matriz de tres columnas, con las coordenadas XYZ de los puntos, con un total de 41.919.689 puntos. Mediante el comando *“pcshow”* se puede visualizar la nube de puntos obtenida, como así se refleja en la Figura 3-27.

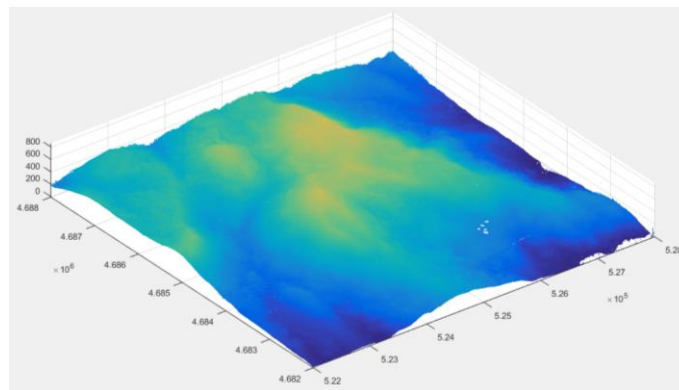


**Figura 3-27 Nube de puntos de la zona de estudio visualizada en Matlab**

Para la georreferenciación completa de los caminos se transformaron las coordenadas relativas de la ortoimagen a coordenadas globales UTM. Para ello, se procedió a crear una matriz de dos columnas, con el mismo tamaño que aquella matriz que contiene las coordenadas de los caminos. La primera columna contenía la coordenada X relativa y la segunda, la coordenada Y relativa del primer píxel de la imagen. Con esto se consigue que todos los píxeles de la imagen queden con las coordenadas relativas que le corresponden. Del visor de imágenes Iberpix 4 se obtuvieron las coordenadas UTM de la esquina sur-oeste de la imagen, Easting 523.270,3 y Northing 4.682.249,1. Se sumaron a todas las coordenadas relativas de la imagen para obtener finalmente los valores absolutos UTM.

Previamente al hacer la comparación entre la matriz de coordenadas XY con la matriz de la nube de puntos, se detectó que Matlab y RiSCAN Pro tienen maneras opuestas para la lectura de matrices. Matlab lo realiza por columnas de arriba abajo y de derecha a izquierda mientras que RiSCAN Pro lo realiza

por filas de derecha a izquierda y de arriba abajo. Para conseguir que el programa asignara correctamente cada pareja de coordenadas XY con su Z correspondiente, se optó por rotar la imagen binaria 90° en sentido horario, usando el comando “*rot*”. De esta manera se logra hacer una asociación correcta de las coordenadas Z reales de los caminos (ver Figura 3-28).

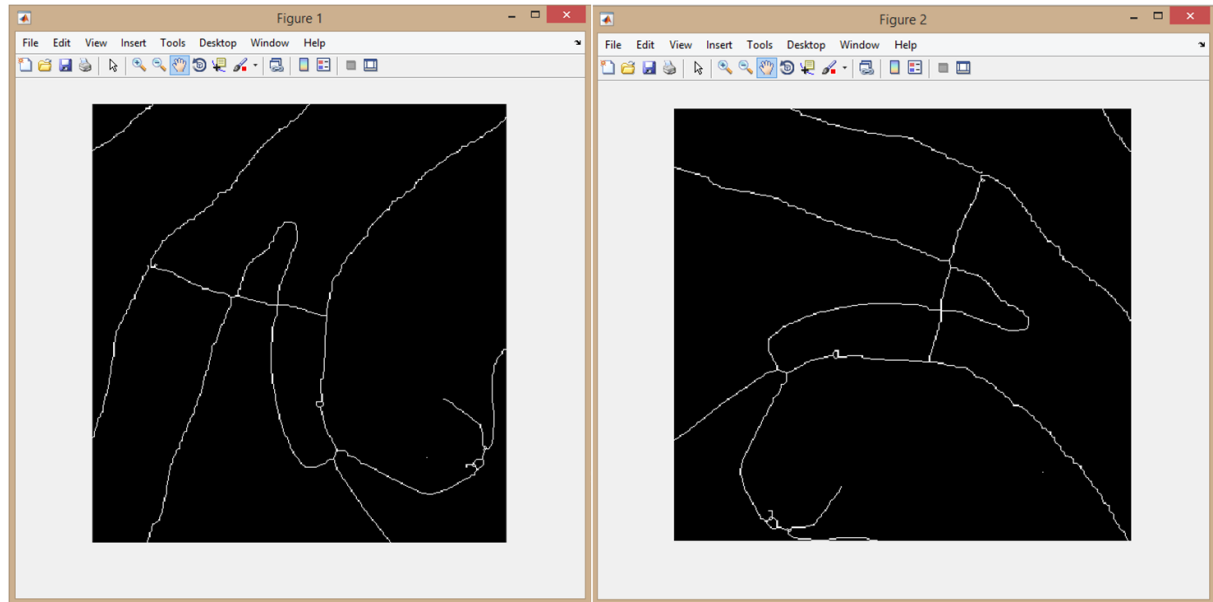


**Figura 3-28 Captura de pantalla explicación funcionamiento comando “*rot*”**

Una vez concluido esto, se procedió a comparar la matriz de los caminos con la matriz de la nube de puntos. El objetivo era establecer qué coordenadas cartesianas (XY) de la matriz de los caminos estaban contenidas en la matriz de la nube de puntos, para poder así asociarles la coordenada Z correspondiente. La comparación de ambas matrices se hizo mediante el comando “*ismembertol*”, que permite comparar las dos primeras columnas de ambas matrices (XY) y además introducir una tolerancia, ya que el punto no va a coincidir exactamente con el centro del píxel. El comando se usó con la opción ‘*ByRows*’ para que la comparación se hiciera por filas (XY) y para especificar una tolerancia absoluta ‘*DataScale*’. La tolerancia usada fue de 2 metros, para evitar que ningún píxel quedara sin puntos. Para evitar que más de un punto pudiera quedar dentro de un mismo píxel se realizó el promedio de las alturas contenidas en cada píxel y tomando ese valor como coordenada Z.

A las coordenadas cartesianas XY, resultantes de la comparación, se anexó la columna de las Z correspondientes a cada una de esas coordenadas. Tras este proceso se obtuvo una matriz de tres columnas que contenía las coordenadas XYZ de los caminos. Para ver que se correspondía con la realidad, se comparó con la cartografía digital del Visor Iberpix 4, producto del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La matriz resultante de este proceso contiene 1.262.728 puntos y al igual que la nube de puntos original, se puede visualizar con el comando “*pcshow*” (ver Figura 3-29).

Paralelamente a este proceso, se realizó la extracción manual de los caminos mediante la aplicación de Matlab “*Image Segmenter*”. Esta opción permite hacer una segmentación manual sobre la misma imagen, usando formas poligonales, elipses y dibujando a mano alzada. El motivo por el cual se realizó esta extracción es evitar los posibles errores que se fueron arrastrando tras aplicar los diferentes filtros a la imagen original.

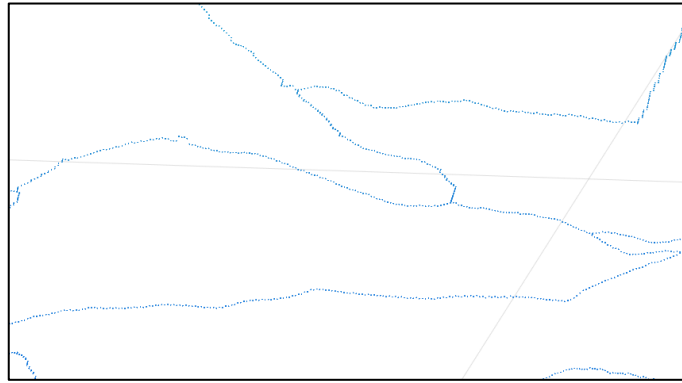


Figura 3-29 Ejemplo nube de puntos de los caminos

### 3.5 Cálculo de las pendientes longitudinales

La pendiente longitudinal entre dos puntos A y B es la tangente del ángulo " $\alpha$ " (Ver Figura 3-30), es decir, la tangente del ángulo formado por el camino con la horizontal. La pendiente normalmente se expresa en porcentaje, así una pendiente del 20% significa que por cada 100 metros recorridos sobre la horizontal, se ascienden 20 metros en altura. Para el cálculo de dicha pendiente en el trabajo, es necesario conocer la diferencia de alturas ( $\Delta Z$ ) y la distancia geométrica ( $D$ ) entre los puntos.

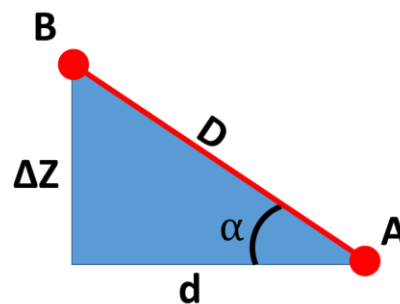
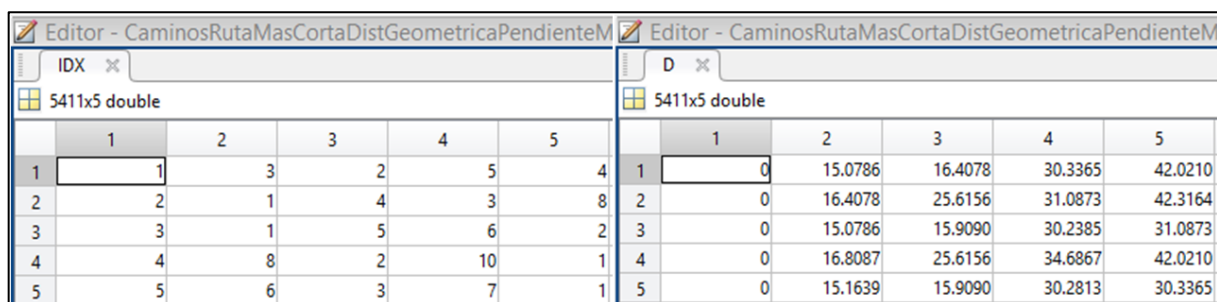


Figura 3-30 Cálculo de la pendiente

Se adjunta a continuación la fórmula utilizada para el cálculo de la pendiente:

$$\text{Pend (\%)} = \tan \left( \sin^{-1} \left( \frac{\Delta Z}{D} \right) \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Haciendo uso del comando "*knnsearch*", se encuentran los vecinos a cada punto y se guardan en una matriz. El comando permite elegir el número de vecinos que se deseen. Para el presente trabajo se decidió trabajar con los cuatro vecinos más cercanos. Como se observa en la imagen izquierda de la Figura 3-31, se obtiene una matriz de cinco columnas: la primera contiene todos los puntos en orden descendente y las 4 siguientes contienen los vecinos más próximos al punto de la primera columna. El comando "*knnsearch*" permite también calcular la distancia entre los puntos y sus vecinos. Se usaron las coordenadas X, Y, Z, con el objetivo de hallar la distancia geométrica entre los vecinos. En la imagen derecha de la Figura 3-31 se muestran las distancias geométricas entre los mismos puntos y vecinos que la imagen anterior.



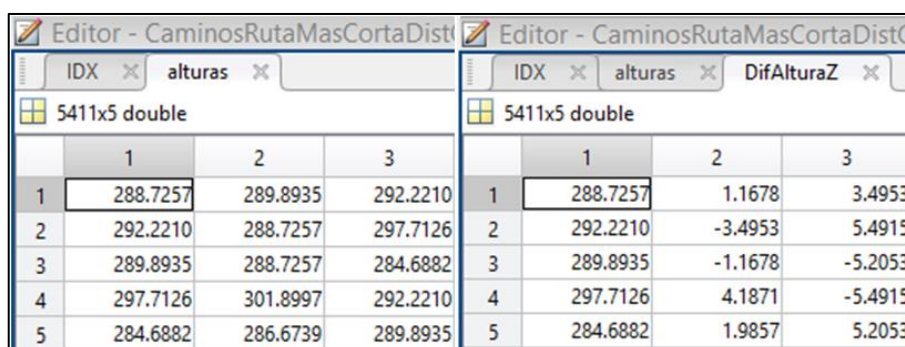
| IDX | 1 | 2 | 3 | 4  | 5 |
|-----|---|---|---|----|---|
| 1   | 1 | 3 | 2 | 5  | 4 |
| 2   | 2 | 1 | 4 | 3  | 8 |
| 3   | 3 | 1 | 5 | 6  | 2 |
| 4   | 4 | 8 | 2 | 10 | 1 |
| 5   | 5 | 6 | 3 | 7  | 1 |

| D | 1 | 2       | 3       | 4       | 5       |
|---|---|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 0 | 15.0786 | 16.4078 | 30.3365 | 42.0210 |
| 2 | 0 | 16.4078 | 25.6156 | 31.0873 | 42.3164 |
| 3 | 0 | 15.0786 | 15.9090 | 30.2385 | 31.0873 |
| 4 | 0 | 16.8087 | 25.6156 | 34.6867 | 42.0210 |
| 5 | 0 | 15.1639 | 15.9090 | 30.2813 | 30.3365 |

Figura 3-31 Captura de pantalla para explicar el funcionamiento de “knnsearch”

El siguiente paso fue sustituir los puntos guardados en la matriz por sus respectivas alturas (coordenada Z). Se hizo uso del comando “*reshape*” para esta acción. En la imagen izquierda de la Figura 3-32, la primera columna se corresponde con la altura del punto de estudio y las columnas 2 y 3 con las alturas de los puntos vecinos. Después se calculó la diferencia de altimetría entre los puntos y sus vecinos. En la imagen derecha de la Figura 3-32, las columnas 2 y 3 corresponden con la diferencia de alturas entre el punto de estudio y los vecinos.



| IDX | alturas  |          |          |
|-----|----------|----------|----------|
| 1   | 288.7257 | 289.8935 | 292.2210 |
| 2   | 292.2210 | 288.7257 | 297.7126 |
| 3   | 289.8935 | 288.7257 | 284.6882 |
| 4   | 297.7126 | 301.8997 | 292.2210 |
| 5   | 284.6882 | 286.6739 | 289.8935 |

| IDX | alturas  | DifAlturaZ |         |
|-----|----------|------------|---------|
| 1   | 288.7257 | 1.1678     | 3.4953  |
| 2   | 292.2210 | -3.4953    | 5.4915  |
| 3   | 289.8935 | -1.1678    | -5.2053 |
| 4   | 297.7126 | 4.1871     | -5.4915 |
| 5   | 284.6882 | 1.9857     | 5.2053  |

Figura 3-32 Explicación “*reshape*” y diferencia de alturas entre los vecinos y la 1ª columna

A continuación, se obtuvo la pendiente entre los puntos. Para ello, se reordenó la matriz de forma que quedara estructurada como en la imagen izquierda de la Figura 3-33, la primera columna contiene el punto que se quiere estudiar, la segunda uno de los vecinos, la tercera recoge la distancia geométrica existente entre ellos y la cuarta la diferencia de alturas entre ambos. El proceso comenzó dividiendo cada diferencia de alturas, por su respectiva distancia geométrica empleando el comando “*rdivide*”. Después se realizó la tangente del arcoseno de cada uno de los resultados obtenidos en el apartado anterior. Finalmente se multiplicó por 100 para obtener el valor en porcentaje y se eliminaron las pendientes negativas mediante el valor absoluto. El resultado se puede ver en la imagen derecha de la Figura 3-33, en la que las tres primeras columnas son iguales que la imagen contigua, pero la cuarta columna recoge la pendiente entre los puntos de la primera y segunda columnas.

|   | 1 | 2 | 3       | 4      |
|---|---|---|---------|--------|
| 1 | 1 | 2 | 16.4078 | 3.4953 |
| 2 | 1 | 3 | 15.0786 | 1.1678 |
| 3 | 1 | 4 | 42.0210 | 8.9869 |
| 4 | 1 | 5 | 30.3365 | 4.0375 |
| 5 | 2 | 1 | 16.4078 | 3.4953 |
| 6 | 2 | 3 | 31.0873 | 2.3275 |
| 7 | 2 | 4 | 25.6156 | 5.4915 |
| 8 | 2 | 8 | 42.3164 | 9.6786 |
| 9 | 3 | 1 | 15.0786 | 1.1678 |

|   | 1 | 2 | 3       | 4       |
|---|---|---|---------|---------|
| 1 | 1 | 2 | 16.4078 | 21.8033 |
| 2 | 1 | 3 | 15.0786 | 7.7680  |
| 3 | 1 | 4 | 42.0210 | 21.8932 |
| 4 | 1 | 5 | 30.3365 | 13.4286 |
| 5 | 2 | 1 | 16.4078 | 21.8033 |
| 6 | 2 | 3 | 31.0873 | 7.5082  |
| 7 | 2 | 4 | 25.6156 | 21.9486 |
| 8 | 2 | 8 | 42.3164 | 23.4948 |
| 9 | 3 | 1 | 15.0786 | 7.7680  |

Figura 3-33 Captura de pantalla comparación diferencia de altura y pendiente (4ª columna)

Al ordenar las filas mediante el comando “*sortrows*”, se observó la existencia de duplicidades en el cálculo de las pendientes. En la imagen izquierda de la Figura 3-34, los valores duplicados se representan con el mismo color. Se deben a que el programa calcula la distancia de un punto a su vecino y desde ese punto vecino al punto original. Para eliminar estas duplicidades, se recurrió al comando “*unique*”, obteniendo el resultado de la imagen derecha de la Figura 3-34.

|    | 1 | 2 | 3       | 4       |
|----|---|---|---------|---------|
| 1  | 1 | 2 | 16.4078 | 21.8033 |
| 2  | 1 | 3 | 15.0786 | 7.7680  |
| 3  | 1 | 4 | 42.0210 | 21.8932 |
| 4  | 1 | 5 | 30.3365 | 13.4286 |
| 5  | 2 | 1 | 16.4078 | 21.8033 |
| 6  | 2 | 3 | 31.0873 | 7.5082  |
| 7  | 2 | 4 | 25.6156 | 21.9486 |
| 8  | 2 | 8 | 42.3164 | 23.4948 |
| 9  | 3 | 1 | 15.0786 | 7.7680  |
| 10 | 3 | 2 | 31.0873 | 7.5082  |
| 11 | 3 | 5 | 15.9090 | 34.6253 |
| 12 | 3 | 6 | 30.2385 | 10.7083 |

|    | 1 | 2  | 3       | 4       |
|----|---|----|---------|---------|
| 1  | 1 | 2  | 16.4078 | 21.8033 |
| 2  | 1 | 3  | 15.0786 | 7.7680  |
| 3  | 1 | 4  | 42.0210 | 21.8932 |
| 4  | 1 | 5  | 30.3365 | 13.4286 |
| 5  | 2 | 3  | 31.0873 | 7.5082  |
| 6  | 2 | 4  | 25.6156 | 21.9486 |
| 7  | 2 | 8  | 42.3164 | 23.4948 |
| 8  | 3 | 5  | 15.9090 | 34.6253 |
| 9  | 3 | 6  | 30.2385 | 10.7083 |
| 10 | 4 | 8  | 16.8087 | 25.7210 |
| 11 | 4 | 10 | 34.6867 | 36.7506 |
| 12 | 5 | 6  | 15.1639 | 13.2086 |

Figura 3-34 Comparativa de eliminación de duplicados mediante “*unique*”

### 3.6 Creación del grafo en Matlab

Con la finalidad de crear de grafos no direccionales, Matlab cuenta con el comando “*graph*”. Se introdujeron los nodos de origen (primera columna de nuestra matriz), los nodos destino (segunda columna de nuestra matriz) y por último los pesos asignados a cada arista (tercera columna de la matriz). En la Figura 3-35 se puede comprobar el resultado, mediante el comando “*plot*”, de representación del grafo. De esta manera tenemos un grafo en el que los nodos representan los caminos extraídos de una imagen y las aristas llevan asociado un peso dependiendo de la distancia reducida existente entre los nodos.

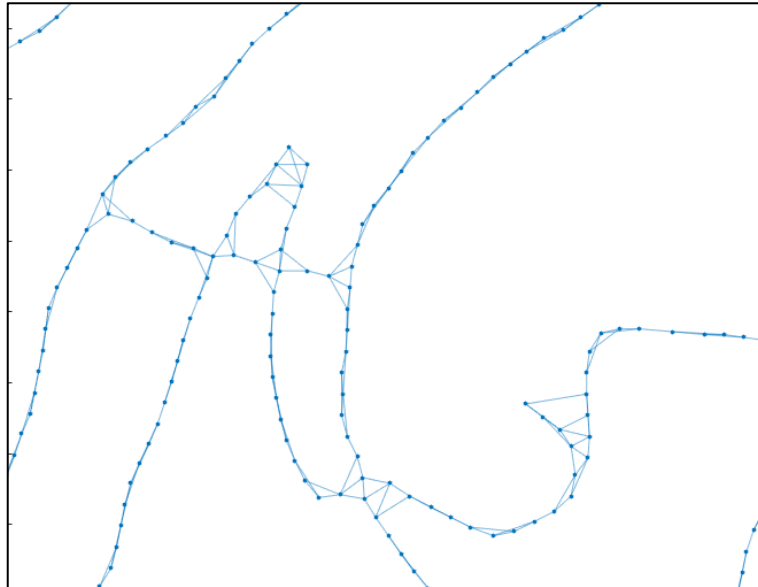


Figura 3-35 Ejemplo de representación del grafo

### 3.7 Algoritmo para cálculo de la ruta óptima (Algoritmo de Dijkstra)

Dado un grafo cuyos arcos se han asociado una serie de pesos, se define el camino de coste mínimo de un vértice “*u*” a otro “*v*”, como el camino donde la suma de los pesos de los arcos que lo forman es la más baja entre las de todos los caminos posibles de “*u*” a “*v*”. El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo eficiente (de complejidad  $O(n^2)$  donde “*n*” es el número de vértices) que sirve para encontrar el camino de coste mínimo desde un nodo origen a todos los demás nodos del grafo. Fue diseñado por el holandés Edsger Wybe Dijkstra en 1959.



Figura 3-36 Ejemplo búsqueda camino óptimo [32]

El fundamento sobre el que se asienta este algoritmo es el principio de optimalidad: si el camino más corto entre los vértices “*u*” y “*v*” pasa por el vértice “*w*”, entonces la parte del camino que va de “*w*” a “*v*” debe ser el camino más corto entre todos los caminos que van de “*w*” a “*v*” (ver Figura 3-36). De esta manera, se van construyendo sucesivamente los caminos de coste mínimo desde un vértice inicial hasta cada uno de los vértices del grafo, y se utilizan los caminos conseguidos como parte de los nuevos caminos [32].

Como mejora a esta herramienta, se introdujo la posibilidad de introducir manualmente por parte del usuario la pendiente máxima superable por el vehículo, para evitar de este modo rutas con pendientes. Mediante el comando “*input*”, el usuario introduce el valor de la pendiente longitudinal máxima en porcentaje que puede superar su vehículo. La manera de conseguirlo fue, entre todas las pendientes asignadas las aristas del grafo, buscar aquellas que son mayores o iguales a la que el usuario introduce y cambiarlas por el valor de infinito. El algoritmo evita estos tramos y toma una ruta diferente.

Con el fin de hacer más intuitivo todo el proceso, se decidió que el usuario fuera capaz de seleccionar los puntos de partida y llegada manualmente con el ratón del ordenador. Se empleó el comando *“ginput”*, que devuelve las coordenadas del punto donde el usuario hace clic sobre la pantalla. Estas coordenadas se redondean con el comando *“round”* para evitar los números decimales. Después se comparan con las halladas anteriormente en el apartado 3.4. Al mismo tiempo, para facilitar la tarea de seleccionar los puntos de origen y llegada al usuario, y no tener que hacer clic sobre el nodo exactamente, se estableció una tolerancia de 30 metros alrededor de cada uno usando el comando *“ismembertol”*. Dicha tolerancia absoluta se especificó mediante la opción *‘DataScale’*, dando al usuario un margen de 30 metros a cada lado del camino para seleccionar su punto. Para facilitar el uso del programa, se modificó para que se muestre en pantalla un asterisco de color rojo en el lugar donde el usuario hizo el primer punto pulsado y uno amarillo donde hizo el segundo clic con el ratón. Para aumentar el tamaño del asterisco, se usó la opción *“MarkerSize, 10”*.

El comando *“shortestpath”* permite calcular la ruta más corta entre los puntos seleccionados, teniendo en cuenta los pesos asociados a cada arista (pendientes longitudinales). El algoritmo que Matlab utiliza por defecto es el de Dijkstra. Los puntos que se introducen en el algoritmo son los que el usuario ha seleccionado gráficamente con el ratón. Una vez calculada la ruta óptima, se grafica mediante el comando *“plot”* y se subraya sobre el grafo con el comando *“highlight”*, como se ve en la Figura 3-37. Para modificar el grosor del subrayado se usó la opción *“LineWidth, 10”*.

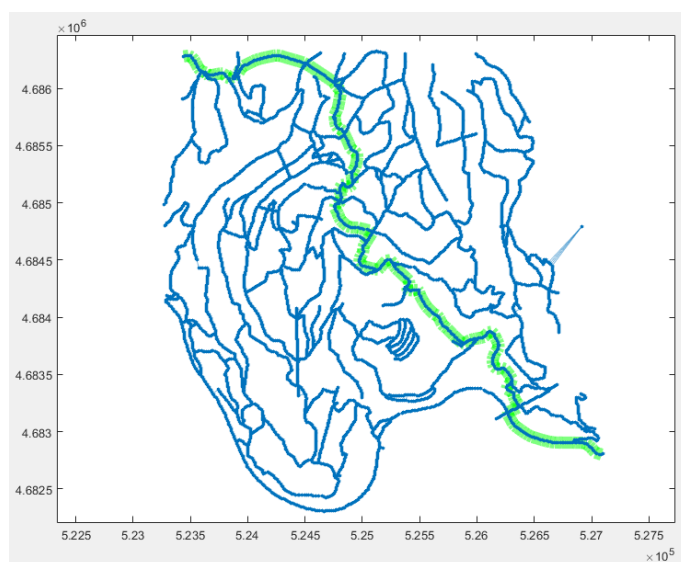


Figura 3-37 Ejemplo de resultado obtenido subrayado en verde

### 3.8 Implementación en gvSIG

El resultado obtenido en el apartado anterior lo podemos exportar a un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de hacer análisis más completo del terreno que se va a recorrer. De esta forma, por ejemplo, sería posible conocer de antemano que zonas de la ruta van a estar cubiertas por la vegetación dificultando la observación aérea, las zonas sin vegetación donde planear posibles puntos de toma de helicópteros para evacuación de heridos, que zonas son las más cercanas a masas de agua, población o vías de comunicación existentes. A modo de ejemplo, se incluye un estudio de la cobertura arbórea presente a lo largo de una ruta óptima trazada por la herramienta desarrollada.

La forma de proceder es hacer una intersección entre la capa de la ruta óptima y la capa del Inventario Forestal Nacional (IFN) con información de las masas forestales en la Provincia de Pontevedra (Figura 3-38). Para este paso, es necesario que a la ruta exportada se le elimine la coordenada de la altimetría, ya que la representación va a ser en 2D. Desde Matlab se crea un archivo ASCII con las coordenadas cartesianas XY de los nodos seleccionados por el algoritmo. La razón de usar este formato se debe a la fácil visualización de los datos contenidos y a la sencillez de operar con él. Para poder exportarlo a

gvSIG, se tuvo que modificar su formato a un archivo “.csv” en Excel. Una vez importada la ruta, fue necesario crear una polilínea que una todos los puntos del recorrido, con el fin de que exista una continuidad y evitar posibles fallos por usar puntos aislados. A continuación, se realiza la intersección de esta polilínea con la capa del IFN; obteniéndose la ruta óptima dividida en diferentes segmentos en función del tipo de especie, tipos de estratos, etc.

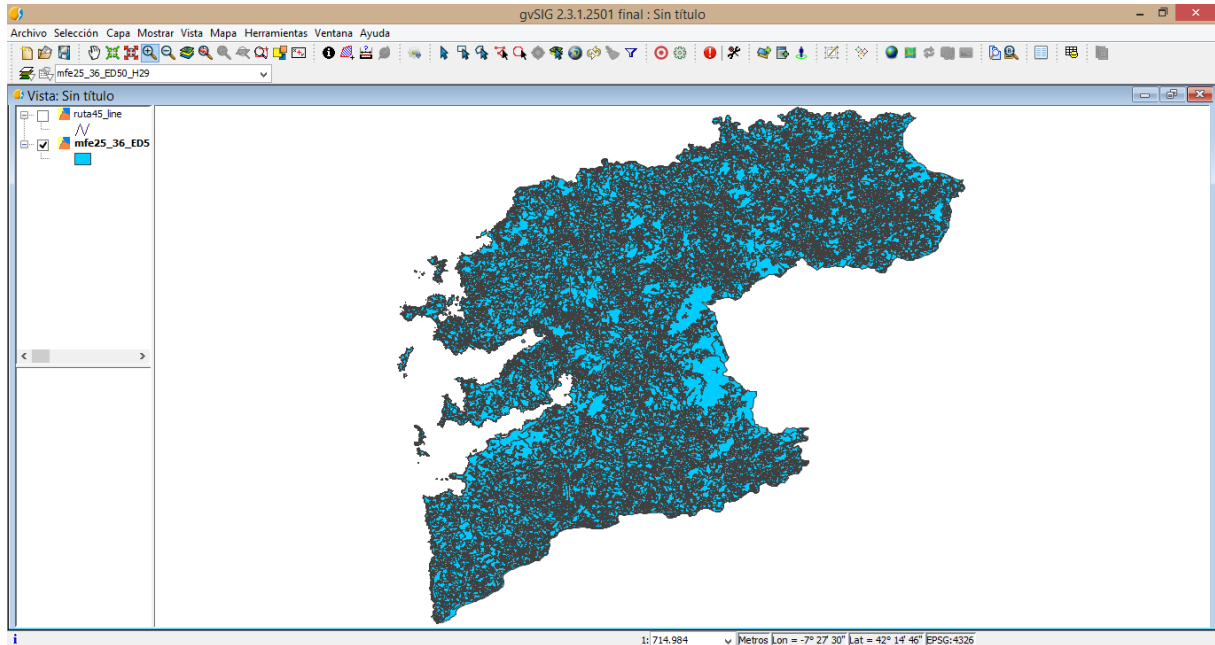


**Figura 3-38 Capa IFM de la Provincia de Pontevedra**



## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el capítulo de Desarrollo del TFG se han explicado los cálculos y procedimientos que se llevaron a cabo para su realización. En este capítulo se van a exponer los resultados obtenidos para una mejor interpretación de los mismos. Se van a analizar también los problemas encontrados y cómo se solucionaron. Además se simuló la realización del mismo trayecto por tres vehículos de Infantería de Marina con diferentes características para comprobar que el algoritmo toma rutas distintas en función de la pendiente longitudinal máxima del vehículo.

### 4.1 Selección de la zona de estudio

En el apartado 3.4.1 se importó la imagen desde el PNOA y se visualiza en Matlab con el comando “*imshow*”:

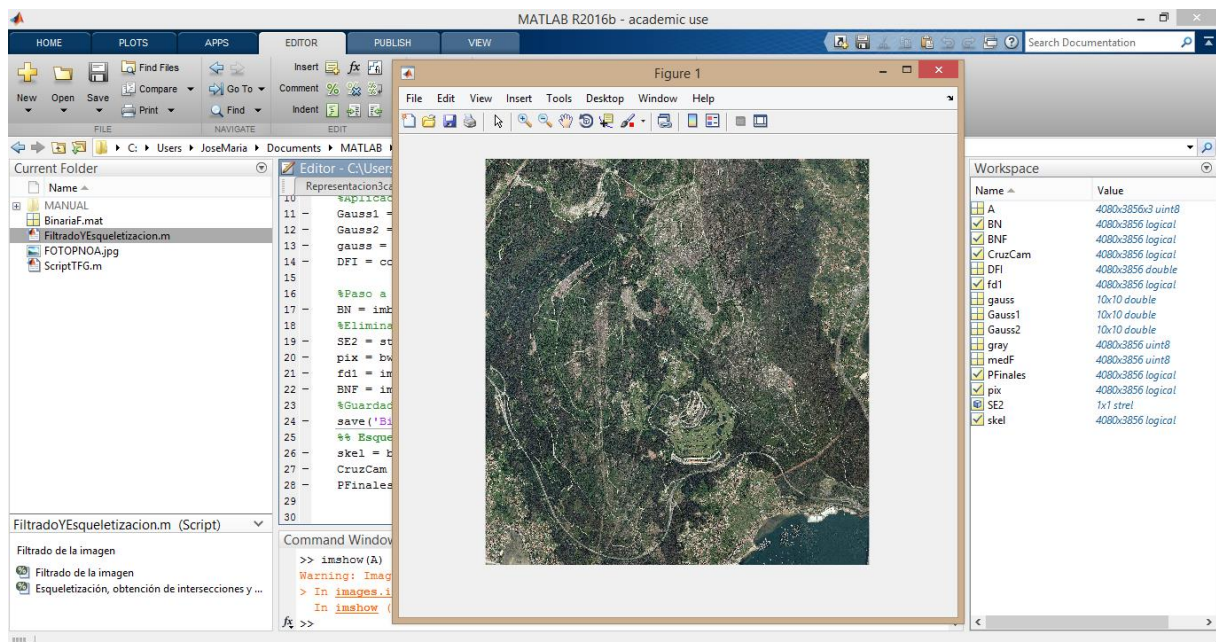


Figura 4-1 Captura de pantalla visualización de la imagen importada en Matlab

Una vez pasada a escala de grises podemos observar que cada píxel de la matriz contiene únicamente valores del 0 al 255 (ver imagen izquierda de la Figura 4-2).

| Editor - FiltradoYEsqueletizacion.m |    |     |    |    | Editor - FiltradoYEsqueletizacion.m |    |    |    |    |
|-------------------------------------|----|-----|----|----|-------------------------------------|----|----|----|----|
| gray x                              |    |     |    |    | gray x medF x                       |    |    |    |    |
| 4080x3856 uint8                     |    |     |    |    | 4080x3856 uint8                     |    |    |    |    |
|                                     | 1  | 2   | 3  | 4  |                                     | 1  | 2  | 3  | 4  |
| 1                                   | 88 | 72  | 78 | 69 | 1                                   | 0  | 66 | 66 | 59 |
| 2                                   | 77 | 66  | 59 | 78 | 2                                   | 66 | 77 | 72 | 69 |
| 3                                   | 27 | 90  | 85 | 67 | 3                                   | 48 | 77 | 67 | 78 |
| 4                                   | 99 | 48  | 93 | 19 | 4                                   | 48 | 69 | 63 | 63 |
| 5                                   | 69 | 60  | 60 | 63 | 5                                   | 60 | 83 | 60 | 60 |
| 6                                   | 85 | 103 | 83 | 27 | 6                                   | 60 | 83 | 60 | 57 |
| 7                                   | 84 | 57  | 90 | 18 | 7                                   | 57 | 84 | 57 | 23 |
| 8                                   | 97 | 53  | 84 | 21 | 8                                   | 57 | 84 | 57 | 23 |
| 9                                   | 64 | 117 | 72 | 19 | 9                                   | 64 | 76 | 53 | 22 |
| 10                                  | 76 | 87  | 43 | 8  | 10                                  | 68 | 72 | 49 | 37 |

Figura 4-2 Comparación de valores escala de grises (izquierda) y filtro mediana (derecha)

Observando ambas matrices podemos comparar como el filtro mediana suaviza los valores de la matriz en escala de grises (imagen derecha de la Figura 4-2). Permite reducir el ruido en la imagen eliminando los píxeles que tienen un valor muy por encima o muy por debajo de sus vecinos. En la imagen obtenida se pueden observar los detalles con mayor nitidez, aunque se incluye un error al modificar el valor de los píxeles.

Posteriormente se aplica el filtro DoG para la detección de los caminos. Se ensayó también con el filtro LoG (*Laplacian of Gaussian*, imagen izquierda de la Figura 4-3), pero los resultados obtenidos con el de Diferencia de Gaussianos fueron mejores (imagen derecha de la Figura 4-3), por lo que se prefirió usar este último para el trabajo.

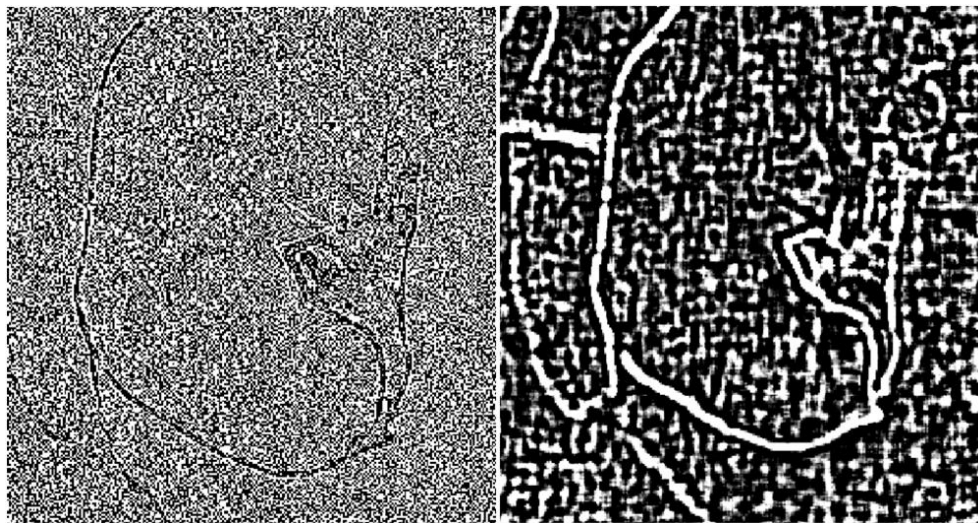


Figura 4-3 Comparativa entre filtros LoG (izquierda) y DoG (derecha)

A continuación, se binariza la imagen obtenida y se limpia de grupos de píxeles aislados que quedan debido al abundante ruido, mediante el comando “*bwareaopen*”. El problema principal encontrado en este paso, fue el establecimiento de un valor de número de píxeles a partir del cual se elimina un grupo aislado. Se hicieron pruebas variando el número del grupo de píxeles y se llegó a la conclusión de que el mejor valor era 400 (ver Figura 4-4). Por debajo de este valor, se aprecia demasiado ruido en la imagen, y por encima se pierden demasiados detalles. Incluso se eliminaban los tramos de vías que se pretendían estudiar.



**Figura 4-4 Comparativa uso de “bwareaopen” 100 píxeles (izquierda) y 700 píxeles (derecha)**

A continuación, se realiza la esqueletización de la imagen anterior. Este proceso no rompe los caminos, simplemente los adelgaza hasta una anchura de un píxel. El objetivo es simplificar los posteriores tratamientos y evitar fallos por reflujos al emplear el algoritmo de la ruta óptima.

Una vez concluido lo anterior, se procede a la extracción de los caminos y a dar una coordenada Z a cada punto de la imagen binaria. Para este proceso, primero se obtienen las coordenadas relativas X e Y de los píxeles de la matriz previamente rotada. El siguiente paso es el paso a coordenadas UTM de las coordenadas previamente extraídas. Del visor de imágenes Iperpix se obtuvieron las coordenadas de la esquina sur-oeste de la imagen, Easting 523.270,3 y Northing 4.682.249,1. Se sumaron a todos los puntos las coordenadas relativas de la imagen para obtener las absolutas UTM. Por último, se comparan ambas matrices para sacar los puntos en común. El resultado es el mostrado en la Figura 4-5.

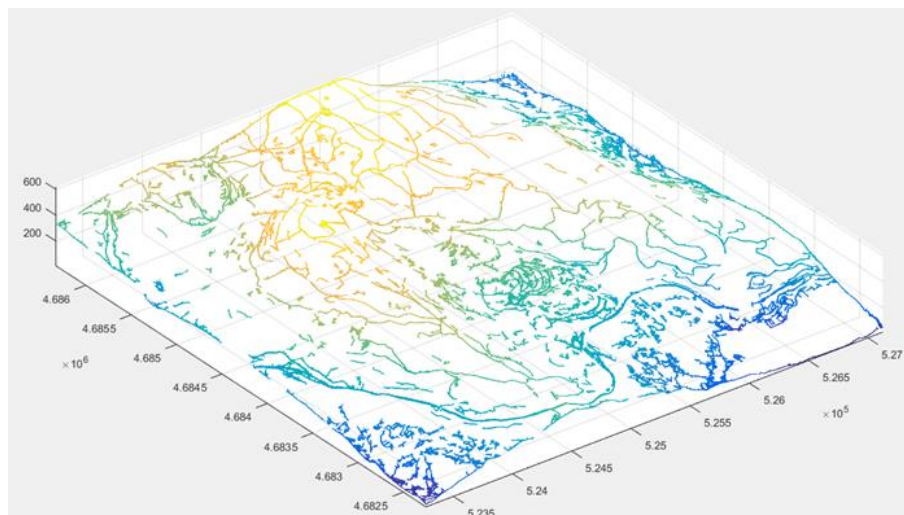


**Figura 4-5 Nube de puntos que representa los caminos extraídos automáticamente**

A continuación, se representa la nube de puntos con el esqueleto de los caminos segmentados de manera manual:

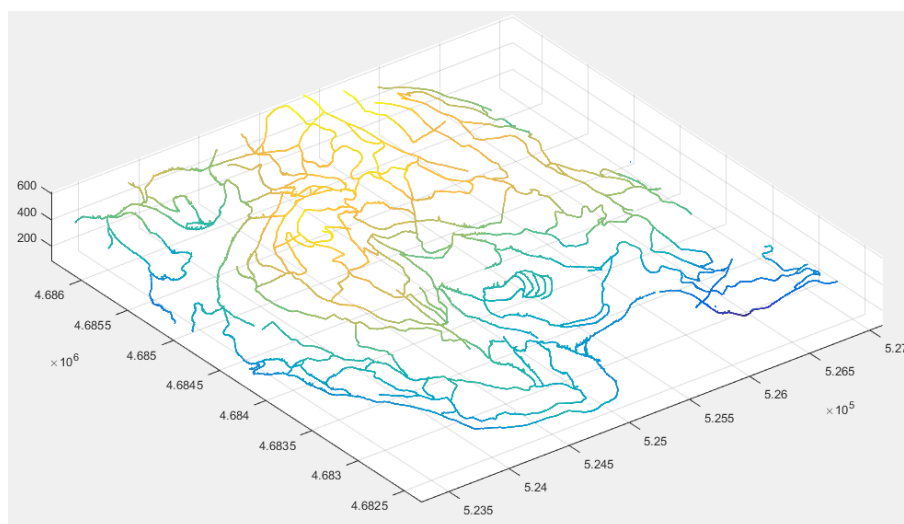


**Figura 4-6 Nube de puntos que representa los caminos segmentados manualmente**

Posteriormente para visualizar las alturas de forma más gráfica y como ayuda para el cálculo de pendientes, se procedió a cambiar los unos contenidos en la imagen binaria por sus respectivas alturas extraídas en el paso anterior. De forma que se obtiene una matriz en la que los píxeles de los caminos están marcados mediante la altura correspondiente a cada punto.

| Editor - ExtraccionEsqueletoLimpio.m |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |  |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| Variables - MatrizZRot               |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |  |
| MatrizZRot                           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |  |
| 4080x3856 double                     |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |  |
|                                      | 1567     | 1568     | 1569     | 1570     | 1571     | 1572     | 1573     | 1574     | 1575     | 1576     |  |
| 718                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 719                                  | 524.9397 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 720                                  | 0        | 525.1377 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.1197 |  |
| 721                                  | 0        | 525.2497 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.2031 | 0        |  |
| 722                                  | 0        | 0        | 525.4129 | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.3182 | 0        | 0        |  |
| 723                                  | 0        | 0        | 0        | 525.5312 | 0        | 0        | 0        | 525.4519 | 0        | 0        |  |
| 724                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.6359 | 525.6479 | 525.6294 | 0        | 0        | 0        |  |
| 725                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.7823 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 726                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 525.9106 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 727                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 526.1324 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 728                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 526.3868 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 729                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 526.6557 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 730                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 526.8059 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 731                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 526.9067 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 732                                  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 527.0169 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 733                                  | 0        | 0        | 0        | 527.0918 | 527.1086 | 527.1212 | 0        | 0        | 0        | 0        |  |
| 734                                  | 0        | 0        | 527.2917 | 0        | 0        | 0        | 527.2156 | 0        | 0        | 0        |  |
| 735                                  | 0        | 527.3365 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 527.2887 | 0        | 0        |  |
| 736                                  | 0        | 527.4593 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 527.4173 | 0        |  |
| 737                                  | 527.5363 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 527.6925 |  |

**Figura 4-7 Ejemplo cruce de caminos en la matriz con las coordenadas Z de cada píxel**

Un problema encontrado en esta sección fue que no todos los píxeles que estaban contenido en el camino tenían asociada una coordenada Z. Concretamente para la matriz de estudio existían 137 puntos que no contaban con la información de la altura en ese píxel. Para poder identificarlos se dio el valor de uno a esos píxeles y se procedió a realizar una media de los 3 x 3 píxeles de alrededor que no tuvieran valor de cero. El resultado de cada una de esas operaciones, fue el valor que se asignó a cada píxel de valor uno. Mediante este procedimiento se evita que existan puntos en el trazado que no contengan la coordenada Z debido a fallos en la asignación de las alturas a puntos.

Debido a que con la extracción de los caminos de manera automática no se pudo extraer la totalidad de los caminos, se decidió usar la matriz segmentada manualmente para continuar el proceso. Con estas coordenadas, se puede pasar al cálculo de las pendientes entre puntos contiguos, al cálculo de las distancias geométricas entre puntos y a la creación del grafo (Figura 4-8).

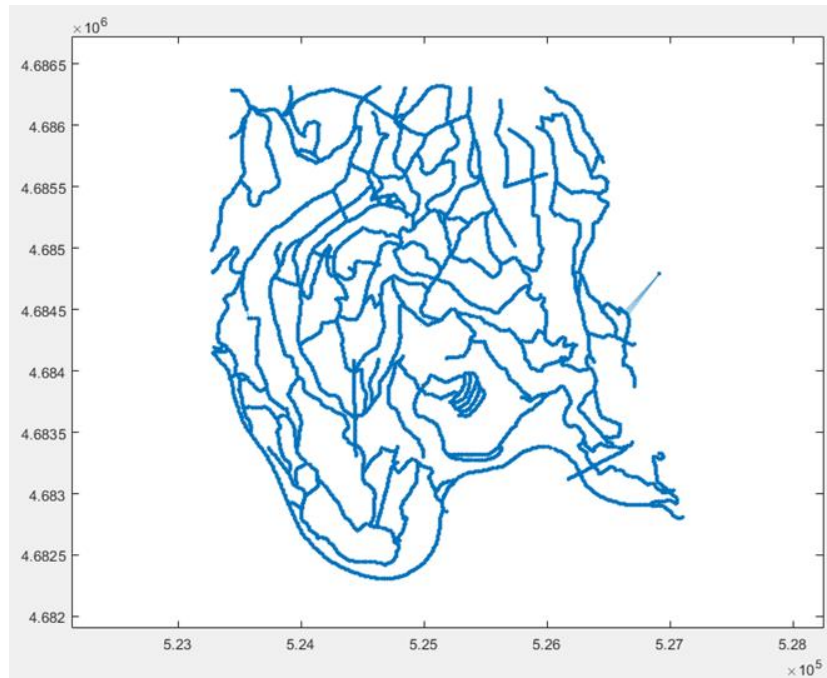


Figura 4-8 Visualización del grafo

## 4.2 Pruebas sobre el camino más corto

Se decidió simular el camino más corto usando el valor de la pendiente longitudinal máxima que pueden superar tres vehículos que actualmente posee la Infantería de Marina española. Estos son el URO VAMTAC ST5, el Vehículo de Combate Piraña IIIC en versión ambulancia y el Land Rover Defender.

El motivo por el que se eligieron estos vehículos es debido a que se pretende simular una situación de emergencia, en la que es necesaria la evacuación de una baja a un centro donde pueda ser tratada. Por ejemplo, si se estuviera realizando una patrulla en Afganistán a bordo de vehículos VAMTAC, donde un vehículo recibe el impacto de un lanzagranadas RPG-7 o un ataque con IED (*Improvised Explosive Device*) y la situación no permite la extracción de las bajas por medios aéreos, la evacuación se tendría que realizar mediante los propios vehículos de la patrulla. Este programa se podría llevar precargado en los vehículos, de manera que si la base más cercana al incidente no es la propia y se desconoce la ruta hasta ella, tan solo pulsando sobre su localización nos mostrará su ubicación, la ruta a seguir y la distancia por recorrer, todo ello de manera automática, ahorrando gran cantidad de tiempo.

Para todas las pruebas se parte de un mismo punto y se llega a otro punto también común, pero se varía la pendiente longitudinal máxima superable dependiendo de las características del vehículo. El punto de partida puede simularse como el lugar en el que la patrulla sufre un ataque y desde el cual debe evacuar una baja. El punto final puede simularse como la localización de la base avanzada (FOB) o el punto de toma de helicópteros (HLZ) más cercano, a los que se quiere evacuar dicha baja.

Para realizar la simulación, se seleccionaron los puntos mostrados en la Figura 4-9 y Figura 4-10.

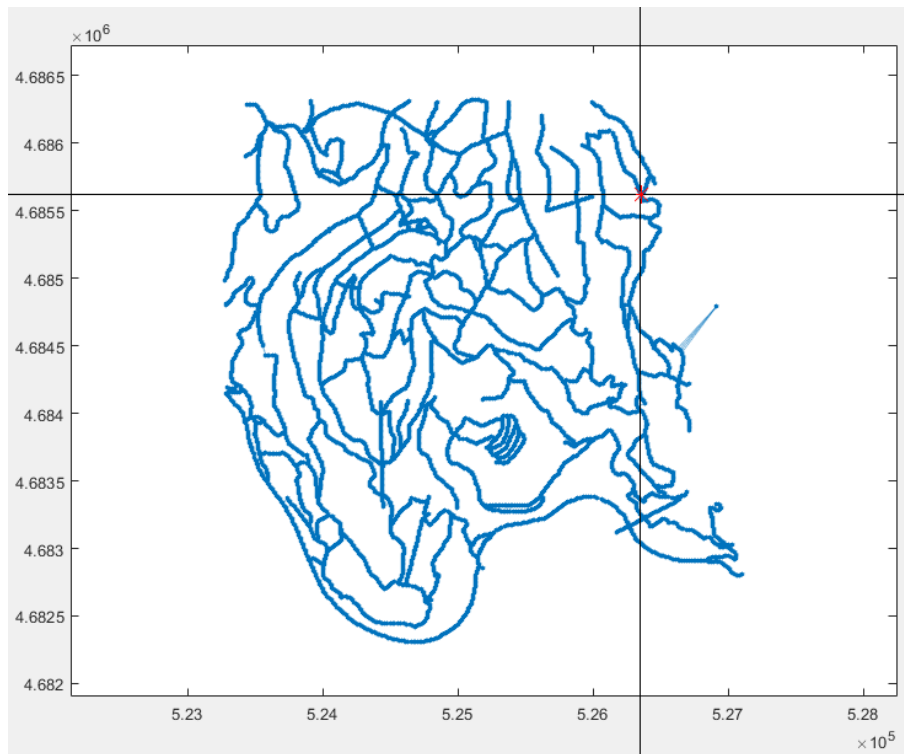


**Figura 4-9 Punto de partida**

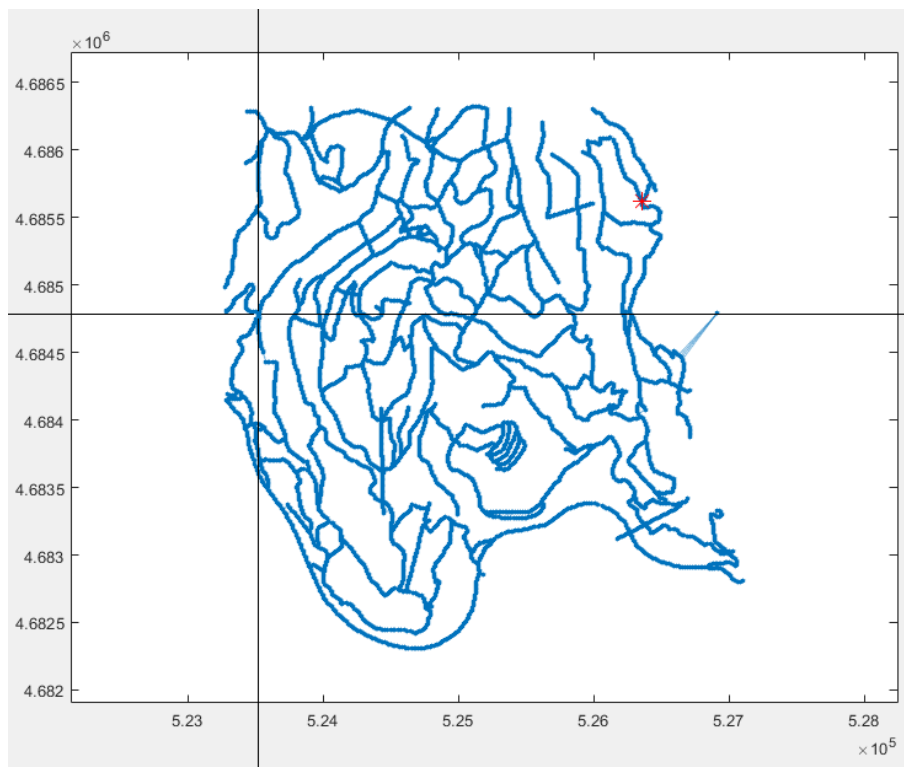


**Figura 4-10 Punto de llegada**

#### 4.2.1 URO VAMTAC ST5

El URO VAMTAC ST5 (Figura 4-11) es el vehículo de más reciente adquisición por parte de la Armada Española. Comenzaron a recibirse las primeras unidades en el año 2015 y se prevé adquirir alrededor de 250 para el Cuerpo de Infantería de Marina. La fabricación de estos vehículos corre a cargo de la empresa española Urovesa. Su planta de producción se encuentra en Santiago de Compostela, provincia de La Coruña.



**Figura 4-11 URO VAMTAC ST5 de IM [33]**

### **Características URO VAMTAC ST5**

|                                    |                                         |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Motor                              | Diésel biturbo con 6 cilindros en línea |
| Potencia                           | 272CV                                   |
| Propulsión                         | 4x4                                     |
| Cilindrada                         | 3200 cm <sup>3</sup>                    |
| Transmisión                        | Automática                              |
| Velocidad máxima                   | 110 km/h                                |
| Capacidad de vadeo sin preparación | 1,5 metros                              |
| Pendiente longitudinal máxima      | 80%                                     |
| Pendiente lateral máxima           | 40%                                     |

**Tabla 4-1 Características URO VAMTAC ST5 [34]**

Para la simulación de este vehículo se decidió subrayar el camino óptimo de color verde mediante el comando “highlight”. Se obtuvieron los siguientes resultados:

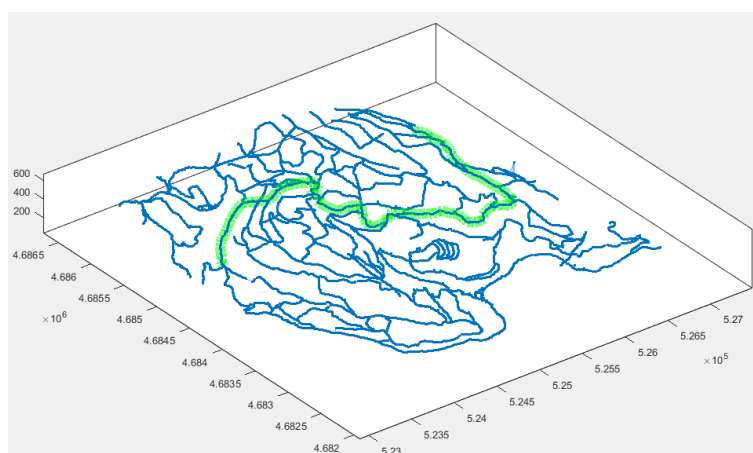


**Figura 4-12 Plot en 3D del resultado VAMTAC**

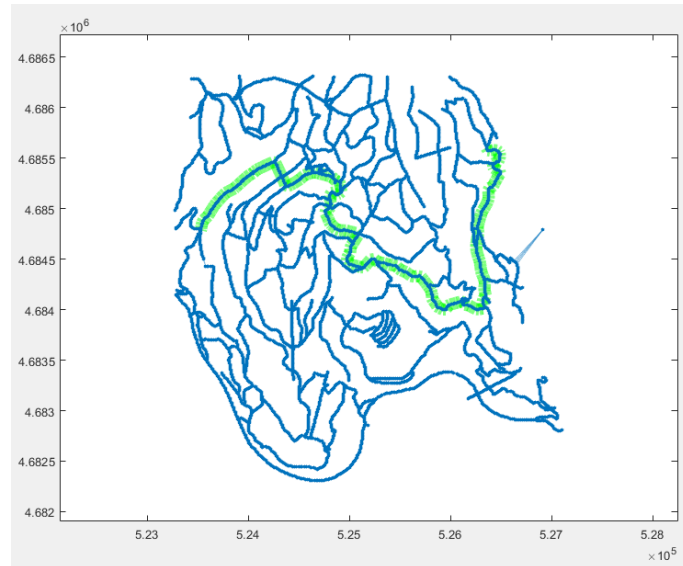


**Figura 4-13 Plot en 2D del resultado VAMTAC**

Distancia recorrida total por el URO VAMTAC ST5: 6.763,16 metros.

#### **4.2.2 Vehículo de Combate Piraña IIIC versión ambulancia**

Es un vehículo de combate de infantería. Diseñados y fabricados por la empresa suiza MOWAG (General Dynamics). Las primeras unidades se recibieron en el año 2003 y han participado en operaciones internacionales como Líbano, Haití y Bosnia-Herzegovina. Se recibieron distintas unidades: de combate de infantería, en versión de mando, en versión ambulancia (Figura 4-14), de recuperación, de zapadores y de reconocimiento con cañón de 30mm. Estos vehículos forman parte del Tercer Batallón de Desembarco Mecanizado y del Grupo de Movilidad Anfibia del Tercio de Armada.



**Figura 4-14 Piraña IIIC Ambulancia [35]**

### Características Piraña IIIC Ambulancia

|                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Motor                              | Turbo Diésel con 6 cilindros en línea |
| Potencia                           | 400 CV                                |
| Propulsión                         | 8x8                                   |
| Cilindrada                         | 8800 cm <sup>3</sup>                  |
| Transmisión                        | Automática                            |
| Velocidad máxima                   | 105 km/h                              |
| Capacidad de vadeo sin preparación | 1,5 metros                            |
| Pendiente longitudinal máxima      | 60%                                   |
| Pendiente lateral máxima           | 30%                                   |

**Tabla 4-2 Características Piraña IIIC Ambulancia [35]**

Para la simulación de este vehículo se decidió subrayar el camino óptimo de color rojo mediante el comando “highlight”. Se obtuvieron los siguientes resultados:

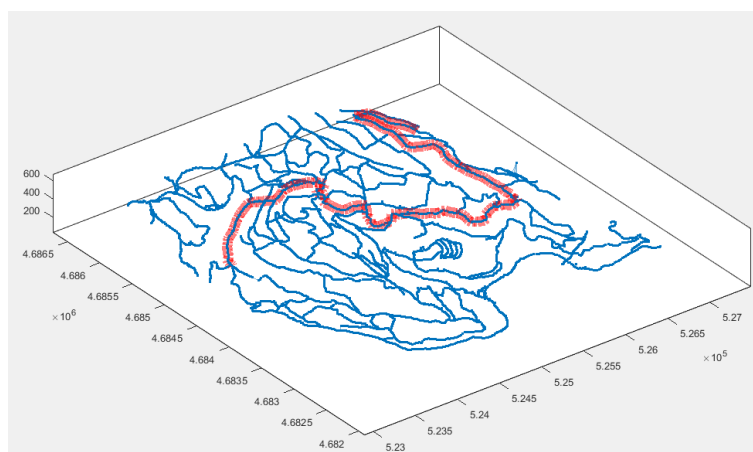


**Figura 4-15 Plot en 3D del resultado Piraña**

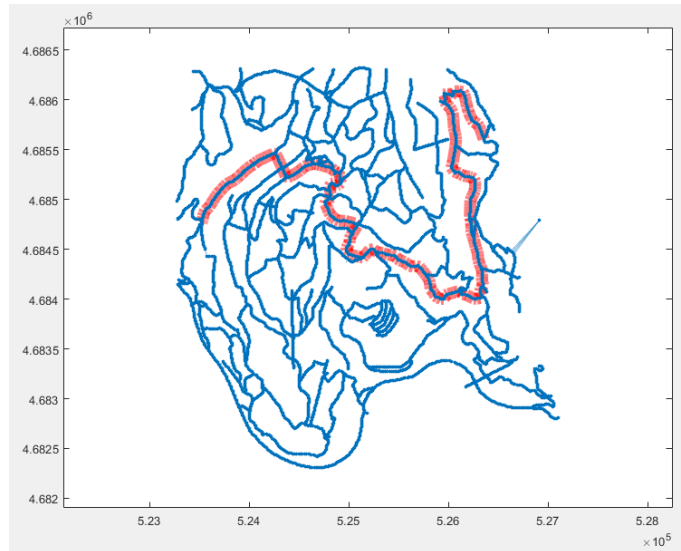


**Figura 4-16 Plot en 2D del resultado Piraña**

Distancia total recorrida por el Piraña IIIC Ambulancia: 7.846,33 metros.

#### *4.2.3 Land Rover Defender*

Vehículo ligero fabricado por la empresa británica Land Rover (Figura 4-17). Tiene capacidad para 8 personas. La Escuela Naval Militar cuenta con varios vehículos de este modelo. Se emplean fundamentalmente para transporte de personal y material ligero. Debido a su diseño son muy aptos para la conducción todoterreno.



**Figura 4-17 Land Rover Defender [35]**

### Características Land Rover Defender

|                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| Motor                              | TDI 4 cilindros en línea |
| Potencia                           | 130 CV                   |
| Propulsión                         | 4x4                      |
| Cilindrada                         | 300 cm <sup>3</sup>      |
| Transmisión                        | Manual                   |
| Velocidad máxima                   | 150 km/h                 |
| Capacidad de vadeo sin preparación | 1,5 metros               |
| Pendiente longitudinal máxima      | 45%                      |
| Pendiente lateral máxima           | 20%                      |

**Tabla 4-3 Características Land Rover Defender [35]**

Para la simulación de este vehículo se decidió subrayar el camino óptimo de color magenta mediante el comando “highlight”. Se obtuvieron los siguientes resultados:

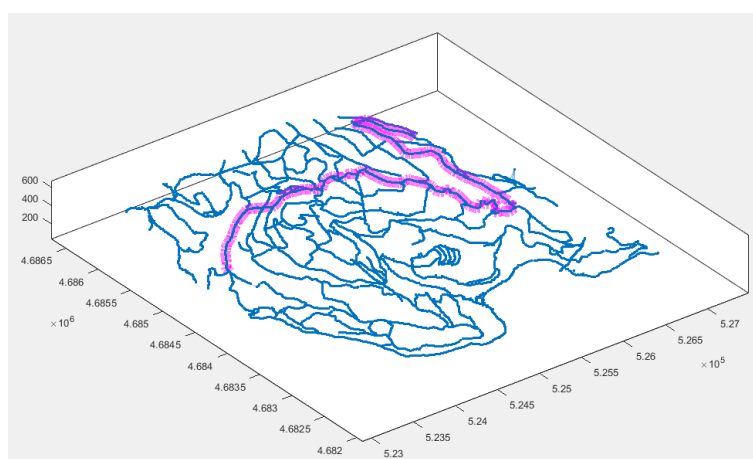


**Figura 4-18 Plot en 3D resultado Land Rover Defender**

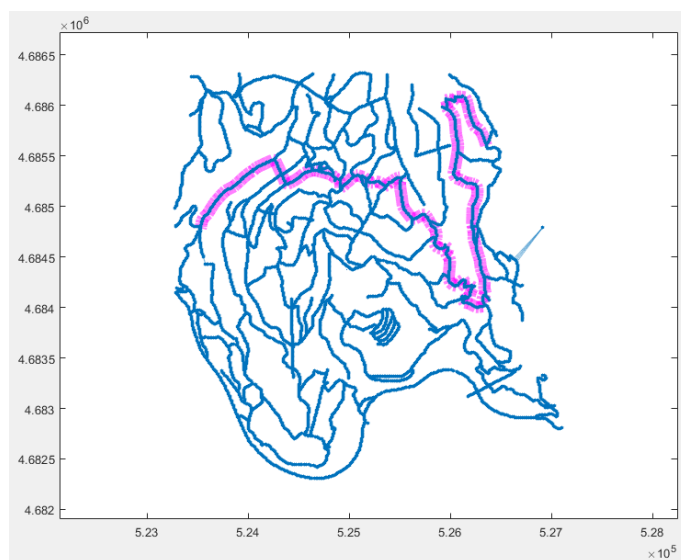


**Figura 4-19 Plot en 2D resultado Land Rover Defender**

Distancia total recorrida por el Land Rover Defender: 7.882,78 metros.

### 4.3 Comparación de los resultados

A continuación podemos visualizar las diferentes rutas trazadas por el programa. Todas parten y llegan a los mismos puntos, pero el programa toma distintas rutas en función de la pendiente máxima que puede superar cada vehículo.

#### 4.3.1 Comparación de distancias recorridas

La comparación de las distancias recorridas por cada vehículo es la siguiente:

| <b>Vehículo</b>        | <b>Distancia Recorrida</b> |
|------------------------|----------------------------|
| URO VAMTAC ST5         | 6.763,16 metros            |
| Piraña IIIC Ambulancia | 7.846,33 metros            |
| Land Rover Defender    | 7.882,78 metros            |

**Tabla 4-4 Comparativa distancia recorrida**

#### 4.3.2 Comparación de las rutas tomadas

Si analizamos las imágenes de las rutas trazadas por los vehículos, se pueden identificar tres rutas diferentes. Se van a dividir en tres tramos para su análisis:

##### 4.3.2.1 Primer tramo

La primera variación, la encontramos en la ruta seguida por el URO VAMTAC, que toma el camino que sale hacia el sur desde el punto inicial, mientras que las otras dos rutas seguidas por el Piraña y el Defender, toman el camino que sale hacia el norte desde el punto inicial.

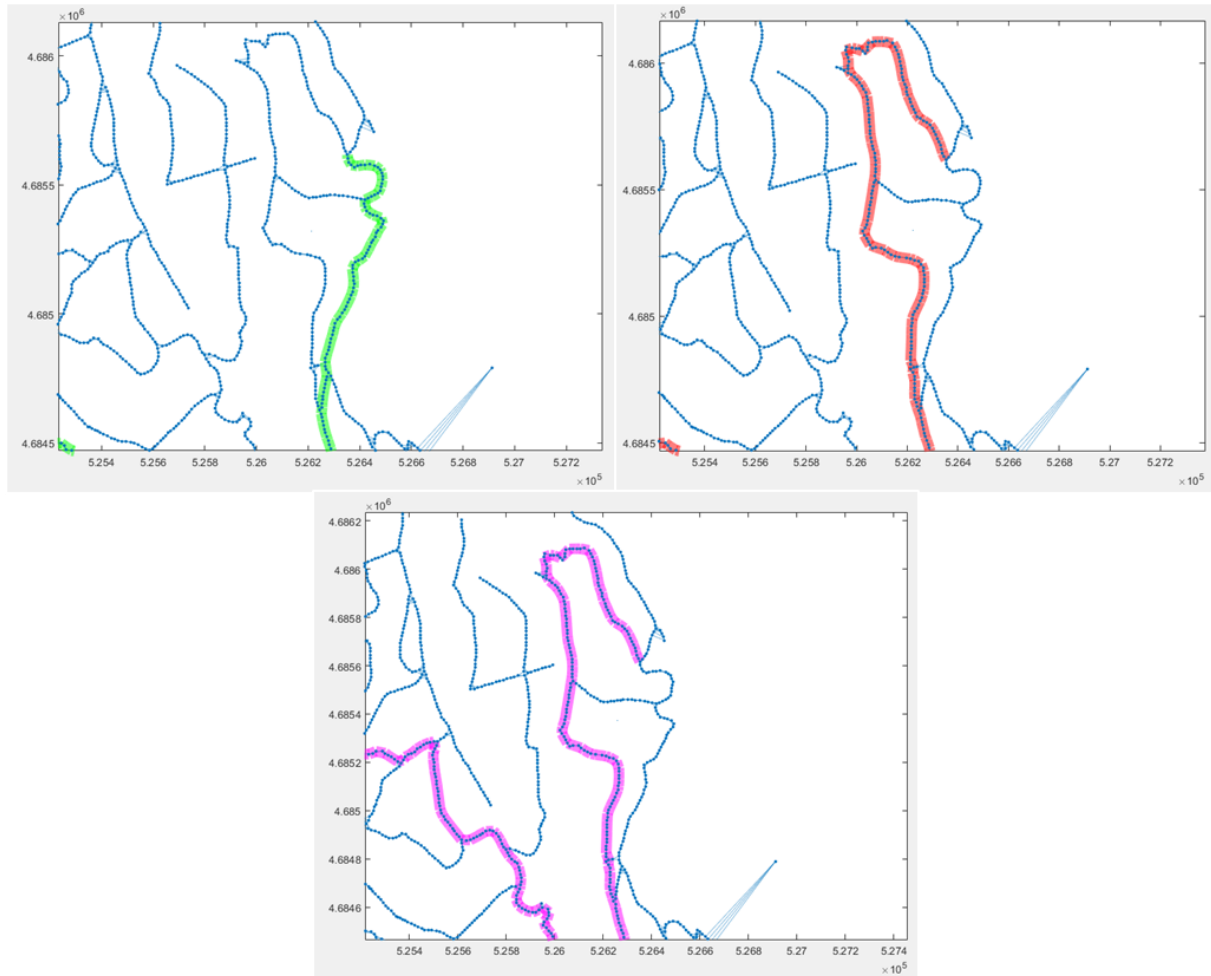


**Figura 4-20 Comparación primer tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta)**

Esto se debe a la existencia en ese tramo de alguna pendiente superior al 60%, que no podrán superar esos vehículos y el VAMTAC sí.

#### **4.3.2.2 Segundo tramo**

Si continuamos analizando las rutas, observamos también una divergencia entre la marcada por los dos primeros vehículos y la del Defender. El tramo central hasta el punto final es común para los primeros vehículos, en cambio el Defender toma un camino más al norte que el de los otros.

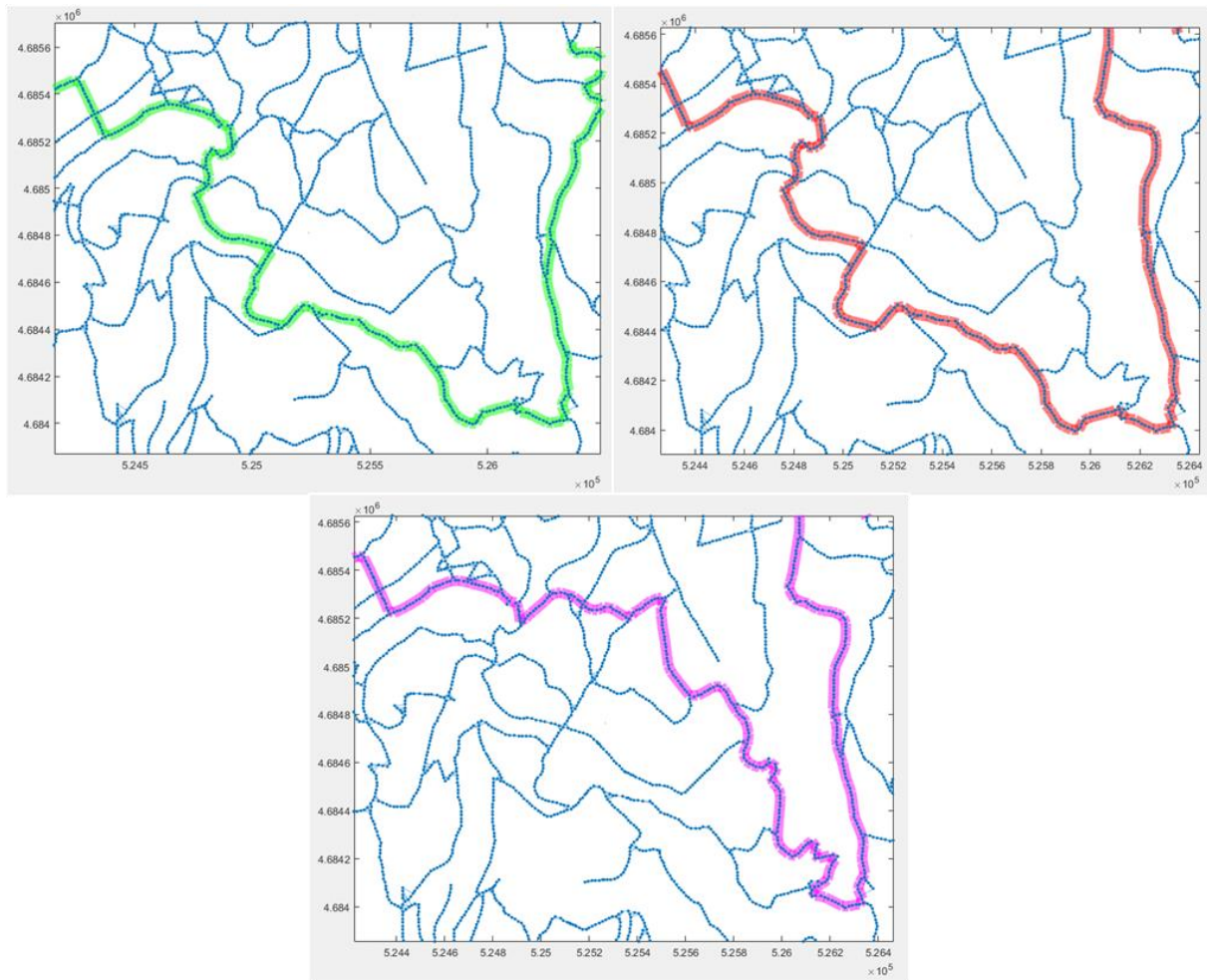


**Figura 4-21 Comparación segundo tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta)**

Esto se debe a que en la ruta seguida por los dos primeros vehículos existe algún tramo con pendiente mayor a 45% que no puede ser superada por el Defender.

#### 4.3.2.3 Tercer tramo

En este último tramo podemos observar que las tres rutas pasan por los mismos puntos hasta llegar al punto final. No hay variaciones importantes que reseñar.

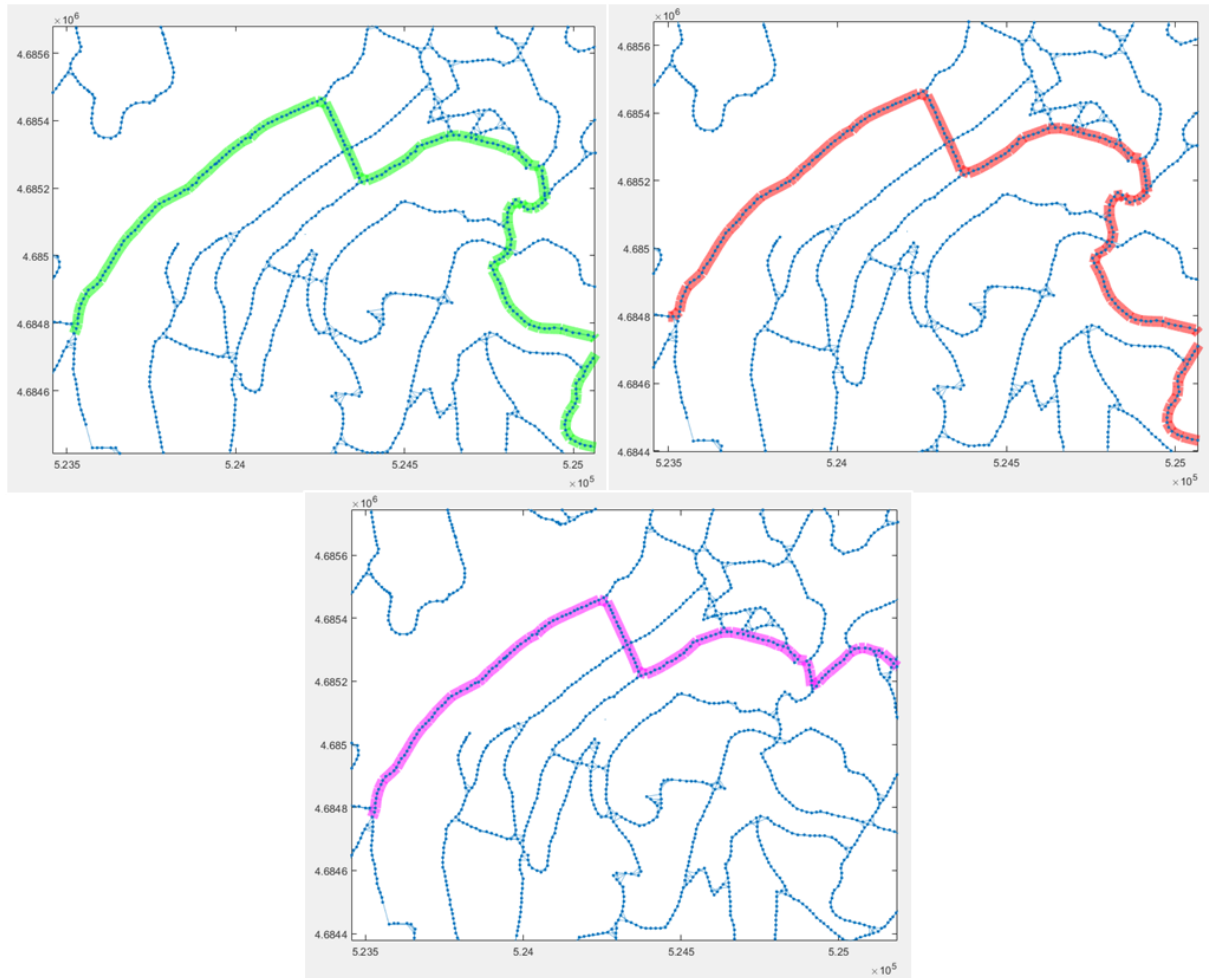


Figura 4-22 Comparación tercer tramo: URO (verde), Piraña (rojo) y Defender (magenta)

#### 4.4 Resultados con gvSIG

Para el análisis de la ruta haciendo uso del programa gvSIG, se escogió la ruta seguida por el Land Rover Defender. El criterio escogido para este estudio fue la masa forestal, para comprobar la ocultación (entendida como: situar los medios propios tras o bajo obstáculos naturales o artificiales existentes en el terreno para evitar su detección por la observación enemiga, suprimiendo los indicios de actividad [36]) de la que se dispone si se emplea esta ruta, así como las zonas en las que se podría balizar una zona de toma de helicópteros, debido a la existencia de zonas sin vegetación alta.

En primer lugar se carga el fichero con los puntos pertenecientes a la ruta óptima establecida por Matlab y se visualiza creando una capa nueva (Figura 4-23).

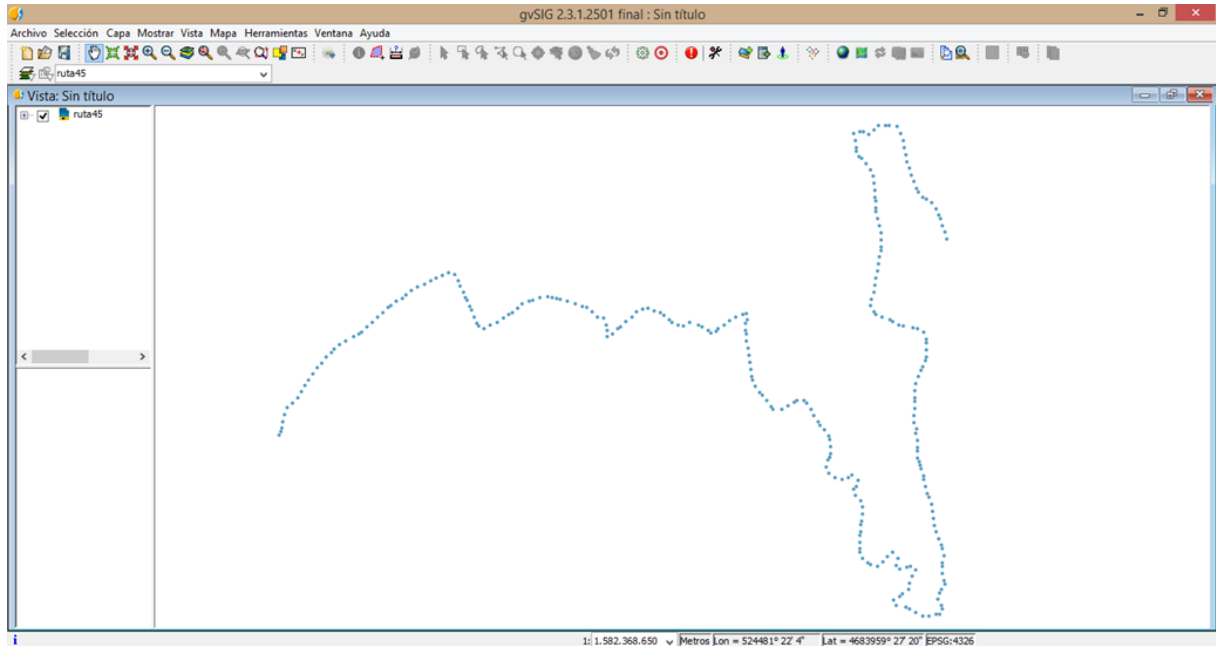


**Figura 4-23 Visualización de la capa de puntos pertenecientes al camino óptimo**

Posteriormente, se traza una polilínea que une todos estos puntos por orden. Para ello se utiliza la herramienta “polilínea” (Figura 4-24).

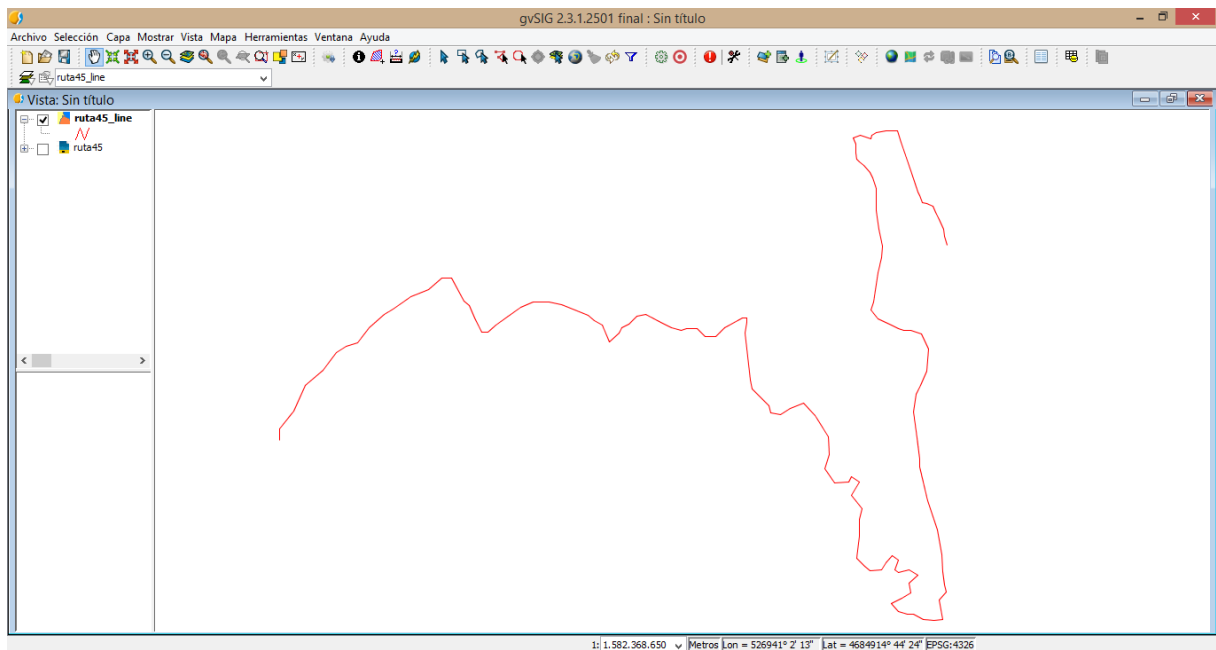
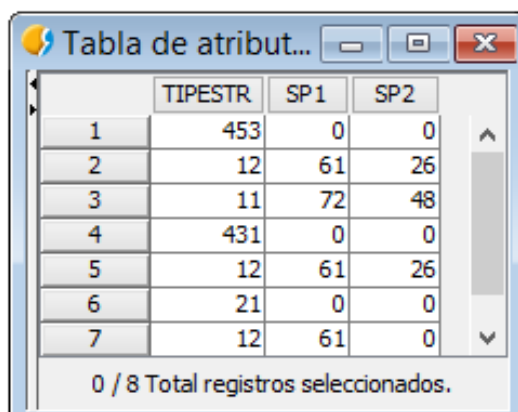


**Figura 4-24 Trazado de la polilínea a partir de los puntos de la ruta óptima**





|   | TIPESTR | SP1 | SP2 |
|---|---------|-----|-----|
| 1 | 453     | 0   | 0   |
| 2 | 12      | 61  | 26  |
| 3 | 11      | 72  | 48  |
| 4 | 431     | 0   | 0   |
| 5 | 12      | 61  | 26  |
| 6 | 21      | 0   | 0   |
| 7 | 12      | 61  | 0   |

0 / 8 Total registros seleccionados.

Figura 4-27 Captura de pantalla de la tabla de atributos

| Tipo de estrato |                      |
|-----------------|----------------------|
| 11              | Bosque               |
| 12              | Bosque de plantación |
| 21              | Arbustedos           |
| 431             | Zona quemada         |
| 453             | Suelo desnudo        |

#### Especies Predominantes (SP1)

|    |                     |
|----|---------------------|
| 61 | Eucaliptus globulus |
| 72 | Castanea Sativa     |

Tabla 4-5 Tabla explicativa de las especies predominantes

Tabla 4-6 Tabla explicativa del tipo de estrato

Analizando estos datos, podemos concluir que las zonas A, D y F son las más idóneas para planear en ellas puntos de toma de helicópteros, debido a que son aéreas de suelo desnudo (zona A), zona quemada (zona D) o arbustedos (zona F). En estas áreas es donde a priori un helicóptero puede tomar sin peligro de que las palas del rotor impacten contra las copas de los árboles. Es importante comentar que los datos fueron obtenidos en el año 2011, por lo que es preferible hacer un reconocimiento sobre el terreno en el caso de que la vegetación haya crecido o se haya replantado la zona. También hay que tener en cuenta que en estas áreas no se contará con ocultación al no existir árboles, por lo que se deberán extremar las medidas de seguridad durante los movimientos de día o realizar los desplazamientos durante la noche.

Las demás son zonas de bosque en las que predomina el eucalipto y el pino, por lo que se podrán realizar movimientos con ocultación desde tierra y aérea. Por contrapartida, no se podrán realizar evacuaciones médicas vía helicóptero en esas áreas. Esto no supone un gran contratiempo debido a que las zonas que si son aptas para establecer un punto de toma, se encuentran a poca distancia y son de fácil acceso.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

El proyecto se ha basado en el diseño de un programa que calcule las rutas óptimas entre dos puntos diferentes, además de que sea capaz de extraer las coordenadas XYZ de caminos, a partir de datos de fotogrametría y LiDAR aéreos descargados desde la página web del Instituto Geográfico Nacional.

Tras el estudio realizado, se puede concluir en primer lugar, que el filtrado de las imágenes usando los filtros gaussianos no son suficientes para una correcta extracción de los caminos. También comentar que usando solamente el criterio de color de los píxeles, es difícil hacer una extracción completa de las calzadas debido a la densa vegetación presente en la zona de estudio. Es necesario usar otro tipo de filtros o algún algoritmo capaz de seguir el trazado de los caminos, por ejemplo del tipo *Active Contours* o *Snakes*. Mediante estos algoritmos se agiliza la extracción de caminos, el resultado es mucho más preciso que aplicando filtros a las imágenes y se evitarían los falsos positivos en zonas aisladas que quedan fuera de las calzadas pero que por su color el programa las detecta como caminos.

En cuanto al algoritmo que calcula la ruta óptima, el resultado obtenido es bueno debido a que es capaz de calcular el mejor recorrido rápidamente y teniendo en cuenta el criterio restrictivo de la pendiente máxima superable por el vehículo. Es capaz de trazar diferentes rutas que parten y llegan a los mismos puntos, pero que recorren zonas diferentes dependiendo de la pendiente longitudinal máxima encontrada en cada tramo. También queda demostrado como se puede completar el estudio de las rutas óptimas introduciéndolas en gvSIG y analizar las características de interés para el usuario. Si se dispone de esta información actualizada, el estudio realizado es de gran ayuda para el planeamiento de los comandantes.

Es necesario remarcar que este programa permite realizar un estudio muy detallado del terreno a recorrer por una unidad militar en zona de operaciones. Con el uso de herramientas informáticas y bases de datos actualizadas, se consigue realizar un estudio del terreno mucho más eficaz que el que se puede realizar solo usando un mapa topográfico en papel, además del ahorro de tiempo que supone.

Por último comentar que aunque se disponga de estas herramientas, no se debe descuidar el adiestramiento con los métodos tradicionales (mapas en papel), para que cuando no se pueda emplear el equipo (fallo informático, falta de medios, agotamiento de las baterías, etc) sea posible continuar con la misión encomendada.

## 5.2 Líneas Futuras

La parte de extracción de los caminos por medio de fotografías aéreas, puede funcionar mejor en zonas en las que no exista mucha vegetación, como en Iraq, Afganistán o Líbano. Aunque también habrá que tener en cuenta que los filtros detectan los caminos mediante diferencia de color, por lo que en zonas desérticas donde la carretera tiene el mismo color que el entorno puede ser complicada su extracción de forma automática. También habrá que tener en cuenta que las rutas a realizar se deben haber reconocido previamente para evitar pasar por zonas minadas o donde se encuentre algún obstáculo que dificulte o impida la maniobra de los vehículos. Por esta razón, se podría hacer uso de la herramienta de Matlab *Image Segmenter*, para marcar de forma manual las rutas que son seguras y por las que se puede realizar la patrulla o la evacuación sin peligro de pisar minas.

El programa podría mejorarse para permitir marcar la posición GPS de los vehículos permanentemente, de forma que solo se tendría que elegir el punto de destino para calcular la ruta hasta él. A su vez, antes del comienzo de la patrulla, también se podrían precargar las posiciones de los centros médicos más cercanos a los que evacuar las bajas o HLZ's (*Helicopter Landing Zones*) preplaneadas a lo largo de la ruta donde un helicóptero para aeroevacuación de las bajas pueda tomar tierra.

Al igual que se introdujo la posibilidad de evitar una ruta por superar una determinada pendiente, se puede estudiar la posibilidad de evitar los caminos que no permiten el paso debido a la anchura de los vehículos. Para esta tarea es necesario contar con ortofotos y nubes LiDAR de gran calidad para poder determinar la anchura de las vías con la menor probabilidad de error. Se puede introducir como un factor excluyente en el proceso de búsqueda de la ruta óptima, el que los tramos que dispongan de menor anchura que el vehículo utilizado tomen el valor infinito.

También se podría implementar un cálculo aproximado de tiempo para completar la ruta, dependiendo de la pendiente total acumulada (positiva y negativa), del estado del firme y de las características del propio vehículo. Se podría emplear para ayudar al personal en la tarea de planear las evacuaciones de bajas.

Los datos empleados para establecer las rutas, se podrían obtener en la misma zona de operaciones mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV's). Sería necesario contar con un UAV que fuera capaz de obtener ortofotografías aéreas digitales y de realizar barridos LiDAR.

Por último comentar que las unidades artilleras (GAD del Tercio de Armada) en campaña deben realizar continuos cambios de asentamiento en función de la situación táctica y son muy vulnerables en sus desplazamientos. El disponer de esta herramienta, les permitiría planear de manera más eficaz sus itinerarios y posibles asentamientos de emergencia. Por ello, se propone integrar este programa en el sistema TALOS, previamente descrito en el capítulo de Estado del Arte, de forma que el planeamiento de los movimientos se realice de forma paralela al estudio de las posiciones de asentamiento. Cuando se requiera realizar un cambio de asentamiento, solamente con marcar la nueva posición en el SIG el programa calcularía la ruta óptima dependiendo de las limitaciones de las piezas (autopropulsadas o remolcadas). Con todo ello se contaría con un sistema de mando y control más eficiente capaz de hacer frente a imprevistos surgidos en el fragor del combate.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ejército de Tierra, PD3-309, 2011.
- [2] U.S. Army, Tactical Convoy Operations, 2003.
- [3] G. Dorado Martín, M. J. García García y J. M. Nicolás Zabala, «Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica,» Universidad Politécnica de Madrid, 2009. [En línea]. Available: <http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/fundamentos-de-los-sistemas-de-informacion-geografica/material-de-clase>. [Último acceso: 18 Marzo 2017].
- [4] A. Aguado Aranda y J. Jiménez de Vega, Optimización de rutas de transporte, Universidad Complutense de Madrid, 2013.
- [5] J. G. Miranda, «Apuntes Matemática Discreta, Universidad de Granada,» 2005. [En línea]. Available: <http://www.ugr.es/~jesusgm/Curso%202005-2006/Matematica%20Discreta/Grafos.pdf>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [6] Universidad de Pamplona, «Apuntes Teoría de Grafos,» [En línea]. Available: [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home\\_23/recursos/general/11072012/graf3.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_23/recursos/general/11072012/graf3.pdf). [Último acceso: 17 Marzo 2017].
- [7] M. Macho Stadler, Mapas, colores y números, Universidad del País Vasco, 2006.
- [8] J. Yordá, El problema del cartero chino, UVigo, USC, UDC, 2015.
- [9] M. Goicoechea Castaño y M. I. Goicoechea Castaño, Sistemas de Información Geográfica aplicados a residuos sólidos urbanos, Universidade de Vigo, 2005.
- [10] A. Aguado Aranda y J. Jiménez de la Vega, Optimización de rutas de transporte, Universidad Complutense de Madrid, 2013.
- [11] P. Jiménez Bermejo, Planificador de rutas de metro con aprendizaje, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2004.
- [12] Metro de Madrid, «Metro de Madrid,» [En línea]. Available: <http://www.planometromadrid.org/>. [Último acceso: 16 Marzo 2017].

- [13] P. Queraltó Ros, R. M. Biere Arenas y F. Valls Dalmau, Herramienta de cálculo de rutas óptimas según parámetros de accesibilidad física en itinerarios urbanos., Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [14] I. G. Nacional, «Instituto Geográfico Nacional,» [En línea]. Available: <https://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>. [Último acceso: 31 Enero 2017].
- [15] M. S. Carracelas, Apuntes de la asignatura Topografía y Contrucción, Marín: Centro Universitario de la Defensa, 2017.
- [16] J. S. Sánchez, «Localización de zonas para la instalación del puesto de mando de la BRIMAR haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2016.
- [17] J. Marí Pastor, «Optimización de la Localización y Recogida de Residuos Sólidos Urbanos (RSU),» Universidad Complutense de Madrid, 2004.
- [18] J. Gutierrez Palacios, «Sistema de Información Geográfico Militar,» Escuela Militar de Chile, 2004.
- [19] I. G. Nacional, «Plan Nacional de Ortofotografía Aérea,» [En línea]. Available: <http://pnoa.ign.es/presentacion-y-objetivo>. [Último acceso: 31 Enero 2017].
- [20] B. Riveiro y J. Mills, «CEG3706 Photogrammetry and Laser Scanning I, Lecture 14-15: Laser scanning background, theory and applications,» 2006.
- [21] Air Drone View, «<https://airdroneview.com>,» 2015. [En línea]. Available: <https://airdroneview.com/2014/07/04/historia-de-la-fotografia-aerea/>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [22] Google Maps, «Google Maps,» Alphabet Inc., [En línea]. Available: <https://www.google.es/maps>. [Último acceso: 16 Marzo 2017].
- [23] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com>. [Último acceso: 31 Enero 2017].
- [24] R. L. M. Systems, «RIEGL Laser Measurement Systems,» [En línea]. Available: <http://www.riegl.com/>. [Último acceso: 12 Febrero 2017].
- [25] g. Asociación, «gvSIG,» gvSIG Asociación, [En línea]. Available: <http://www.gvsig.com/es>. [Último acceso: 12 Febrero 2017].
- [26] G. D. Castro, «Evaluación no destructiva mediante GPR del relleno de la explanada para el análisis de las zonas de mayor afección,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2015.
- [27] Instituto Geográfico Nacional, «Iberpix 4,» [En línea]. Available: <http://www.ign.es/iberpix2/visor/>. [Último acceso: 20 Marzo 2017].
- [28] Instituto Geográfico Nacional, «Instituto Geográfico Nacional,» Ministerio de Fomento de España, [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es>. [Último acceso: 26 Febrero 2017].
- [29] Instituto Geográfico Nacional, «Tabla de metadatos asociada al MTN50 y a la hoja 0223,» IGN, 2014.

- [30] U. d. Murcia, «Universidad de Murcia,» [En línea]. Available: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet>. [Último acceso: 13 Febrero 2017].
- [31] Universidad de Jaén, «Reducción del ruido en una imagen digital,» Universidad de Jaén, 2006.
- [32] G. S. Torrubia y V. L. Terrazas, «Algoritmo de Dijkstra. Un tutorial interactivo,» de *VII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática*, Madrid, 2012.
- [33] Armada Española, «Facebook,» Facebook, [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/armadaesp/>. [Último acceso: 2 Marzo 2017].
- [34] Ejército de Tierra, Manual de operador y mantenimiento de primer escalón vehículo URO VAMTAC ST5, Madrid: Ejército de Tierra, 2015.
- [35] Armada Española, «Armada Española,» Armada Española, [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es>. [Último acceso: 4 Marzo 2017].
- [36] Junta Táctica de IM, Técnicas Individuales de Combate RIM 06-006, Comandancia General de la Infantería de Marina, 2009.
- [37] I. Puente, J. Sande, H. González-Jorge, E. Peña-González, E. Maciñeira, J. Martínez-Sánchez y P. Arias, «Novel image analysis approach to the terrestrial LiDAR monitoring of damage in rubble mound breakwaters,» de *Ocean Engineering*, Elsevier, 2014.