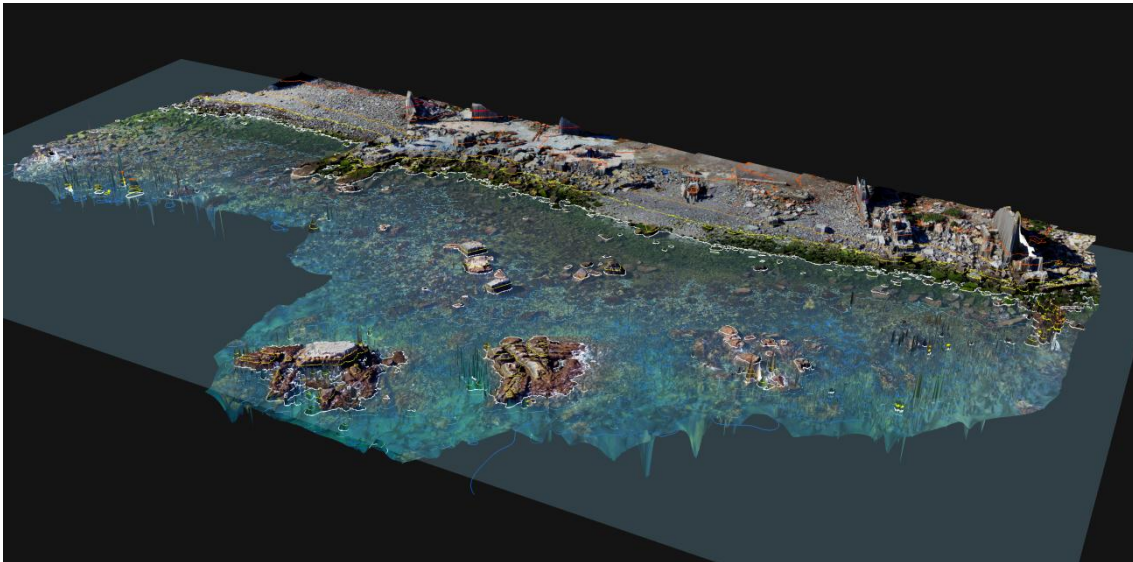


INFORME TÉCNICO

TEST DE LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO PARA LA RESTITUCIÓN TOPOBATIMÉTRICA DE LA ZONA DE ROMPIENTE ZONA DE PUNTA GARCÍA, BAHÍA DE ALGECIRAS



Grupo de Oceanografía Física – Universidad de Málaga

Abril 2018

1. Introducción

La fotogrametría es la disciplina que pretende obtener la forma, dimensión y posición de un objeto en el espacio, a partir de una serie de fotografías del mismo. La aerofotogrametría es la aplicación de esa disciplina a imágenes aéreas obtenidas mediante aeronaves tripuladas o no tripuladas. El notable desarrollo en los últimos años de la tecnología ligada al uso de aeronaves no tripuladas (drones), y el importante abaratamiento de los precios de estos equipos, ha permitido una cierta popularización de la aerofotogrametría, que ha alcanzado sectores no directamente relacionados con las ciencias geodésicas. Uno de los efectos de esta popularización es el consecuente incremento de aplicaciones directas o indirectas de esta disciplina (antes inimaginables) a otros campos científicos.

En este experimento piloto, el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA) ha querido evaluar el potencial de la aerofotogrametría de precisión con aeronaves no tripuladas para el levantamiento topo-batimétrico de la zona de rompiente, donde los métodos convencionales de sondaje no pueden aplicarse. La idea subyacente es que, en condiciones de suficiente transparencia del agua, sería viable la captación de imágenes del fondo del mar en la franja costera más somera, lo que permitiría obtener un modelo digital del terreno de la zona de rompiente, incluyendo altitudes positiva (zona terrestre emergida) y negativas (zona marina sumergida).

2. Procedimiento

La realización de un levantamiento aerofotogramétrico consta de varias fases: 1) planificación y ejecución del vuelo, 2) procesado fotogramétrico de las imágenes y 3) análisis de los resultados.

El equipo hardware empleado y el software utilizado para este experimento ha sido:

Hardware

- Dron DJI Phantom 4
- Tablet NVIDIA Shield K
- Portátil lenovo

Software

- Pix4DCapture para la planificación y ejecución del vuelo
- Agisoft Photoscan para el procesado fotogramétrico
- ArcGIS para el post-procesado del modelo digital del terreno y su visualización

2.1. Planificación del vuelo

La zona elegida para el experimento piloto es una antigua estación ballenera ubicada en la costa norte de Punta García, en el margen sudoccidental de la Bahía de Algeciras (Figura 1).

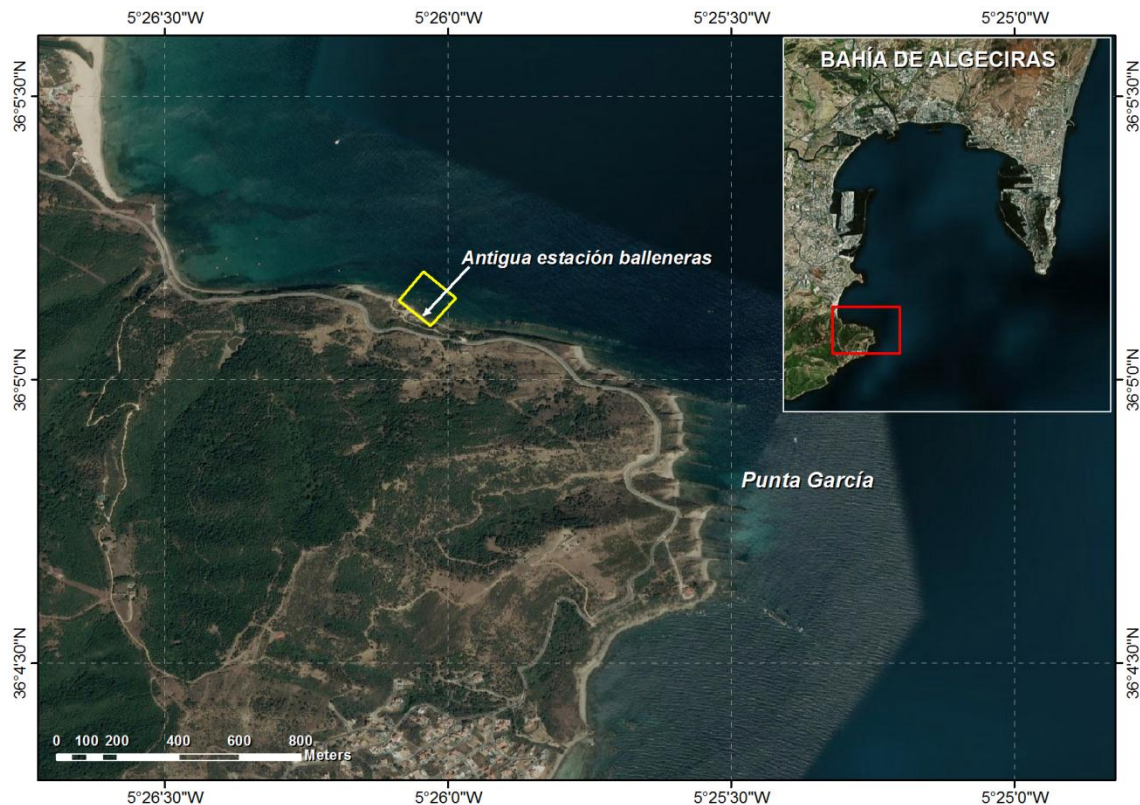


Figura 1 – Mapa de la zona de estudio. El polígono amarillo indica el área seleccionada para el levantamiento aerofotométrico.

En esta zona, la buena transparencia del agua y la presencia de pequeños acantilados que protegen de los vientos de Poniente proporcionan condiciones generalmente buenas para la realización del vuelo y la captación de imágenes. No obstante es imprescindible escoger condiciones específicas de viento e iluminación óptimas (calma y cielo despejado). Este último requisito es especialmente importante para la captación de imágenes del fondo del mar, ya que es necesaria mucha luz para poder penetrar las capas de agua e iluminar correctamente el fondo. Paradójicamente, estas condiciones no son las óptimas para un levantamiento topográfico de la zona emergida porque generan sombras duras que dificultan el tratamiento de las imágenes.

Para la planificación del vuelo se ha definido un polígono de 100x90 m orientado paralelamente a la costa (Figura 2), imponiendo un solape transversal (frontal) de las imágenes del 85% (correspondiente a un solape transversal del 77.5%) y una altura de vuelo de 15 m. El resultado es un footprint (área cubierta por cada fotografía) de 26x19 m que da una resolución a nivel del suelo de 7 mm aproximadamente (distancia entre dos píxeles contiguos).

El vuelo se ha ejecutado en la mañana del día 21 de marzo del 2018, en condiciones de viento débil y cielo completamente despejado. A pesar de que para un levantamiento fotogramétrico estándar es preferible una iluminación más bien difusa (cielo velado) para reducir la dureza de las sombras y los contrastes, se ha preferido ejecutar el vuelo un día de cielo claro para maximizar la penetración de la luz en el agua.

Se han tomado un total de 229 imágenes dispuestas en 12 filas paralelas a la costa de 16 imágenes cada una, a las que hay que añadir las de los giros en los extremos de cada calle. La duración total del vuelo ha sido de 8 minutos aproximadamente.

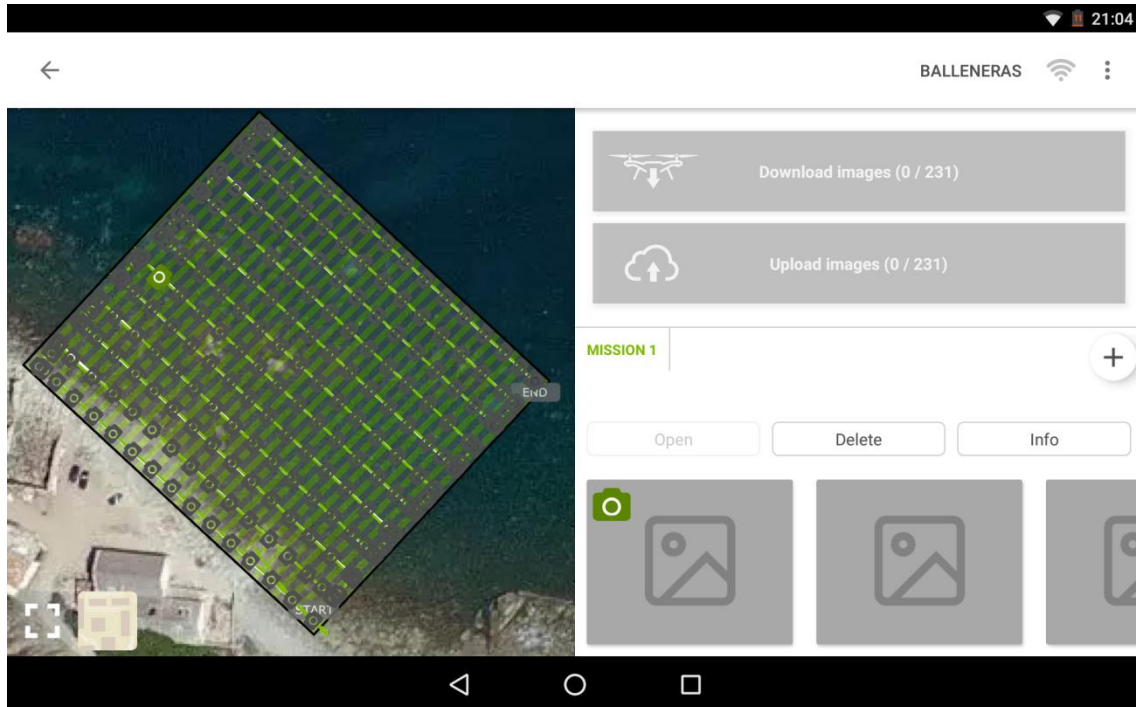


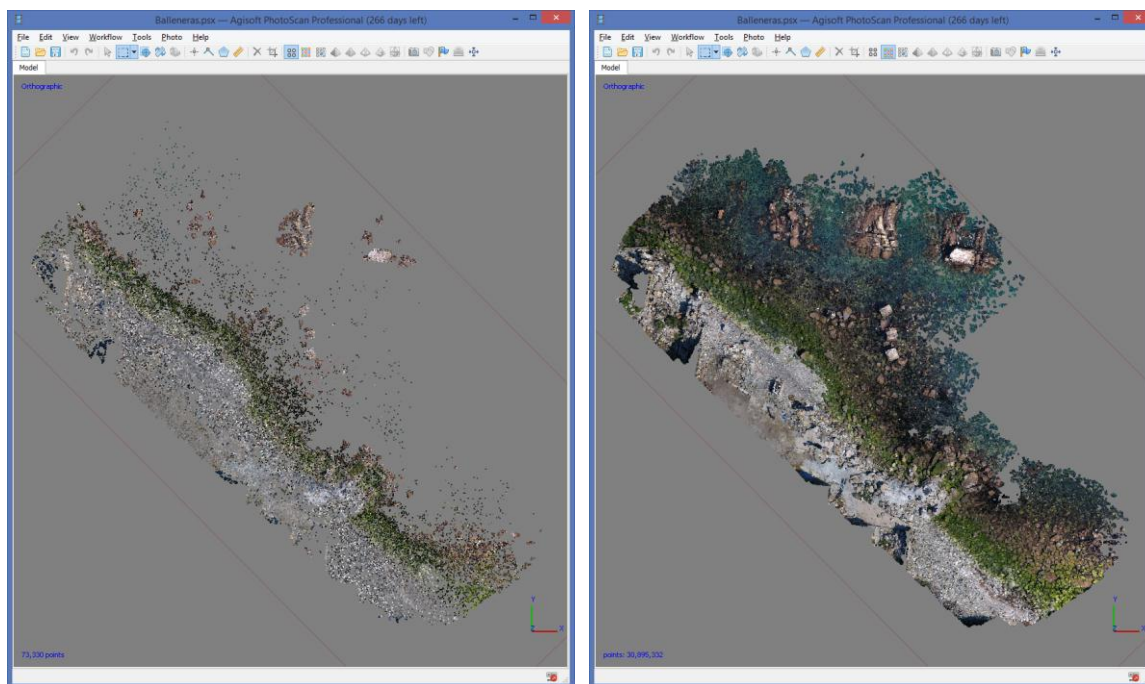
Figura 2 – Plan de vuelo ejecutado con el software Pix4DCapture. Se pueden apreciar el polígono de vuelo y las posiciones de las fotografías realizadas durante el vuelo.

2.2. Procesado fotogramétrico

Igual que otros programas de procesamiento fotogramétrico, el funcionamiento del software Agisoft Photoscan, empleado en este caso, prevé una serie de pasos supervisados por el usuario:

1. Alineación de las imágenes. En este proceso se escogen de forma automática un número alto de píxeles target y se aplican las transformaciones geométricas necesarias para estimar sus coordenadas tridimensionales en el espacio de trabajo. Cada punto debe ser identificado en 2 imágenes al menos (puntos homólogos). El resultado de este paso es una nube de puntos 3D (con su correspondiente terna de color RGB) que define la base del modelo del terreno. En este proyecto se han generado algo más de 73.000 puntos.
2. Densificación de puntos. Basándose en las coordenadas de los puntos definidos en el paso anterior, en éste se estiman las coordenadas de un número mucho mayor de puntos (normalmente unos 2 o 3 órdenes de magnitud más) que van a formar la nube de puntos finales a partir de los cuales se determinan los diferentes modelos topográficos. En este proyecto se han generado unos 30 millones de puntos.

La Figura 3 muestra las dos nubes de puntos (con sus respectivos valores RGB) generadas en el proceso de alineación de imágenes (izquierda) y de densificación de la nube de puntos base (derecha).



3. Figura 3 – Nube de puntos base (izquierda) y densificada (derecha).

El paso siguiente en un procesado fotogramétrico estándar es la generación de la malla de triángulos (mesh) que constituye el modelo digital de superficie (DSM), basado en los puntos de la nube densificada. Cada terna de puntos convenientemente posicionados en el espacio constituye un triángulo, de manera que en las mismas coordenadas [X,Y] puedan coexistir varios valores de Z. El modelo digital de superficie se emplea para definir objetos con formas complejas, como árboles, farolas, antenas, que sobresalen del terreno.

En este proyecto no interesa (y no procede) construir un modelo digital de superficie sino un modelo digital del terreno (DTM) que asume un solo valor de Z para cada par de coordenadas [X,Y]. Este tipo de modelo se aplica típicamente para la representación de la topografía de la zona analizada y ciertamente sirve para obtener la batimetría de la zona sumergida. El procesado sigue por tanto con los siguientes pasos:

3. Generación del modelo digital del terreno. Al igual que la malla de triángulos, este modelo también se genera a partir de la nube de puntos densificada y se extrae con una resolución generalmente similar a la de las propias fotografías originales. En este caso se ha generado un DTM de unas 12.000x12.000 celdas, con una resolución de 1.3 centímetros aproximadamente.
4. Generación del ortomosaico. El ortomosaico es el resultado de la fusión de las imágenes proyectadas en el plano XY, sin que haya discontinuidad en las fronteras entre dos imágenes consecutivas. Su resolución es del mismo orden que la de las imágenes originales. En este caso se ha generado un ortomosaico de unas 18.000x18.000 celdas, con una resolución de unos 6 mm aproximadamente.

En cada uno de los pasos descritos, la intervención del usuario es necesaria para analizar los productos intermedios y actuar con posibles retoques y sub-muestreos de las imágenes, filtros de suavizado, interpolaciones, etc. Estos detalles menores del procesado no se recogen en este informe.

3. Análisis de resultados

De las 229 imágenes disponibles, 119 (poco más de la mitad) se han podido alinear correctamente y han servido para generar la nube de puntos de base. Dos problemas han contribuido a que el algoritmo no haya sido capaz de acoplar ciertas imágenes para identificar píxeles homólogos: la transparencia del agua, inferior a la esperada, y los reflejos del sol, generados tanto en la superficie como debajo de ella.



Figura 4 – Una de las fotografías tomadas en la parte más profunda de la zona investigada.

La Figura 4 muestra un ejemplo de ambos problemas. En ella se observa que las estructuras más profundas apenas son visibles, debido a la escasa transparencia del agua y, posiblemente, estén deformadas por efecto del oleaje. También se aprecian claramente los reflejos del sol en la superficie del agua, presentes en imágenes tomadas desde una altura y con una orientación desfavorable. También se pueden ver estelas de dispersión de la luz en el interior de la columna de agua ocasionadas por la presencia de partículas suspendidas. Todo esto contribuye a que cualquier forma presente en el fondo del mar sea poco reconocible en las imágenes y, por tanto, difícilmente reconstruida durante el procesado fotogramétrico.

A pesar de estas limitaciones, el resultado del levantamiento ha sido muy satisfactorio. El área emergida y parte de la zona sumergida han podido ser reconstruidas de forma exitosa y el modelo digital del terreno obtenido muestra valores coherentes de altitud positiva en la zona emergida y profundidad negativa en la zona sumergida.

La Figura 5 muestra el modelo digital del terreno elaborado a partir de la nube de puntos densificada. Se han obtenido valores de altitud hasta 2 m y de batimetría hasta -1.5 m. Pese a no tener una referencia comparativa absoluta, precisamente por la imposibilidad de realizar un levantamiento batimétrico convencional en una zona tan somera, las líneas de contorno son muy coherente con lo esperado: presentan una elevada variabilidad debida a la presencia de numerosas piedras de pequeño tamaño y definen correctamente los límites de las estructuras semi-sumergidas más grandes.

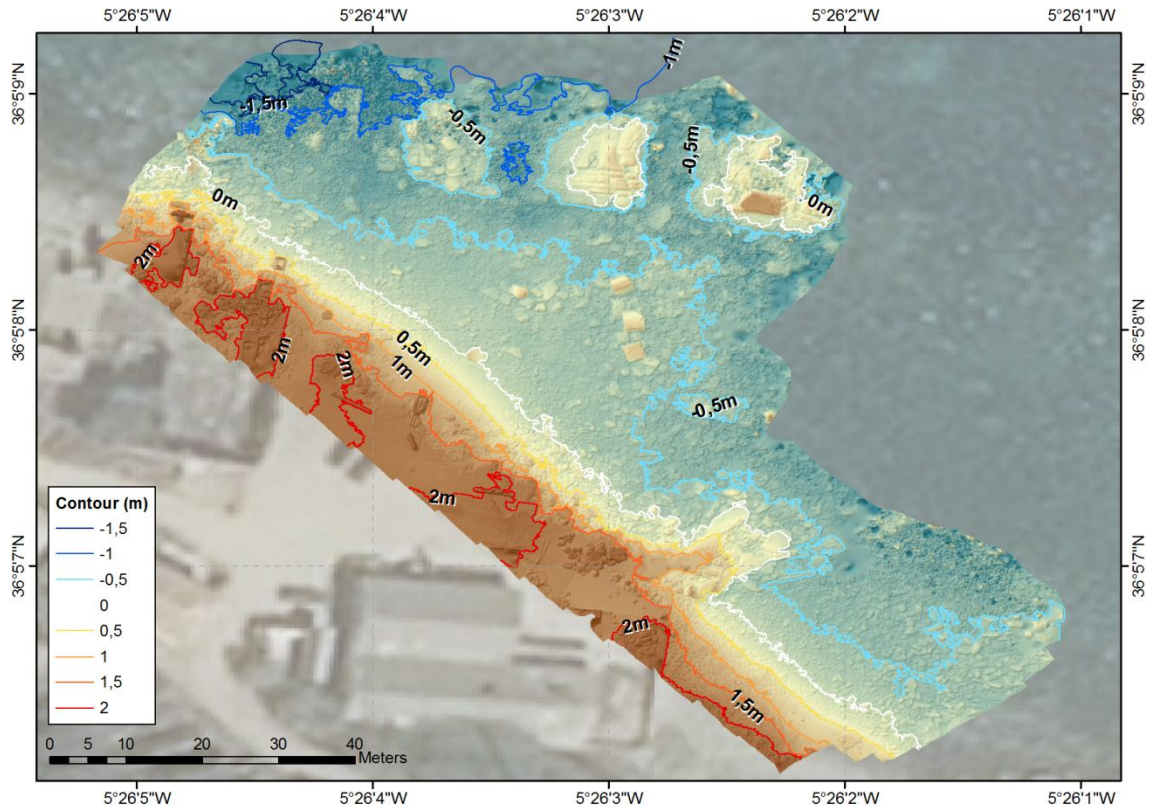


Figura 5 – Modelo digital del terreno (DTM) y sus correspondientes curvas de nivel con intervalos de 0.5 m.

La superposición de las líneas de contorno con el ortomosaico confirma la elevada precisión del modelo digital del terreno. En particular se puede observar como el contorno de 0 m coincide muy bien con el comienzo de las franjas de piedras enverdeadas por las algas, indicadores de la ubicación del límite de la parte sumergida.

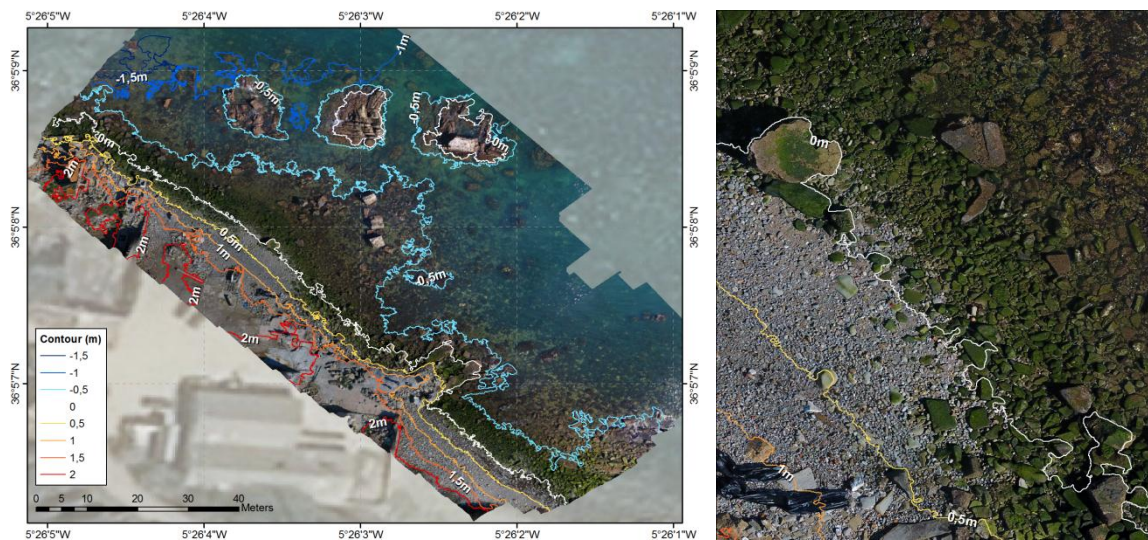


Figura 6 – Ortomosaico de la zona analizada (izquierda) y detalle de la línea de contorno 0 m (derecha).

3.1. Posibles mejoras

Este ejercicio, que es solamente un primer test de viabilidad de la obtención de mapas batimétricos en zonas muy someras con técnicas aerofotogramétricas, ha proporcionado resultados muy satisfactorios. Sin embargo, la experiencia ha evidenciado la importancia de ciertos factores que afectan negativamente al éxito global del proceso, y que tienen fácil solución incluyendo material de bajo coste y haciendo una planificación cuidadosa. Entre ellos, como se ha mencionado anteriormente, están los reflejos del sol tanto en superficie como debajo de ella, debido a la materia en suspensión, que han causado pérdidas de información en algunas zonas del dominio estudiado. Las estelas de dispersión sub-superficiales han empeorado la calidad de algunas imágenes y han causado el fallo de cierto porcentaje de puntos homólogos en la zona sumergida.

La solución de ambos problemas es la incorporación de un filtro polarizado a la lente de la cámara del dron. El polarizador es capaz de filtrar la mayor parte de los reflejos superficiales y elimina casi toda la dispersión sub-superficial debida a la presencia de partículas en suspensión. El aspecto negativo es que el filtro va a disminuir notablemente la cantidad de luz que llega al sensor. Sin embargo, en un día despejado la luminosidad no es un factor limitante y su pérdida se puede compensar fácilmente incrementando los tiempos de exposición de la cámara.

Otro factor limitante en un levantamiento de tan alta resolución como el que se ha llevado a cabo es la precisión del posicionamiento GPS del dron. Si bien las coordenadas horizontales de la aeronave se pueden determinar con precisión centimétrica, la altitud, factor determinante en un trabajo de este tipo, tiene incertidumbre mucho mayor. El modelo de dron DJI Phantom 4 en particular es conocido por presentar importantes sesgos en la determinación de la altitud por GPS. Por ello, es frecuente que su coordenada vertical se obtenga conociendo la altitud del punto de despegue y sumando a ella la altura de vuelo que se determina mediante el barómetro con el que la aeronave está equipada.

Este proceso de corrección post-vuelo se puede hacer mucho más preciso usando puntos de referencia en el suelo cuyas coordenadas tridimensionales se hayan determinado a priori con técnicas topográficas de alta precisión. Los puntos se evidencian con marcas fácilmente reconocibles en las imágenes aéreas y sus posiciones sirven de marco de referencia durante el procesado fotogramétrico para corregir el conjunto de puntos homólogos, obteniendo de esta forma un modelo digital del terreno mucho más preciso.

Productos

Algunos productos finales de este experimento son:

- Imagen de alta resolución del modelo digital del terreno (png): [DTM_HR.png](#)
- Imagen de alta resolución del ortomosaico (png): [Ortomosaico_HR.png](#)
- Imagen 3D de alta resolución del ortomosaico combinado con el modelo digital del terreno (png): [Orto_DTM_3D.png](#)
- Fichero KMZ del ortomosaico (es necesario tener instalado Google Earth): [Ortomosaico.kmz](#)