



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

2021/2022

PROCEDIMIENTOS DE PLANEAMIENTO, PROCESADO
E INCORPORACIÓN DE DATOS OBTENIDOS
MEDIANTE EQUIPOS USV Y RPAS A LA CADENA DE
PRODUCCIÓN DEL INSTITUTO HIDROGRÁFICO DE LA
MARINA

Alumno: Luis Manuel Rusillo Díaz-Obregón

Tutor: Diego González Aguilera

08 JULIO 2022



PÁGINA EN BLANCO



Índice:

Apartado	Contenido	Pág.
--	Índice.....	2
--	Índice de Figuras.....	3
--	Índice de Tablas.....	6
--	Listado de acrónimos.....	6
-	Resumen.....	9
1.	Introducción.....	11
2.	Materiales.....	15
2.1.	Equipamiento utilizado.....	15
2.2.	Software utilizado.	27
3.	Método.....	29
3.1.	Trabajo de Planificación.	30
3.2.	Trabajo de Campo.	35
3.3.	Trabajo de Procesado.	44
4.	Conclusiones.	52
A1	Apéndice 1. Levantamiento batimétrico.	55
A2	Apéndice 2. Normativa.	61

A3	Apéndice 3. Procedimiento operativo.	64
A4	Apéndice 4. Procesado datos.....	67
--	Bibliografía.....	--

Índice de Figuras.

Núm.	Descripción	Pág.
01	Dron MATRICE 300 RTK.	15
02	Control remoto del RPAS MATRICE 300 RTK.	16
03	Cámara fotogramétrica Zenmuse P1.	17
04	Sensor LIDAR y cámara RGB Zenmuse L1.	18
05	Cámara multiespectral MICASENSE MX-RX.	19
06	Espectro (longitudes de ondas) cámara multiespectral MICASENSE.	19
07	Panel de calibración cámara multiespectral MICASENSE.	19
08	DLS cámara multiespectral.	20
09	Receptor GNSS RS2.	20
10	Imagen general USV VERIL 1.	21
11	Despiece del VERIL 1.	22
12	Módulo OBS.	22
13	Módulos para PVS y Payload.	23
14	Detalle superestructura Targa.	23
15	Detalle instalación del sondador.	24
16	Detalle Patines y placas protectoras VERIL 01.	24
17	Detalle del sistema de posicionamiento y MRU5+.	26
18	Perfilador Velocidad del Sonido AML3 LGR.	26
19	Sistema completo VERIL 01.	27
20	Programas empleados con el VERIL 01.	28
21	Flujo de trabajo.	30
22	Zonas de trabajos.	32
23	Proyectos de líneas trabajos VERIL 01.	33
24	Parámetros correcciones RTK vía NTRIP.	34
25	Medición puntos de control.	35
26	Distribución puntos de control	35
27	Parte del fichero csv con datos del GNSS.	36
28	RPAS con P1.	36

29	RPAS con LIDAR L1.	38
30	Fotografías para la calibración multiespectral.	39
31	Wi-Fi cámara multiespectral.	39
32	Cámara multiespectral en RPAS.	40
33	Carro desplazamiento VERIL 01.	41
34	Aplicación MR Mobile VCS.	41
35	a) Antena Ubiquiti Radio (izquierda); b) Dispositivo PoE (derecha).	42
36	Trabajos USV VERIL 01.	43
37	RIPAM.	43
38	Comparativa entre curvas de nivel obtenidas con LIDAR (izquierda) y P1 (derecha).	46
39	Área de trabajo y líneas realizadas durante el levantamiento.	49
40	Superficie batimétrica generada con datos VERIL 01 (derecha exagerada verticalmente).	49
41	Procesado datos batimétricos (III).	50
42	Área analizada en la parte interior del pantalán central de la estación naval.	50
43	Diferencia entre datos 2019 y datos VERIL 01(I).	51
44	Diferencia entre datos 2019 y datos VERIL 01 (II).	52
A1_01	Diferencias entre y multihaz (izquierda) y monohaz (derecha).	55
A1_02	Proyectos de líneas monohaz (izquierda) y multihaz (derecha).	56
A1_03	Detalle adquisición datos con sondador multihaz.	56
A1_04	Esquema levantamientos con SRVH.	57
A1_05	Equipo de monitorización DeepMotion.	58
A3_01	Esquema Procedimiento Operativo vehículos autónomos.	64
A4_01	DJI TERRA Misiones de Reconstrucción.	67
A4_02	Nombre misión y selección de archivos.	68
A4_03	Opciones de densidad nube de puntos.	68
A4_04	Tipos de Escenarios.	69
A4_05	Parámetros avanzados.	69
A4_06	Visualización datos procesados. a) RGB; b) Reflectividad; c) Altura; d) Retorno.	70
A4_07	Exportar datos procesados.	71
A4_08	Carga de datos LAS en ARCGIS PRO (I).	71
A4_09	Carga de datos LAS en ARCGIS PRO (II).	71
A4_10	Creación de un MDE a partir datos LAS en ARCGIS PRO (I).	72
A4_11	Creación de un MDE a partir datos LAS en ARCGIS PRO (II).	73
A4_12	Creación de un modelo de sombras.	73
A4_13	Modelo de sombras, vista general (izquierda) y detalle (derecha).	74
A4_14	Creaciones curvas de nivel.	74

A4_15	Curvas de nivel creadas, vista general (izquierda) y detalle (derecha).	75
A4_16	Nuevo proyecto y carga de fotos.	75
A4_17	Parámetros de aerotriangulación.	76
A4_18	Puntos de control (I).	76
A4_19	Puntos de control (II).	76
A4_20	Puntos de control (III).	77
A4_21	Puntos de control (IV).	77
A4_22	Formato fichero puntos de control.	78
A4_23	Ajuste puntos de control (I).	78
A4_24	Ajuste puntos de control (II).	79
A4_25	Reconstrucción 2D (I).	79
A4_26	Reconstrucción 2D (II).	80
A4_27	Reconstrucción 2D (III).	80
A4_28	Reconstrucción 3D (I).	80
A4_29	Reconstrucción 3D (II).	81
A4_30	Estructura de carpetas en el proyecto creado (I).	81
A4_31	Estructura de carpetas en el proyecto creado (II).	82
A4_32	Estructura de carpetas en el proyecto creado (III).	82
A4_33	Creación proyecto Pix4D.	83
A4_34	Importación de imágenes Pix4D.	84
A4_35	Imágenes cargadas en Pix4D.	84
A4_36	Sistema coordenadas productos generados en Pix4D.	85
A4_37	Selección de plantillas para procesado de datos en Pix4D.	85
A4_38	Visualización de imágenes en Pix4D (I).	86
A4_39	Visualización de imágenes en Pix4D (II).	86
A4_40	Fases de procesado en Pix4D.	87
A4_41	Ajuste de recursos para el proceso.	87
A4_42	Fase 1 procesado en Pix4D (I).	88
A4_43	Fase 1 procesado en Pix4D (II).	88
A4_44	Gestión Puntos de control (I).	89
A4_45	Gestión Puntos de control (II).	89
A4_46	Gestión Puntos de control (III).	89
A4_47	Gestión Puntos de control (IV).	90
A4_48	Gestión Puntos de control (V).	90
A4_49	Gestión Puntos de control (VI).	90
A4_50	Gestión Puntos de control (VII).	91
A4_51	Parámetros procesado Fase 2 (I).	92
A4_52	Parámetros procesado Fase 2 (II).	92
A4_53	Clasificación por defecto Pix4D (I).	93
A4_54	Clasificación por defecto Pix4D (II).	93
A4_55	Parámetros procesado Fase 3 (I).	94

A4_56	Parámetros procesado Fase 3 (II).	94
A4_57	Parámetros procesado Fase 3 (III).	95
A4_58	Calibración multiespectral (I).	95
A4_59	Calibración multiespectral (II).	96
A4_60	Directorio de carpetas (I).	96
A4_61	Directorio de carpetas (II).	97
A4_62	Mapa de reflectancia.	97
A4_63	Calculadora de índices.	97
A4_64	Índices por defecto y creación nuevo.	98
A4_65	a) Mapa generado NDWI (izquierda); b) Máscara con QGIS (derecha).	99

Índice Tablas.

Núm.	Descripción	Pág.
1	Resumen características sistema de posicionamiento.	26
2	Parámetros más importantes en cada uno de los vuelos planificados.....	32
3	Resultados posiciones GCP (I).	44
4	Resultados posiciones GCP (II)	44
5	Análisis datos obtenidos.	45
6	Eficacia Vuelos (I).	45
7	Eficacia Vuelos (II).	48
A1-01	Características órdenes de levantamiento OHI.	59
A4_01	Tabla A4_01. Procesado datos batimétricos.....	101

Lista de Acrónimos:

Acrónimo	Descripción
AGL	Above Ground Level, nivel sobre el suelo.
AIS	Automatic Identification System, Sistema de Identificación Automática.
BeiDou	Sistema Global de Navegación por Satélite de China.
CSV	Comma Separated Values , valores separados por comas.
CECAF	Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire.
CUBE	Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator), Estimador Batimétrico de Incertidumbres Combinadas.
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System, Sistema Diferencial Global de Navegación por Satélite.
FPV	First Person View, Visión en primera persona.

GLONASS	Sistema Global de Navegación por Satélite de Rusia.
GNSS	Global Navigation Satellite System, Sistema global de Navegación por Satélite.
GSD	Ground Sample Distance, distancia en el suelo que separa los centros de dos píxeles adyacentes de una fotografía aérea.
IHM	Instituto Hidrográfico de la Marina.
IMU	Inertial Measurement Unit, unidad de medición inercial.
IP	Ingress Protection, Protección de acceso.
MRU	Motion Reference Unit, Unidad de Referencia de Movimiento.
MTOM	Maximum Take-Off Mass, peso máximo en el despegue.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
OHI	Organización Hidrográfica Internacional.
POS	Procedimiento Operativo Estándar.
PPK	Post Processed Kinematic, posicionamiento cinemático en postproceso.
PSV	Perfilador velocidad del sonido.
RHIB	Rigid-Hulled Inflatable Boat, Embarcación inflable con quilla rígida.
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System, Sistema Pilotado de Manera Remota.
RTK	Real Time Kinematic.
SBAS	Satellite Based Augmentation System, Sistema de Aumentación Basado en Satélites.
SRVH	Superficie de Referencia Vertical Hidrográfica.
THU	Total Horizontal Uncertainty, Incertidumbre Total Horizontal.
TVU	Total Vertical Uncertainty, Incertidumbre Total Vertical.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, Vehículo aéreo no tripulado.
USV	Unmanned Surface Vehicle, Vehículo de superficie no tripulado.
VERIL	Vehículo Explorador Robotizado Integral Ligero.
WGS84	World Geodetic System 1984.

Agradecimientos:

A mis compañeros de la Armada y del Máster, no los nombraré para no olvidar a ninguno de ellos por sus consejos, asesoramiento y ánimos durante la realización de este Máster.

A mis amigos Gustavo y Alberto, por estar ahí ...

A mis profesores y tutor, por la paciencia tenida conmigo durante este curso.

A mi Rocío, María y Manuel, por comprender, ayudar, respetar, apoyar

... y a ellos Dos, que nunca, nunca fallan...

Resumen (abstract)

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) ha adquirido recientemente equipos autónomos, dotados de diversos sensores que obtendrán datos geográficos. Este trabajo consiste en tratar de exponer cual debe ser el procedimiento para usar estos vehículos autónomos de manera más eficiente.

Para ello, se indicará como deben ser cada uno de los pasos a dar desde que se reciba la orden de ejecutar un trabajo. Es decir, se indica como debe ser la planificación, desarrollo de los trabajos (toma de datos) y posterior procesado.

Se han adquirido datos con los nuevos sensores en zonas en las que ya existían con el objetivo de realizar una comparativa, y en otros casos se han realizado levantamientos, comprobando la calidad de los datos.

Mediante un equipo pilotado de manera remota (RPAS) se obtendrán datos LIDAR totalmente nuevos para el IHM, con los que se tratará de realizar modelos del terreno que ayuden a la delimitación de la línea de costa española. Por otro lado, también se podrá instalar en el RPAS una cámara fotogramétrica, que permitirá reducir la dependencia que hasta la fecha se tiene de otros organismos de la administración pública para la delimitación de la citada línea.

Mediante un vehículo de superficie no tripulado (USV) se obtendrán datos batimétricos en zonas donde no pueden acceder las actuales embarcaciones de las que dispone el IHM.

Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas, de manera que permitan mejorar el empleo de los vehículos actuales y que también sirvan para una futura compra por parte del IHM de otros equipos.

The Spanish Navy Hydrographic Office (Instituto Hidrográfico de la Marina - IHM) has recently acquired autonomous equipment, equipped with various sensors that will obtain geographic data. This work consists of trying to expose which should be the procedure to use these autonomous vehicles most efficiently.

To do so, it will be indicated how each of the steps to be taken from the moment the order to execute a job is received. In other words, the planning, development of the work (data collection) and subsequent processing will be indicated.

Data have been acquired with new sensors in areas where they already existed to make a comparison, and in other cases, surveys have been conducted, checking data quality.

A Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) will be used to obtain LIDAR (Light detection and ranging) data which will be used to produce digital terrain models to help delimit the Spanish coastline. On the other hand, it will also be possible to install another sensor, a photogrammetric camera, on the RPAS, to reduce the dependence the IHM has on other governmental agencies for the delimitation of the aforementioned coastline.

An unmanned surface vehicle (USV) will be used to acquire bathymetric data in areas that cannot be accessed by the current survey vessels and boats available in the IHM.

Finally, some conclusions will be obtained to improve the use of these new autonomous vehicles. Furthermore, they will be taken into consideration for future purchases of other equipment by the IHM.

Palabras clave: RPAS, USV, LIDAR, batimetría

1. Introducción.

Generalidades:

El Instituto Hidrográfico de la Marina es el organismo a nivel estatal responsable de realizar la cartografía náutica oficial de las costas españolas y aquellas zonas de interés asignadas por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), que en el caso de España se trata de parte de las costas de la Antártida.

De entre todos los elementos que aparecen en una carta náutica¹ (en adelante carta), los más importantes son, por una parte, los valores de la profundidad del fondo marino en diferentes localizaciones y, por otro lado, la línea de costa.

Conforme a lo establecido en el Real Decreto 1545/2007, el IHM tiene el cometido de actualizar la línea de costa española, remitiéndola al Registro Central de Cartografía de manera periódica para su inscripción como delimitación territorial.

La línea de costa sufre la mayor parte de sus modificaciones en las zonas portuarias, debido a la construcción de nuevos muelles, pantalanés u otras instalaciones. Estas zonas son de vital importancia para el navegante, sobre todo a la hora de arribar a puerto, por lo que es necesario actualizar los datos que se muestran en las cartas.

La línea de costa se ha obtenido tradicionalmente mediante la realización de vuelos fotogramétricos por parte del Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF), bajo unas determinadas condiciones impuestas por el IHM (condiciones meteorológicas, horas de realización del vuelo, condiciones de marea, etc.), además de otros procesos topográficos como taquimetrías.

El margen de tiempo entre la petición y la llegada del vuelo al IHM para su procesado puede oscilar 2-3 años, lo que no lo hace muy efectivo, para actualizar de manera dinámica la cartografía.

Disponer de un equipo autónomo y de personal con la titulación necesaria dota al IHM de gran capacidad de maniobrabilidad para poder actualizar rápidamente las cartas; bastará con desplazar un equipo a la zona de trabajos, solicitar las autorizaciones pertinentes, efectuar el vuelo y al tratarse de zonas muy acotadas, su procesamiento no llevará mucho tiempo. En

¹ Mapa en el que la mayor extensión corresponde a la superficie del mar/océano, empleada para la navegación.

función a la entidad de las modificaciones sufridas, el IHM podrá emitir avisos literales o bien publicar un aviso gráfico en un breve espacio de tiempo.

Por otro lado, los datos de profundidad o datos batimétricos que se muestran en las cartas se obtienen a través de levantamientos hidrográficos sistemáticos realizados por los distintos buques hidrográficos u otras unidades de menor porte² que dispone el IHM.

La orografía de las costas españolas hace a veces muy difícil su acceso mediante las embarcaciones disponibles, no pudiendo obtener datos o teniendo que utilizar otros muy antiguos y de poca fiabilidad.

El empleo de un vehículo no tripulado, de dimensiones reducidas que facilite el acceso a esas zonas complicadas, permitirá poder adquirir los datos batimétricos que no se han podido obtener hasta ahora.

La proliferación en el uso de equipos no tripulados o controlados de manera remota, como pueden ser drones o vehículos marinos, que proporcionan una mayor autonomía al usuario, ha hecho que el IHM replantee sus métodos para la obtención de algunos de los datos que forman parte de su cadena de producción.

Es por ello, que ha adquirido recientemente sendos equipos autónomos, por una parte, un dron dotado de una cámara fotogramétrica digital, sensor LIDAR y una cámara multispectral y por otro lado un vehículo marino de superficie.

Con el primero de ellos, el IHM tendrá la posibilidad de:

- actualizar la línea de costa en aquellas zonas que más varían, que suelen ser los puertos.
- Obtener modelos digitales del terreno y correspondientes curvas de nivel a través de las nubes de puntos obtenidas con el sensor LIDAR.
- Obtener datos batimétricos derivados de imágenes multispectrales.

El uso del vehículo de superficie permitirá:

- Obtener datos batimétricos en zonas donde es imposible que trabaje alguna de las embarcaciones del IHM.

² Lanchas Hidrográficas Transportables: Astrolabio, Escandallo y Sondaleza.

El motivo de este trabajo es el de comprobar que los datos obtenidos con los nuevos sensores cumplen con los requisitos exigidos por la OHI para su incorporación a las cartas. Además, tratará de plasmar de qué manera se puede obtener un mayor rendimiento en cuanto a la planificación de los trabajos, así como del procesado de los datos obtenidos.

Para aquellos que no se encuentran familiarizados con trabajos batimétricos, se ha incluido un apéndice (1), donde se detalla sus características y peculiaridades.

Estado del arte:

Desde mediados del siglo XX ha proliferado la construcción y empleo de vehículos autónomos [q], tanto aéreos como de superficie, que permiten la captación de datos de manera precisa, segura y que suponen una reducción de costes a las empresas y organismos que se dedican a ello [s].

Una de las principales ventajas que tienen estos sistemas autónomos es la facilidad para su despliegue [p]. Se tratan de equipos, generalmente de poco peso, que se pueden transportar en vehículos convencionales y que necesitan de pocos requerimientos logísticos.

Hasta no hace muchos años los levantamientos topográficos se realizaban mediante estaciones totales, sistemas GNSS o bien realizando procedimientos tradicionales como poligonales o taquimetrías. La aparición de los RPAS ha supuesto una alternativa a la hora de realizar mediciones y toma de datos disminuyendo de manera significativa los costes operativos [v].

Estos sistemas también suponen una reducción en los riesgos que deben tomar los operadores tradicionales, de esta manera éstos no tendrán que transitar por zonas peligrosas siendo los RPAS los que operen en zonas de difícil acceso [w].

La incorporación de este tipo de sistemas en el IHM ha supuesto un cambio de mentalización a la hora de actualizar la línea de costa española que figurará en las cartas náuticas, ya que, hasta ahora, para poder realizar vuelos fotogramétricos se dependía exclusivamente del CECAF.

La falta de experiencia y conocimiento con los RPAS por parte del IHM ha llevado a realizar un estudio que pruebe que tanto la metodología como los resultados obtenidos son válidos para su inclusión en la cartografía náutica oficial.

Para ello, se ha seguido la misma metodología que Pérez Paredes (2019), constatando que se trata de un método más apropiado para la adquisición y posterior procesamiento de los datos.

Tanto para RPAS como USV, la integración [t] de diversos sensores como GNSS y sensores inerciales de movimiento, junto con la capacidad de recibir coordenadas diferenciales RTK o en su caso disponer de la capacidad de poder guardar los datos brutos y poder post-procesarlos al finalizar los trabajos (PPK) permitirán obtener datos con alta precisión en cuanto a sus coordenadas [s].

Por otra parte, el avance en el desarrollo de baterías con mayor autonomía para su funcionamiento hace de ellos equipos sostenibles, que reducen la huella de carbono, hecho éste fundamental para poder trabajar en entornos especialmente sensibles como podría ser la Antártida o Ártico. Además, con el USV se podrá acceder a zonas donde otras plataformas por sus dimensiones no podrían acceder.

A diferencia de los vehículos aéreos no tripulados, y como indica la “National Oceanic and Atmospheric Administration”, NOAA, los USV son considerados como sistemas “Multiplier”, es decir, se aumenta su eficacia cuando operan de manera conjunta con otras plataformas en modo de embarcación nodriza [u].

Dependiendo del tipo y calidad de los sensores que se incorporen a los vehículos autónomos se obtendrán unos resultados u otros. Por ejemplo, no será lo mismo instalar un sondador monohaz que una multihaz como el caso de este TFM para obtener los datos del fondo marino.

La disponibilidad de equipos no tripulados proporciona la capacidad de obtener datos geográficos de interés de cualquier zona de manera directa, sin tener que depender de otros organismos/empresas.

El gran avance en la tecnología hace que los equipos de hoy se encuentren obsoletos mañana. La continua actualización de componentes electrónicos, características de los sensores, autonomía de las baterías, etc., obligan a estar muy pendientes del mercado.

2. Materiales.

2.1. Equipamiento utilizado.

2.1.1. RPAS MATRICE RTK 300.



Figura 01. Dron MATRICE 300 RTK.

Principales características técnicas:

- Vuelo eficiente de hasta 55 minutos.
- Baliza anticollisión.
- Máxima distancia de vuelo: 15 kilómetros.
- Capacidad de carga (dispositivos incorporados): 2,7 kilogramos.
- Cámara FPV (First Person View) de 960 píxeles con un campo de visión de 145°. No captura imágenes.
- Resistencia a la fuerza del viento de 12-15 m/s (aproximadamente 24 - 30 nudos).
- Protección al agua y polvo IP45. Capacidad de protegerse o no dañarse por el polvo o lluvia.
- Modo seguro de vuelo. El dron cuenta con sistema de redundancia que evitarán un mal funcionamiento en caso de fallos en alguno de ellos. Los sistemas duplicados son:
 - Baterías.
 - IMU.
 - Antena RTK y módulo GNSS.
 - Barómetro.
 - Brújula.

- Manejado mediante control remoto que dispone de una pantalla de 5,5 pulgadas que proporciona toda la información del vuelo: posición y velocidad del dron, altura, velocidad y dirección del viento, etc. Empleado también para la planificación de los vuelos.



Figura 02. Control remoto del RPAS MATRICE 300 RTK.

Otras características:

- Máxima velocidad de vuelo: 23 m/s.
- Precisión en cuanto al posicionamiento con RTK fijo:
 - 1 cm + 1 ppm (horizontal).
 - 1,5 cm + 1 ppm (vertical)
- Baterías: Dos. 2,5 horas vida útil; tiempo de carga 2 horas y 15 minutos.
- Altitud máxima de vuelo: 5000 metros.
- Sistema de posicionamiento: GNSS+ GLONASS + BeiDou + Galileo.
- Peso máximo despegue: 9 kilogramos.

2.1.2. CÁMARA FOTOGRAMÉTRICA DJI ZENMUSE P1.

Principales características técnicas:

- Peso: ~ 800 gramos.
- Precisión absoluta: horizontal 3 cm y vertical 5 cm³.
- Características del sensor:
 - Tamaño del píxel: 4, 4 μm.
 - Píxeles efectivos: 45 MP.
 - Tamaño del sensor (instantánea): 35,9 × 24 mm (fotograma completo).

³ La precisión absoluta se mide con un tamaño de píxel del suelo (GSD) de 3 cm y a una velocidad de vuelo de 15 m/s, con una ratio de superposición frontal del 75 % y una ratio de superposición lateral del 55 %.

- Tamaño de sensor (Área máx. de grabación de vídeo): 34 × 19 mm.
 - Tamaño de fotografía: 3:2 (8192×5460).
- Tiempo entre fotografías: 0,7 segundos.
 - Objetivo DJI DL **35 mm** F2.8 LS ASPH (con parasol del objetivo y anillo de equilibrado/filtro), FOV **63, 5°**.
 - Precisión: horizontal 3 cm y vertical 5 cm para un GSD de 3 cm, solape longitudinal del 75% y transversal del 55% y a una velocidad de 15m/s.



Figura 03. Cámara fotogramétrica Zenmuse P1.

Otras características:

- Capacidad para almacenar fotos/datos de observación GNSS sin procesar/archivo de registro de imagen.
- Dispone de un estabilizador tipo DJI Skyport.

2.1.3. LIDAR ZENMUSE L1.

Principales características técnicas:

- Dispone de un sensor LIDAR con resolución 1280 x 690.
- Campo angular (FOV): 95°.
- Admite 3 retornos.

- Frecuencia efectiva de puntos: 240.000 puntos/s. (En operaciones con dos o tres retornos, la frecuencia de puntos es de 480.000 pts/s.).
- Alcance de detección 450 m (80% reflectividad/ 0 klx) / 190 m (10% reflectividad/ 100 klx).
- Precisión vertical 5 cm, horizontal 10 cm.
- Cámara fotogramétrica RGB:
 - 20 MP (no tan precisa como P1).
 - Focal de 8,8 mm (equivalente 24 mm).
 - Tamaño de la fotografía: 4864 x 3648 (4:3); 5472 x 3648 (3:2)
- IMU.
 - Frecuencia de actualización: 200 Hz.
 - Precisión en Yaw: 0,18 ° en real-time y 0,08° en postproceso.
 - Precisión en Roll/Pitch: 0,03° en real-time y 0,0025° en postproceso.
 - Rango del acelerómetro: +/- 8g.



Figura 04. Sensor LIDAR y cámara RGB Zenmuse L1.

Otras características:

- Sistema de estabilización de 3 ejes.
- Grados de protección IP54 (polvo y salpicaduras de agua).

2.1.4. CÁMARA MULTIESPECTRAL MICASENSE RED-EDGE MX.



Figura 05. Cámara multispectral MICASENSE MX-RX.

Principales características técnicas:

- Peso: ~ 200 gramos.
- Bandas espectrales: Rojo, Verde, Azul, rojo extremo e Infrarrojo cercano (IR).

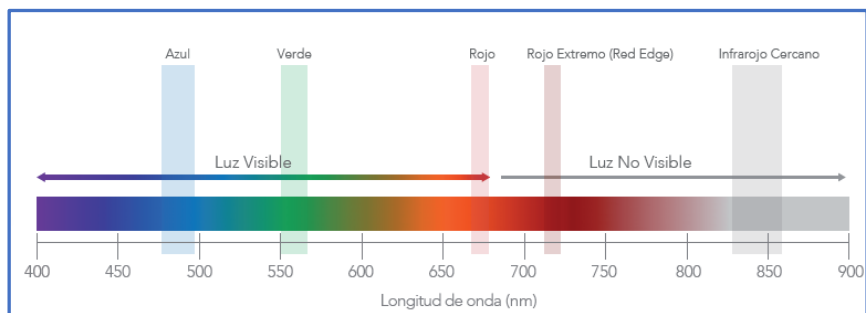


Figura 06. Espectro (longitudes de ondas) cámara multispectral MICASENSE.

- GSD: 8 cm/píxel por banda a 120 m AGL (sobre el nivel del suelo).
- Campo de visión (FOV): 47, 2°.
- Sensor de luz (DLS) con GNSS integrado:



Figura 07. DLS cámara multispectral.

Otras características:

- Tasa de captura: 1 captura por segundo en todas las bandas.
- Panel de reflectancia, para la toma de imágenes de calibración antes del despegue y después del aterrizaje e incorporarlas al software de procesamiento

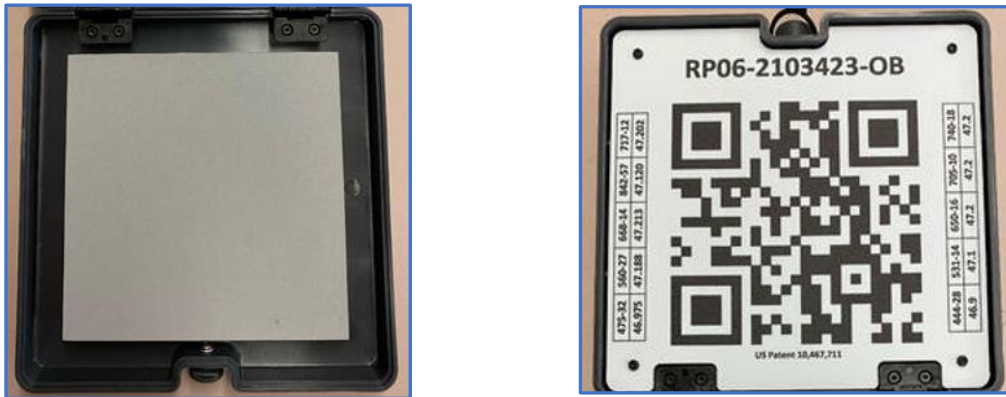


Figura 08. Panel de calibración cámara multispectral MICASENSE.

2.1.5. RECEPTOR GNSS EMLID REACH RS2.

- Señales satélites: GPS, GLONASS, Galileo y Beidou.
- Correcciones: NTRIP, VRS y RTCM3.
- Baterías LiFePO4 6400 mAh con autonomía de hasta 16 horas.
- Precisión posicionamiento RTK: Horizontal 7 mm + 1ppm; Vertical 14 mm + 1 ppm.



Figura 09. Receptor GNSS RS2.

2.1.6. VEHÍCULO AUTÓNOMO DE SUPERFICIE (USV).

Las siglas VERIL corresponden con: Vehículo Explorador Robotizado Integral Ligero.



Figura 10. Imagen general USV VERIL 01.

Características generales:

- Vehículo de superficie pseudo-autónomo⁴ de la empresa Maritime Robotics, modelo «Otter Pro», que incorpora todos aquellos sensores necesarios para realizar un levantamiento batimétrico.
- Dimensiones: 2 x 1,08 x 1,065 metros. Calado⁵: 50 centímetros.
- Peso con sensores instalados: 100 kilogramos.
- Manejo del USV: mediante un ordenador desde una estación remota o bien mediante un dispositivo móvil.
- Propulsión: 2 pots (hélices) girables 180° y totalmente eléctrico.
- Baterías: 4; con una autonomía de hasta 4 horas. Posibilidad de trabajar con una sola batería.
- Velocidad máxima, hasta 6 nudos
- Velocidad óptima de trabajo, 3 nudos.

⁴ No dispone de sensor de proximidad obstáculos (colisión);

⁵ Distancia vertical entre un punto de la línea de flotación de la embarcación y la quilla (parte más baja).

Estructura del USV.

El VERIL 01 dispone de una estructura o armazón metálico, en el cual van integrados los diferentes módulos electrónicos para comunicaciones remotas, control del perfilador de velocidad del sonido (PVS) y control remoto del sondador.

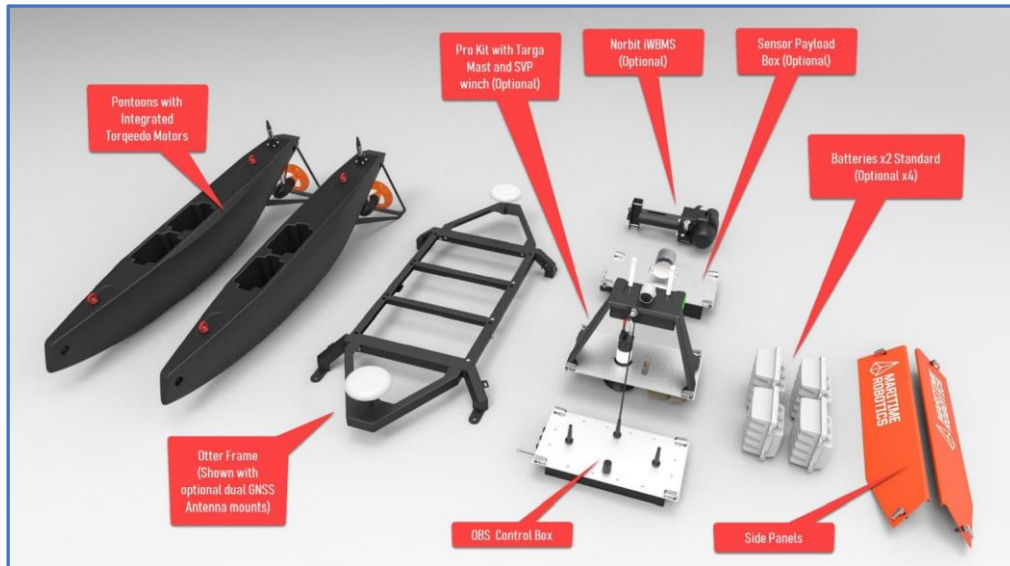


Figura 11. Despiece del VERIL 01.

Los módulos que se integran son:

1. On Board System (OBS). Donde se alojan la antena del sistema AIS⁶ así como las antenas de comunicaciones 4G y Wi-Fi. (control de comunicaciones y navegación).

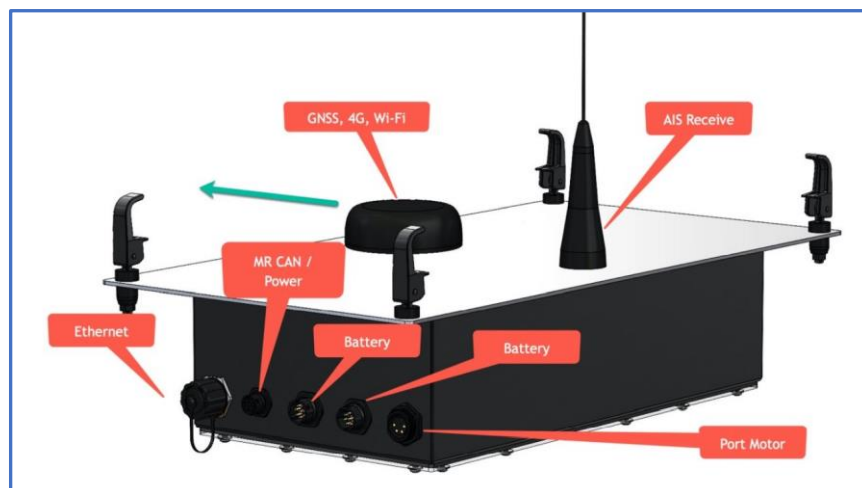


Figura 12. Módulo OBS.

6 Sistema de identificación automática en inglés: Automatic Identification System.

2. Módulo para manejo del PVS. Con la electrónica de este módulo se puede controlar el uso del PVS.
3. Payload Box. Para el control remoto del sondador.



Figura 13. Módulos para PVS y Payload.

Además, de estos tres módulos que se integran en el armazón principal, dispone de una superestructura, denominado «TARGA», donde se encuentran las antenas radio, cámara de visualización y una polea o roldana por donde laborea el cable con el que se iza y arría el PVS.

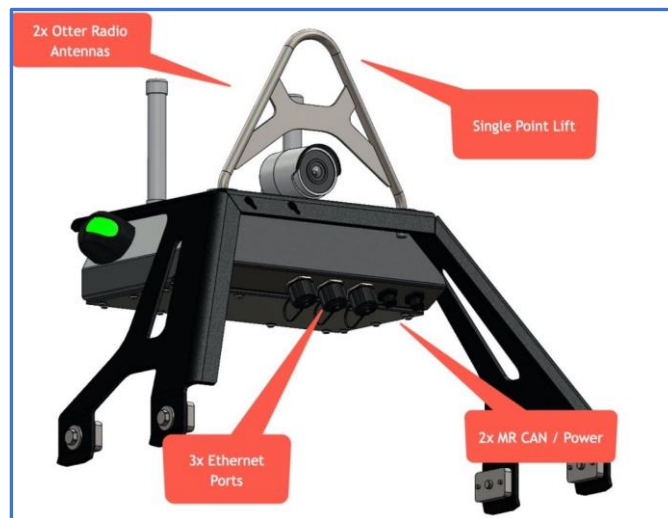


Figura 14. Detalle superestructura Targa.

El armazón va anclado a dos patines de poliuretano, los cuales disponen de sendos alojamientos para las baterías de alimentación, además de las dos hélices con motores eléctricos a popa de los patines.

A popa de la estructura metálica existe un sistema de trincado para el sondador, además de dos antenas GNSS del sistema de posicionamiento, una en proa y otra en popa.



Figura 15. Detalle instalación del sondador.

Por último, tiene unos paneles para protección de conectores y embellecedores que van instalados en los laterales, entre el esqueleto y los patines.



Figura 16. Detalle Patines y placas protectoras VERIL 01.

Sensores instalados en VERIL 01.

Para la realización de un levantamiento batimétrico con el VERIL 01 se le ha dotado de los siguientes sensores:

- Sondador (también llamado ecosonda) EM 2040P.
- Sistema de posicionamiento SEAPATH 130 OEM.
- Compensador de oleaje MRU5+.
- Perfilador velocidad del sonido AML3 LGR con capacidad de inmersión de hasta 110 metros.

A continuación, se reseñan alguna de sus principales características (ver Apéndice 1 sobre levantamientos batimétricos):

- EM 2040P:
 - Sondador multihaz portátil de alta resolución.
 - Rango de frecuencias de trabajo: 200-400 Khz. A 200 Khz se obtendrá un mayor alcance, mientras que a 400 Khz se obtendrá una mayor resolución.
 - Cobertura de barrido: hasta 140°.
- SEAPATH 130 OEM:
 - Sistema de posicionamiento que integra a través de un filtro Kalman las señales GNSS con las medidas inerciales realizadas con la MRU5+.
 - El sensor inercial MRU 5+ proporciona valores de aceleración y movimientos angulares propios de la embarcación una vez en la mar, además del valor de la altura de la ola. Su precisión es de 0,008° para Roll y Pitch.
 - La velocidad y posición de la embarcación se obtiene de manera redundante con los dos receptores GNSS de los que dispone.
 - El equipo recibe tiene la capacidad de recibir correcciones RTK vía internet, a través de una tarjeta SIM.
 - Mediante el cálculo de diferencia de la portadora de las dos antenas calcula el “Heading” de la embarcación, a lo que hay que añadirle los datos medidos por la MRU5+ relativos al Yaw, obteniéndose los que se denomina “True Heading” (dirección del eje principal de la embarcación).
 - En resumen, las precisiones del sistema son:

Sistema	Roll/Pitch RMS	Heading RMS	Altura ola	Posición (x,y)	z
130 / 5+	0,008°	0,01°	5 cm	RTK: 1 cm + 1 ppm DGNSS: 0,5 m SBAS: 0,5 m	2 cm + 1 ppm

Tabla 01. Resumen características sistema de posicionamiento.

A continuación, se muestra una imagen del sistema de posicionamiento:

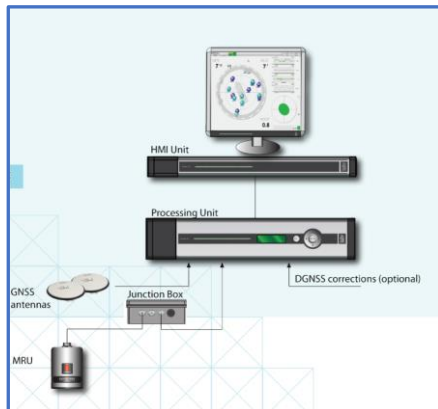


Figura 17. Detalle del sistema de posicionamiento y MRU5+.

- Perfilador velocidad del sonido AML3 LGR.



Figura 18. Perfilador Velocidad del Sonido AML3 LGR.

- Equipo para medir la velocidad del sonido en la columna de agua.
- Capacidad para descarga de datos mediante puerto USB o conexión Wi-Fi.



Figura 19. Sistema completo VERIL 01.

2.2. Software empleado.

2.2.1. RPAS.

Para la planificación y ejecución de cada uno de los vuelos se ha empleado el programa “DJI PILOT2”, proporcionado por la empresa suministradora. Actualmente, sólo se puede acceder al programa desde la consola controladora del RPAS MATRICE 300.

El procesamiento inicial de los datos se ha realizado con los programas “DJI TERRA” (datos LIDAR y vuelos fotogramétricos) y “Pix4D” (datos vuelos fotogramétrico y multiespectral). Una vez realizado el primer procesado, se han empleado diferentes sistemas de información geográfica (SIG) para la obtención de productos derivados como pueden ser modelos digitales de elevación y curvas de nivel. Estos programas han sido:

- QGIS.
- ARCGIS Pro.

Los puntos de control obtenidos para los vuelos fotogramétricos han sido procesados con el software propio que incorpora el equipo, mediante la aplicación “ReachView3”.

Para la cámara multiespectral, además del DJI PILOT2, se ha empleado un software propio de la cámara, que se maneja desde un dispositivo móvil, donde se configuran algunos parámetros de la cámara y desde donde se inicia y finaliza la toma de fotografías.

2.2.2. USV.

Para la planificación y ejecución del levantamiento batimétrico, incluido el proyecto de líneas a realizar por el vehículo autónomo, se ha empleado el programa “VCS GUI” el cual es el que se utiliza también para el manejo en navegación del propio USV. Con los programas “SEAFLOOR INFORMATION SYSTEM” (SIS) versión 5 (módulo K-Controller) de la empresa noruega Kongsberg y “SEAPATH”, se han configurado todos los parámetros del sistema de posicionamiento, sondador y velocidad del sonido.

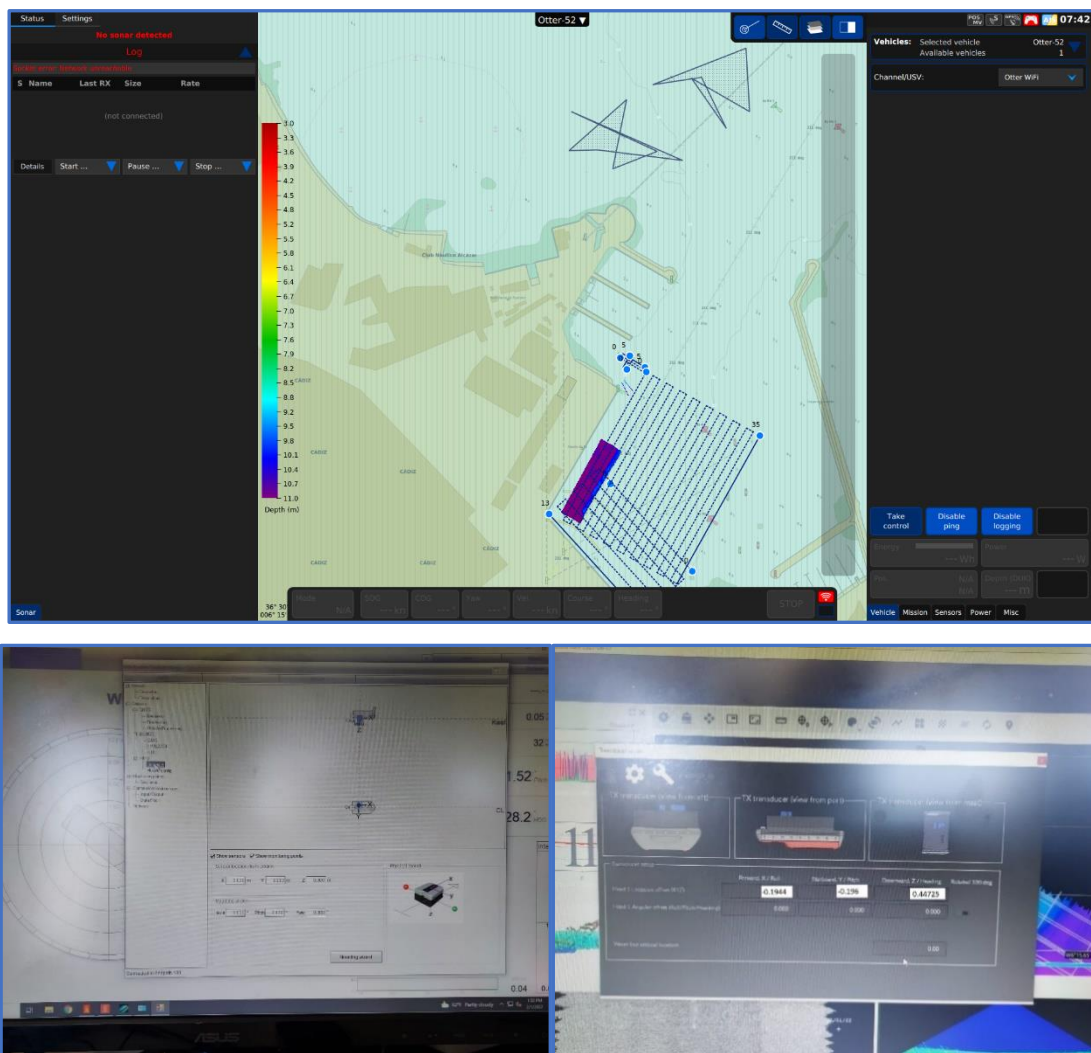


Figura 20. Programas empleados con el VERIL 01.

Para el procesado de los datos se ha utilizado “CARIS HIPS&SIPS” versión 11.4 de la empresa TELEDYNE. Programa muy utilizado en el mundo hidrográfico, donde se integran datos de posicionamiento, batimétricos y de mareas.

Para aquellos casos en los que las correcciones diferenciales RTK no han sido de buena calidad, se ha realizado PPK mediante el software “TERRAPOS” de la empresa TERRATEC.

Para comunicar de manera remota con el ordenador que existe en el módulo “Payload box” se ha empleado el software “REMINNA”. En este módulo dispone de tres programas para el manejo hidrográfico del USV, uno es el “K-Controller”, que establece comunicaciones entre el “VSC” y el sondador, otro es el “SEAPTAH”, para configuración del sistema de posicionamiento y por último el “SAILFISH”, para la obtención y extracción del perfil de velocidad del sonido e integrarlo en el dato en tiempo real a través del “K-Controller”.

3. Método.

El método seguido para el desarrollo de este trabajo ha consistido en un estudio en profundidad de las prestaciones de los vehículos autónomos, así como de cada uno de los sensores instalados. A continuación, se ha planificado una serie de trabajos en campo con objeto de determinar el ajuste óptimo de los parámetros del sistema completo (plataforma y sensores) y los requerimientos logísticos que conllevan este despliegue de equipos.

Una vez en la zona de trabajos se ha comprobado el resultado de la planificación, detectando errores y posibles mejoras y además ha supuesto una oportunidad para conocer el software del sistema.

Durante la fase de procesado, se ha comprobado la bondad de los datos obtenidos con diferentes aplicaciones informáticas, para poder confirmar que se pueden incorporar a la cadena de producción del IHM. Estudiando los datos obtenidos, se ha podido determinar los parámetros con los que los vuelos con el RPAS son más eficientes.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo seguido:

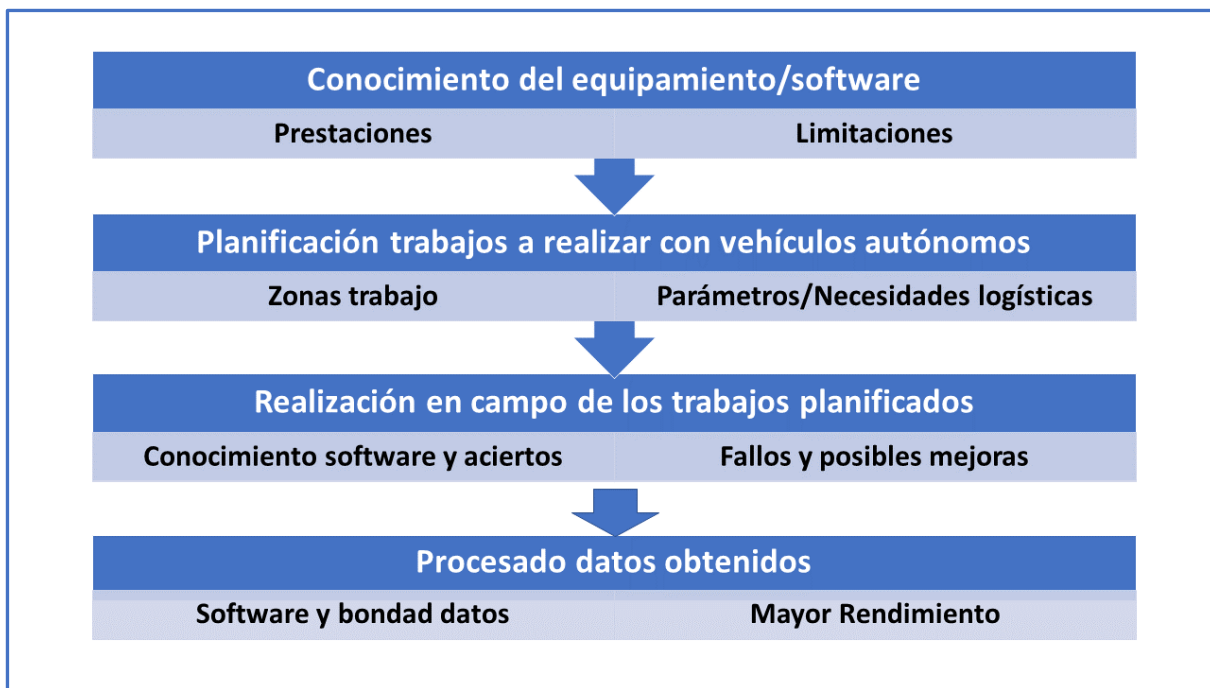


Figura 21. Flujo de trabajo.

3.1. Trabajo de Planificación.

Una buena toma de datos será el fruto de realizar una buena planificación previa. Son muchos los aspectos a tener en cuenta antes de salir a trabajar a cualquier zona; habrá que tener en cuenta aspectos técnicos, burocráticos e incluso logísticos. Por ejemplo, de nada sirve definir un vuelo fotogramétrico si no se ha realizado la carga de las baterías de los equipos que se van a utilizar o si por ejemplo no se dispone de un vehículo para desplazarnos a la zona de trabajos.

Es por ello por lo que, disponer de una lista de comprobación o «checklist» facilitará no olvidar detalle alguno y que no nos llevemos una sorpresa una vez en la zona de trabajos.

Para completar la lista de comprobación habrá que:

- Determinar de la zona de trabajos, estudiando todos aquellos obstáculos que puedan afectar en la realización del vuelo o levantamiento batimétrico, presencia de elementos ferromagnéticos que puedan provocar pérdidas de las correcciones RTK, etc.
- Establecer un sistema de referencia (coordenadas y proyección).
- Comprobar las condiciones meteorológicas previstas para los días de trabajo.
- Para el RPAS, estudiar posibles puntos de control y verificación.

- Contactar con la autoridad competente informando y solicitando autorización para el desarrollo de los trabajos.
- Estudiar de las posibilidades para la obtención de correcciones RTK en función de la zona donde se vaya a trabajar. Barajar opciones, uso de estación de referencia transmisora con solución de red, estación simple, o bien emplear una estación base propia que emita las correcciones diferenciales.
 - Altura de vuelo, así como solapes longitudinal y transversal.
 - Velocidad de la plataforma.
 - Número de retornos (sólo LIDAR).
 - Parámetros del sondador.
 - Etc.
- Establecer y configurar los parámetros (settings) en función del sensor empleado.
 - Altura de vuelo, así como solapes longitudinal y transversal.
 - Velocidad de la plataforma.
 - Número de retornos (sólo LIDAR).
 - Parámetros del sondador.
 - Etc.

Estos valores variarán dependiendo del sensor utilizado. En el apéndice 3 de este trabajo se ha desarrollado un procedimiento operativo donde se describen con mayor detalle cada uno de los aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de los trabajos en cada una de sus fases y donde se incluye una lista de comprobación para todas las fases del trabajo.

Las zonas donde se han realizado los trabajos han sido, la Base Naval de La Carraca (San Fernando, Cádiz) para los vuelos con RPAS y la Estación Naval de Puntales (Cádiz) para los trabajos batimétricos con el VERIL 01:



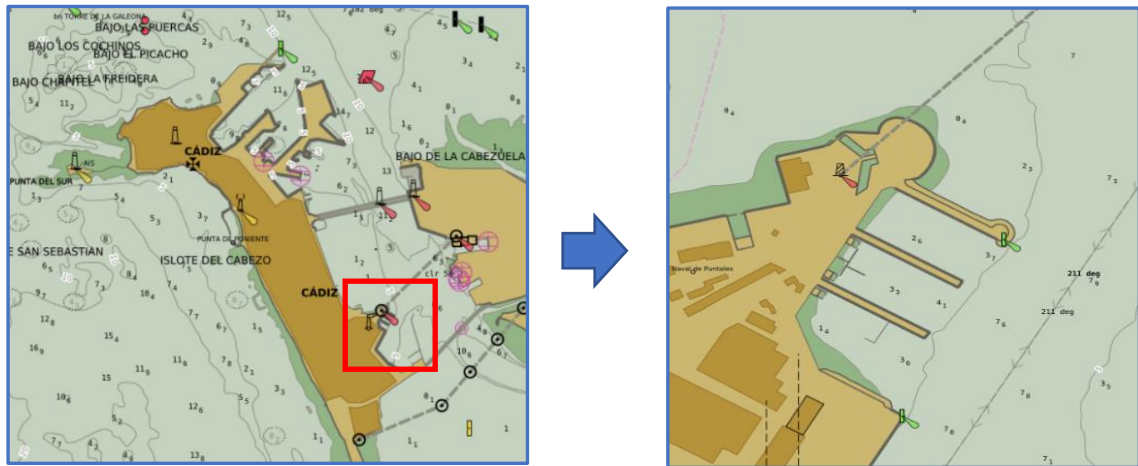


Figura 22. Zonas de trabajos.

La superficie total estudiada abarca un total de 16,5 ha para los vuelos con RPAS y 15,2 ha para el USV.

3.1.1. RPAS.

Siguiendo los pasos descritos en el procedimiento operativo sobre el uso de vehículos autónomos del apéndice 3, se han configurado los siguientes vuelos: seis para la cámara fotogramétrica P1, dos para el sensor LIDAR L1 y otros dos para la cámara multiespectral. En la siguiente tabla se muestran los parámetros más importantes de cada uno de los vuelos:

n° vuelo	Sensor	Altitud (m)	Velocidad (m/s)	RL (%)	RT (%)	Azimut (°)	Distancia (m)	Tiempo	n° Líneas	n° Fotos
1	P1	80	10	80	70	150/330	6183	12m32s	32	675
2	P1	80	10	70	65	150/330	5363	10m47s	26	386
3	P1	80	10	70	55	150/330	4192	8m29s	20	302
4	P1	100	10	80	70	150/330	4971	10m47s	24	429
5	P1	100	10	70	65	150/330	4568	9m11s	22	262
6	P1	100	10	70	55	150/330	3411	6m57s	16	197
7	L1	80	10	70	50	150/330	3832	9m29s	30	225
8	L1	100	10	70	30	150/330	1969	4m46s	14	89
9	MS	80	10	80	80	150/330	12338	30m6s	106	8660
10	MS	100	10	70	65	150/330	5633	13m41s	46	4000 ⁷

Tabla 02. Parámetros más importantes en cada uno de los vuelos planificados.

⁷ 5 bandas; 800 fotografías por 5 = 4000 fotografías; 1732 por 5 = 8660 fotografías

3.1.2. VERIL.

El primer paso a seguir para planificar un trabajo con el USV es estudiar la carta náutica existente para analizar la morfología del fondo marino además de observar si hay o no obstáculos que puedan afectar al levantamiento batimétrico. A continuación, se diseñarán diferentes proyectos de líneas que abarquen toda la zona de trabajos:

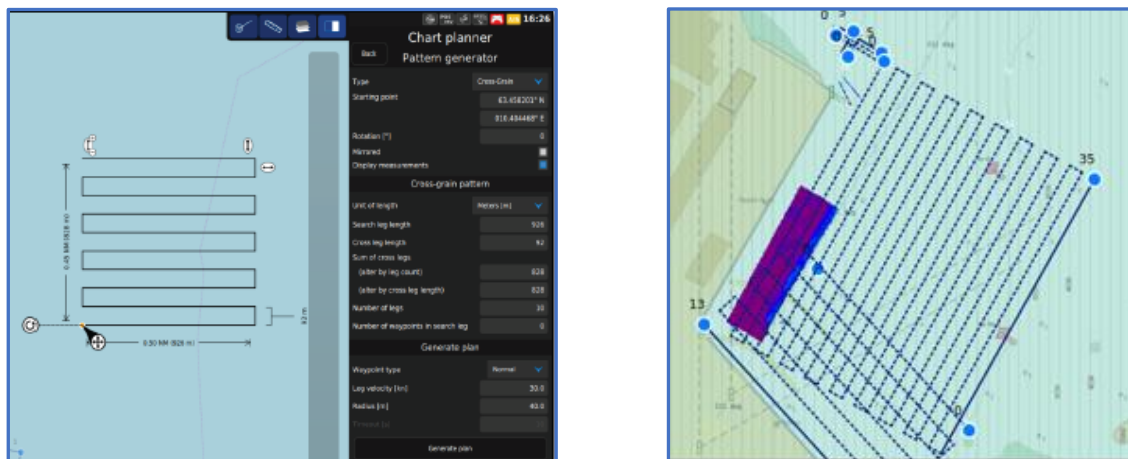


Figura 23. Proyectos de líneas trabajos VERIL 01.

En el estudio de la zona también habrá que considerar la altura de la marea en las zonas de trabajo, sobre todo sabiendo que con el VERIL 01 se pretenderá llegar a zonas donde otras embarcaciones no pueden acceder por su calado (dimensiones).

Al definir estos proyectos también se indicará la velocidad del USV, así como la curva de evolución que deber realizar al pasar de una línea a otra.

El siguiente paso será configurar los parámetros propios del sondador y del sistema de posicionamiento; hay que estudiar las estaciones de referencia que transmitan correcciones diferenciales RTK en la zona, en caso de que no existan habrá que valorar disponer de una estación propia que transmita las correcciones. Cabe otra opción y es la de no disponer de una estación base propia y realizar PPK al finalizar los datos.

Los parámetros por configurar en el sondador serán, frecuencia de trabajo (400 KHz), apertura de los haces (60°) y forma de trabajo (equidistancia).

Para la recepción de las correcciones diferenciales vía NTRIP habrá que configurar una serie de parámetros, como son: puerto de comunicaciones, (dependiendo si se van a utilizar estaciones de punto simple o de solución de red), IP o URL del servidor en cuestión, usuario y contraseña para servicio RTK y por último hay que introducir manualmente el nombre del Mount Point.

Esta opción es la única que difiere de cualquier software de servicio NTRIP, en los cuales se suele disponer la opción de descargar un listado de “Mount Points” y seleccionar uno directamente, en vez de tener que escribirlo manualmente (para ello deberemos de comprobar los nombres en la página oficial del servidor “caster” al cual nos conectemos).

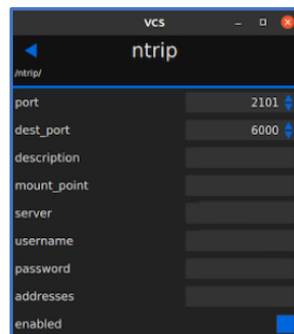


Figura 24. Parámetros correcciones RTK vía NTRIP.

Como ocurre con el RPAS, es aconsejable contactar con la autoridad portuaria correspondiente, para informar de los trabajos que se van a realizar. Además, como el VERIL 01 no tiene capacidad de transmitir su posición vía AIS, es necesario que con antelación suficiente se emita un «aviso a los navegantes» para que el resto de las embarcaciones que operen en la zona estén informadas.

Para un mayor control sobre el USV, es recomendable disponer de una embarcación auxiliar tipo RHIB alistada para que en caso de emergencia se pueda actuar con rapidez.

Si se pretende trabajar con mareas GPS en lugar de con mareas obtenidas mediante un mareógrafo, será necesario disponer de la superficie de referencia vertical hidrográfica (SRVH), para poder reducir las alturas elipsoidales obtenidas con el sistema de posicionamiento.

Todos estos parámetros se encuentran reseñados en la lista de comprobación asociada al procedimiento operativo.

3.2. Trabajo de campo.

3.2.1. RPAS.

Antes de comenzar con los vuelos, el primer paso consiste en materializar los puntos de control definidos en la fase de planificación necesarios para la verificación de los vuelos fotogramétricos. En cada uno de ellos se instala una diana de 50 x 50 cm.

La posición de estos puntos se obtiene mediante el receptor GNSS, “Reach RS2”, recibiendo correcciones RTK vía internet de la estación de referencia perteneciente a la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) «UCA13».



Figura 25. Medición puntos de control.

Para el cálculo de los puntos se ha empleado la aplicación “Reach View 3” instalada en un teléfono móvil. El procedimiento es sencillo, una vez encendido el receptor y con conexión a internet, éste genera una señal Wi-Fi a la que nos conectamos con el teléfono móvil. Desde la aplicación se configuran los parámetros necesarios para la medición, nombre del punto, tiempo de medición, etc.

Con los datos que aparecen en la pantalla puede determinarse si la precisión de la medición (incertidumbre) es o no buena.

Este procedimiento se ha realizado en los siete puntos de control del proyecto. Los datos obtenidos se exportan y se envían por correo electrónico en formato “csv”:

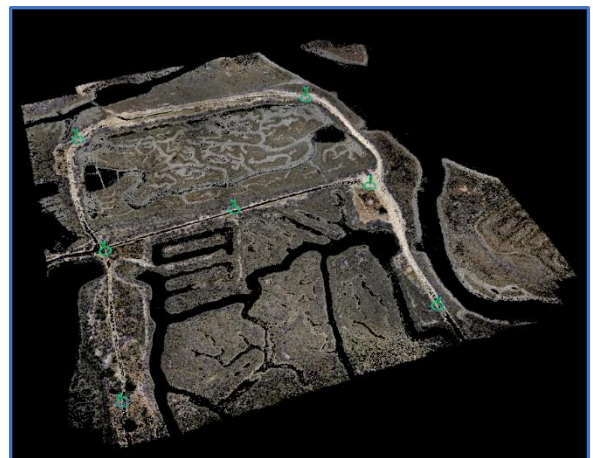


Figura 26. Distribución puntos de control.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	Easting	Northing	Elevation	Description	Longitude	Latitude	Ellipsoidal height
2	GCP1	753170.857	4042652.380	46.798	,-6.17351375	36.49574905	46.798	0,010,0.011,0.016,0.015,2.134,m,
3	GCP2	753292.683	4042715.166	46.778	,-6.17213456	36.49628217	46.778	0,010,0.011,0.013,0.015,2.134,m,
4	GCP3	753198.104	4042849.858	47.213	,-6.17314521	36.49751998	47.213	0,010,0.010,0.011,0.014,2.134,m,
5	GCP4	752978.172	4042722.217	47.110	,-6.17563973	36.49642880	47.110	0,010,0.010,0.013,0.015,2.134,m,
6	GCP5	753072.327	4042573.689	46.950	,-6.17463832	36.49506655	46.950	0,010,0.010,0.011,0.014,2.134,m,
7	GCP6	753148.800	4042426.749	47.465	,-6.17383361	36.49372326	47.465	0,011,0.011,0.011,0.015,2.134,m,
8	GCP7	753372.002	4042573.115	47.037	,-6.17129654	36.49498213	47.037	0,010,0.010,0.013,0.015,2.134,m,
9								
10								

Figura 27. Parte del fichero csv con datos del GNSS.

Una vez medidos todos los puntos de control, lo siguiente es la preparación del RPAS con la cámara P1. Resumiendo, se instalan las patas, despliegan brazos y alas, se instalan las dos baterías, se incorpora la cámara y se arranca el equipo. Simultáneamente se enciende la controladora y se comprueba que el equipo está recibiendo las correcciones RTK.



Figura 28. RPAS con P1.

Un factor muy importante para tener en cuenta es la cobertura de telefonía móvil en la zona de trabajos, ya que de ella depende que se puedan recibir o no correcciones diferenciales RTK vía internet. Si no hay suficiente cobertura, habrá que plantear instalar una estación base propia que emita las correcciones.

En este caso, inicialmente el equipo no recibía correcciones con la cobertura de una determinada compañía. Por suerte, se dispuso de teléfonos móviles con coberturas de otras compañías consiguiendo recibir las necesarias correcciones diferencias vía internet.

Antes de comenzar con los vuelos, se realiza una inspección visual de la zona por si acaso se ha escapado algún detalle en la fase de planificación.

En la controladora, se busca el primero de los vuelos planificados, se revisan los parámetros y se procede a iniciar el vuelo. En algunas ocasiones, aparecen advertencias y/o recomendaciones. Es aconsejable revisar las recomendaciones y resolver las advertencias, ya que si éstas últimas no se solventan no se podrá realizar el vuelo.

En concreto, durante las pruebas apareció una advertencia relativa a una actualización del firmware del sistema sin la cual no se podía realizar el vuelo. Esto conllevó a un retraso en la ejecución de los trabajos. Por ello, es conveniente revisar con anterioridad (fase de planificación) todas aquellas actualizaciones que puedan estar pendientes de realizar.

Estas actualizaciones deben realizarse con los equipos encendidos, lo que conlleva a un consumo de las baterías no deseado.

Una vez, revisadas las recomendaciones, solventadas las advertencias y previa autorización de la autoridad competente en la zona, desde la controladora se inician los vuelos programados.

El sistema se configuró para que el RPAS volviera a la zona de despegue. Puede parecer que eso tiene poca importancia, pero con el fin de optimizar el tiempo útil de las baterías hay que seleccionar correctamente desde donde va a despegar/atterrizar el RPAS, ya que, si esto no se hace correctamente, se empleará parte de las baterías en trayectos de ida y vuelta al comenzar y terminar los vuelos que disminuyen el empleo efectivo de las baterías. Lo recomendable es colocara el punto de despegue en un punto centrado en la zona de trabajos, o bien en las proximidades del punto inicial del vuelo.

Durante las pruebas se comprobó que no es necesario que el RPAS vuelva al punto de despegue tras finalizar el vuelo para poder comenzar otro. Desde la controladora, se puede

activar el siguiente vuelo mientras el RPAS vuelve al punto de despegue. Esto viene bien porque se ahorran baterías al evitar el aterrizaje y despegue entre distintos vuelos.

Tras finalizar los vuelos con la P1, se instaló el LIDAR L1 y se realizaron los vuelos planificados:



Figura 29. RPAS con LIDAR L1.

A diferencia con la P1, con el L1, antes de iniciar y al finalizar el vuelo, el sistema realiza una calibración de la IMU, consistente en dar tres pequeñas pasadas ida y vuelta. El resto de los vuelos es similar a los realizados con la P1.

El seguimiento de cada uno de los vuelos se realiza desde la controladora. Dependiendo del sensor instalado habrá unas posibilidades de visualización diferente. Con la P1 hay tres opciones, visualizar el estado de avance en el que se encuentra el proyecto, la vista que instantáneamente tiene la P1 y la vista de la cámara del RPAS. Con el L1, existe la opción de ver la nube de puntos que se está generando, además de las vistas de las cámaras del RPAS y propia del sensor y el avance del proyecto.

Para los vuelos con la cámara multiespectral, una vez instalada, se procedió a la toma de fotografías necesarias para su posterior calibración (corrección radiométrica).



Figura 30. Fotografías para la calibración multispectral.

Desde la controladora se maneja el vuelo planificado previamente, donde se introducen parámetros generales como solapes, velocidad del RPAS, altura de vuelo, etc. Esta cámara dispone de su propia red Wi-Fi a la que se puede acceder mediante un dispositivo móvil; será desde este dispositivo desde donde se comprobará que no hay ningún fallo/error, se establecerá la cadencia de fotografías y cuando la cámara debe empezar y parar de tomarlas.

Es importante anotar la hora a la que se empieza a tomar fotografías y la hora a la que se inician las pasadas del vuelo, ya que las imágenes tomadas en ese intervalo de tiempo tendrán que ser eliminadas antes de comenzar el procesado.

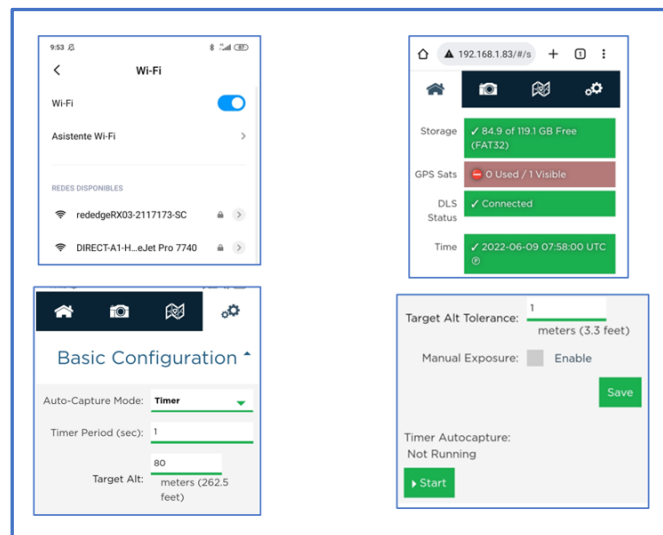


Figura 31. Wi-Fi cámara multispectral.

Una vez todo configurado el modo de proceder es similar a los descritos anteriormente para la P1 y L1.



Figura 32. Cámara multispectral en RPAS.

El primer día de pruebas se llevaron las seis baterías cargadas al 100%. Con ellas se pudieron realizar ocho de los diez vuelos previstos. El segundo día, cuando se realizaron los vuelos de la multispectral, se emplearon tan sólo dos baterías.

Al finalizar los vuelos programados se desinstalaron los sensores, se plegó el RPAS y se recogieron las dianas instaladas cuando fue necesario.

3.2.2. VERIL 01.

Los trabajos con el VERIL 01, consistieron en realizar un levantamiento batimétrico dentro de la Estación Naval de Puntales.

Lo primero que hay que hacer es montar el equipo, para lo que se necesita aproximadamente 20 minutos. El proceso es sencillo y rápido si se siguen las instrucciones del fabricante. Resumiendo, se montan los tres módulos sobre la estructura, y ésta sobre los patines. Sobre el módulo central se instala el «Targa», a continuación, las antenas GNSS, baterías y tapas protectoras.

El último sensor que montar es el sondador, con el cual hay que ser cautelosos para que no toque con el suelo, por lo que se recomienda trabajar con el equipo en una superficie con cierta altura.

Una vez instalados todos los componentes, se arrancan las baterías, con las cuales se puede probar que las hélices giran y que hay conexión vía Wi-Fi entre el USV y el dispositivo móvil con el que se va a manejar inicialmente.

Para poner el equipo en el agua se ha diseñado un carrito que facilita su desplazamiento y manipulación por parte de los operadores.



Figura 33. Carro desplazamiento VERIL 01.

Una vez en el agua y con conexión vía Wi-Fi, el USV se maneja con la aplicación “MR Mobile VCS” desde un teléfono móvil. Esta aplicación sólo está disponible hoy en día para sistemas “Android” y tiene que ser proporcionada por el fabricante, es decir, no se encuentra en “Play Store”:



Figura 34. Aplicación MR Mobile VCS.

Moviendo con los dedos el punto anaranjado de la imagen se conseguirá desplazar el USV. Hay que configurar una serie de parámetros, siendo el más importante el “Throttle Sensitivity”, que actúa sobre la sensibilidad del “joystick”.

Hay que reseñar que esta aplicación se emplea inicialmente para el manejo del USV hasta que se pasa el control a la estación de control.

El sistema dispone de una antena que permite comunicar de forma remota con la estación de control. Dicha antena es direccional, con una apertura angular de 120° y un alcance teórico en visual de hasta 2 kilómetros. Es fundamental que equipo se encuentre en la visual de la antena, en caso contrario podría no funcionar correctamente.

El dispositivo PoE, (figura 35b) proporciona alimentación a la propia antena y permite realizar la conexión a través de los cables de red entre antena radio y ordenador de control del USV.



Figura 35. a) Antena Ubiquiti Radio (izquierda); b) Dispositivo PoE (derecha).

Una vez el VERIL 01 en el agua y trabajando desde la estación de control, comprobados todos los parámetros y medidas de seguridad, desde el software VCS se inicia el proyecto de líneas planificado para que el equipo se desplace a la zona de trabajos. Como en cualquier trabajo batimétrico, antes de comenzar a sondear⁸ se arria el perfilador de velocidad del sonido para la obtención de una traza y su posterior carga en el sistema.

Una vez todo cargado y comprobado se inicia el proyecto, de una manera similar a como se trabaja con el RPAS.

El operador encargado de la estación de control llevará al USV al primero de los “waypoints” del proyecto y comenzará a grabar los datos batimétricos.

⁸ Toma de datos batimétricos.



Figura 36. Trabajos USV VERIL 01.

Es muy importante tener siempre a la vista el VERIL 01 así como tener clara su situación respecto a otras embarcaciones que se encuentren en la zona. Ante cualquier situación de emergencia, la embarcación auxiliar estará arrancada y lista para actuar. Se cancelarán los trabajos si se pone en riesgo tanto al VERIL 01 como a otra embarcación. Durante los trabajos en la E.N. de Puntales no hizo falta su uso.

A la hora de navegar con el VERIL 01 se tendrán en cuenta las normas descritas en el Reglamento Internacional para prevenir los Abordajes en la Mar (RIPAM). Buscando un símil automovilístico, el RIPAM viene ser lo que el “código de circulación” que los buques deben seguir en la mar para evitar accidentes.

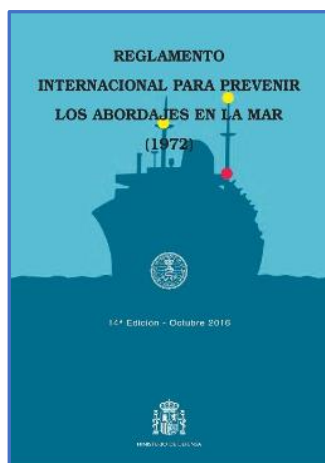


Figura 37. RIPAM.

3.3. Trabajo de procesado.

Para el trabajo de procesado se han seguido las instrucciones reseñadas en el apéndice 4.

3.3.1. Para los datos obtenidos con el RPAS.

- Datos de la cámara fotogramétrica P1, se ha realizado:
 - Estudio sobre la precisión de los puntos apoyo (GCP) en cada uno de los vuelos, comparando las coordenadas obtenidas con las que resultan de la medición con el receptor GNSS RS2. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

80 m									
	Vuelo 1			Vuelo 2			Vuelo 3		
	RL		RT	RL		RT	RL		RT
	80		70	70		65	70		55
	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)
GCP1	-0.012659	0.006054	0.037888	-0.009885	0.003076	0.0164	-0.013927	0.002879	0.023146
GCP2	-0.003718	-0.009572	0.012415	0.000878	-0.006686	0.001995	0.000497	-0.003013	0.003741
GCP3	-0.002855	-0.015122	0.001634	-0.005723	-0.007599	-0.00319	-0.004894	-0.005958	-0.004783
GCP4	-0.007429	-0.008638	-0.021309	-0.009265	-0.001868	-0.003492	-0.015036	-0.001392	-0.001145
GCP5	-0.001972	0.009765	-0.028172	-0.004721	0.000001	-0.013656	-0.005223	0.002798	-0.005491
GCP6	-0.00264	0.0366	0.021738	-0.003088	0.003393	-0.001803	-0.007195	0.011948	0.021003
GCP7	-0.008183	-0.00716	-0.010916	0.005528	-0.002762	-0.001314	0.004275	-0.006924	-0.017647
RMS	0.0066711	0.016552	0.022142	0.006318	0.04384	0.008339	0.008796	0.006016	0.013921

Tabla 03. Resultados posiciones GCP (I).

100 m									
	Vuelo 4			Vuelo 5			Vuelo 6		
	RL		RT	RL		RT	RL		RT
	80		70	70		65	70		55
	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)
GCP1	-0.022479	0.003285	0.034305	-0.027415	0.004055	0.027602	-0.018451	-0.003407	0.031278
GCP2	-0.01432	-0.003017	0.007044	-0.023308	-0.002533	0.007273	-0.011813	-0.007165	0.006321
GCP3	-0.011474	-0.006024	0.000064	-0.021677	-0.016294	-0.002154	-0.01225	-0.010565	-0.006536
GCP4	-0.016334	-0.004586	-0.01598	-0.019894	-0.010333	-0.009392	-0.018355	-0.000649	-0.006952
GCP5	-0.01524	0.003346	-0.030435	-0.016532	-0.007877	-0.013465	-0.006585	0.003302	-0.02137
GCP6	-0.02145	0.017046	0.025261	-0.023262	0.01147	0.016974	-0.008266	0.009081	0.014818
GCP7	-0.007779	-0.003705	-0.008292	-0.018986	0.000466	-0.008547	-0.002238	-0.004619	-0.002149
RMS	0.016308	0.00749	0.021095	0.021828	0.009172	0.014393	0.012442	0.006433	0.015992

Tabla 04. Resultados posiciones GCP (II).

Resumiendo, los resultados en cuanto a precisión son:

ANÁLISIS PRECISIÓN			
GCP	x	y	z
1	~ 2 cm		~ 3 cm
2	< 1 cm		< 1 cm
3	~ 1 cm		
4	~ 1 cm		
5	< 1 cm		
6	~ 2 cm		~ 2 cm
7	< 1 cm		< 1 cm

Tabla 05. Análisis datos obtenidos.

Como se puede observar, la precisión planimétrica de los puntos obtenidos en los vuelos con respecto a los puntos de control medidos oscila entre 1 y 2 cm, mientras que la altimétrica se encuentra entre 1 y 3 cm.

Conforme a los estándares establecidos, la precisión obtenida en cada uno de los vuelos es óptima para que los datos sean incorporados a las bases de datos del IHM.

- Por otra parte, para determinar la eficiencia de los vuelos en cuanto a altura, tiempo empleado y volumen de los datos obtenidos se estima que los realizados a 100m son los óptimos sobre todo a la vista de la reducción del número de imágenes y consiguiente peso de los vuelos.
- En cuanto a los solapes, se ha comprobado que hasta en el vuelo con menor solape transversal (55%), la formación de pares estereoscópicos es óptimo.

n° vuelo	Sensor	Altitud (m)	RL (%)	R _T (%)	Distancia (m)	Tiempo	n° Líneas	n° Fotos	Peso (GB)
1	P1	80	80	70	6183	12m32s	32	675	12.1
2	P1	80	70	65	5363	10m47s	26	386	6.54
3	P1	80	70	55	4192	8m29s	20	302	5.03
4	P1	100	80	70	4971	10m47s	24	429	6.57
5	P1	100	70	65	4568	9m11s	22	262	4.12
6	P1	100	70	55	3411	6m57s	16	197	3.16
7	L1	80	70	50	3832	9m29s	30	225	3.94
8	L1	100	70	30	1969	4m46s	14	89	1.8

Tabla 06. Eficacia Vuelos (I).

Tan sólo queda pendiente la restitución fotogramétrica del vuelo y la obtención de aquellos elementos que permitan actualizar la línea de costa.

- Datos obtenidos con LIDAR L1.
 - Conforme a los pasos indicados en el apéndice 4, se han obtenido las curvas de nivel de las zonas donde se ha volado. Se ha empleado el software DJI TERRA, con el que se ha buscado un compromiso entre resolución y peso de los productos generados. Si se procesa a alta resolución se obtienen productos de gran detalle y precisión, pero su peso es muy elevado, lo que dificulta su manejo en cualquier SIG.
 - Para comprobar su bondad se han comparado con otras curvas de nivel generadas en otros vuelos y con otros programas.

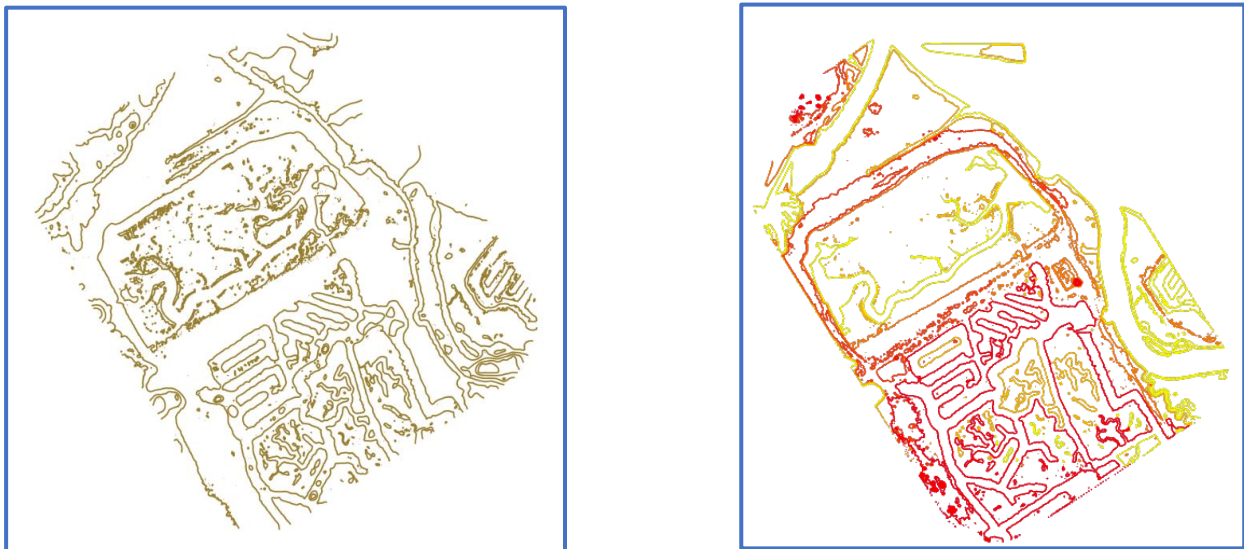


Figura 38. Comparativa entre curvas de nivel obtenidas con LIDAR (izquierda) y P1 (derecha).

En la imagen anterior se muestran las curvas de nivel obtenidas con datos LIDAR y vuelo fotogramétrico, observándose pequeñas diferencias entre ambas.

- Datos obtenidos con MICASENSE RED_EDGE MX.

Las imágenes multiespectrales se han procesado con el programa Pix4D, obteniendo una ortoimagen, un modelo digital de superficie, mapa de reflectancia y una serie de índices que el software genera por defecto y otros creados ad-hoc. Estos últimos buscando el objetivo fundamental de estas imágenes, que no es otro que obtener batimetría derivada de las imágenes multibanda.

Esta técnica ya se encuentra muy desarrollada, pero hasta ahora se ha trabajado normalmente con imágenes satélite (SENTINEL y LANDSTAT) y se utiliza para obtener datos batimétricos de zonas en las que no existen por uno u otro motivo. De forma análoga a lo que ocurre con el LIDAR batimétrico, es muy dependiente de las características físicas de la masa de agua especialmente de la turbidez.

El algoritmo más utilizado para la obtención de batimetría derivada es el de Richard P. Stumpf. Este método establece una correspondencia lineal entre la reflectancia de las bandas verde y azul. Conforme aumenta la profundidad, los valores de reflectancia de la banda con mayor capacidad de absorción disminuirán proporcionalmente más rápido que el valor de reflectancia de la banda que presenta menos absorción [n].

Las ventajas más importantes que presenta el empleo de imágenes satélite frente a imágenes obtenidas por otros sensores, como puede ser la cámara multiespectral, es su amplia cobertura, así como, la existencia de imágenes que se han tomado de manera periódica, es decir, existe un histórico, por lo que se puede estudiar cómo ha evolucionado una zona en concreto.

En cuanto a los inconvenientes, se encuentra la resolución de las imágenes satélite, mucho menor que las de una cámara operada desde un dron.

Esta forma de obtener batimetría es una alternativa a la hidrografía tradicional en la que se emplean medios acústicos, combinando teledetección y el uso de SIG.

Los vuelos realizados para este TFM se han realizado en zonas donde no existen datos batimétricos, ya que se tratan de vuelos experimentales que permitan desarrollar un procedimiento de planificación y procesado objeto de este trabajo. Una vez que se pueda volar el RPAS en zonas con batimetrías conocidas se podrá tratar de obtener batimetría derivada de las imágenes de la cámara multiespectral.

En el apéndice 4 se menciona el procedimiento que hay que seguir para la obtención de batimetría derivada.

Por otra parte, en cuanto a las características de los vuelos con la cámara multispectral se refiere, al igual que ocurre con la cámara P1, el volumen de datos que se generan con mucho solape transversal es muy grande:

n° vuelo	Sensor	Altitud (m)	RL (%)	RT (%)	Distancia (m)	Tiempo	n° Líneas	n° Fotos	Peso (GB)
9	MS	80	80	80	12338	30m6s	106	8660	19.8
10	MS	100	70	65	5633	13m41s	46	4000	9.18

Tabla 07. Eficacia Vuelos (II).

Es por ello por lo que se considera que con solapes entre 30-65% se pueden conseguir productos eficientes. En cuanto a la altura del vuelo, se opta por 100 metros ya que la diferencia de GSD es pequeña, (7.41 cm/píxel para 80m y 9.26 cm/píxel para 100m); la precisión no variará mucho pero sí que disminuye el peso del vuelo.

3.3.2. Para los datos batimétricos obtenidos con el VERIL 01.

Una vez descargados los datos y comprobado que no se han producido pérdidas en la recepción de correcciones diferenciales (RTK), se han procesado los datos de manera similar a los obtenidos mediante otras embarcaciones/sensores, con el software CARIS HIPS&SIPS.

En cuanto al procesado batimétrico, se ha comprobado que existe una cobertura total de la superficie hidrografiada, sin dejar huecos (artefactos), lo cual ha permitido realizar un modelo 3D del fondo marino. Así mismo, se ha comprobado que no existen objetos extraños en comparación con otros levantamientos.

En las siguientes dos imágenes se muestra la zona trabajada, las líneas sondadas y la superficie batimétrica generada, la segunda de ella con exageración vertical para una mejor visualización.

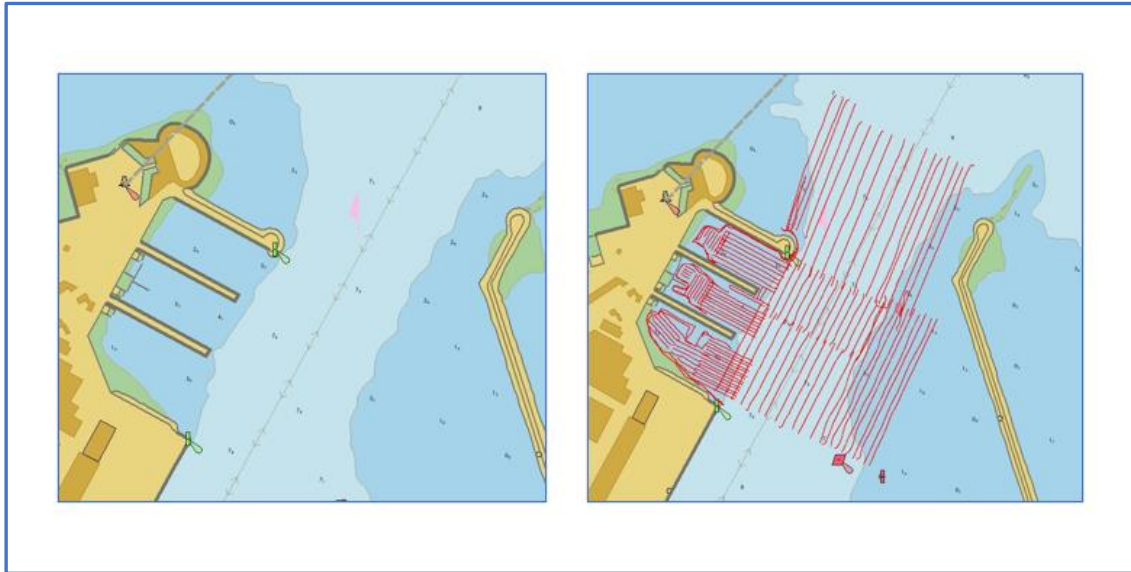


Figura 39. Área de trabajo y líneas realizadas durante el levantamiento.

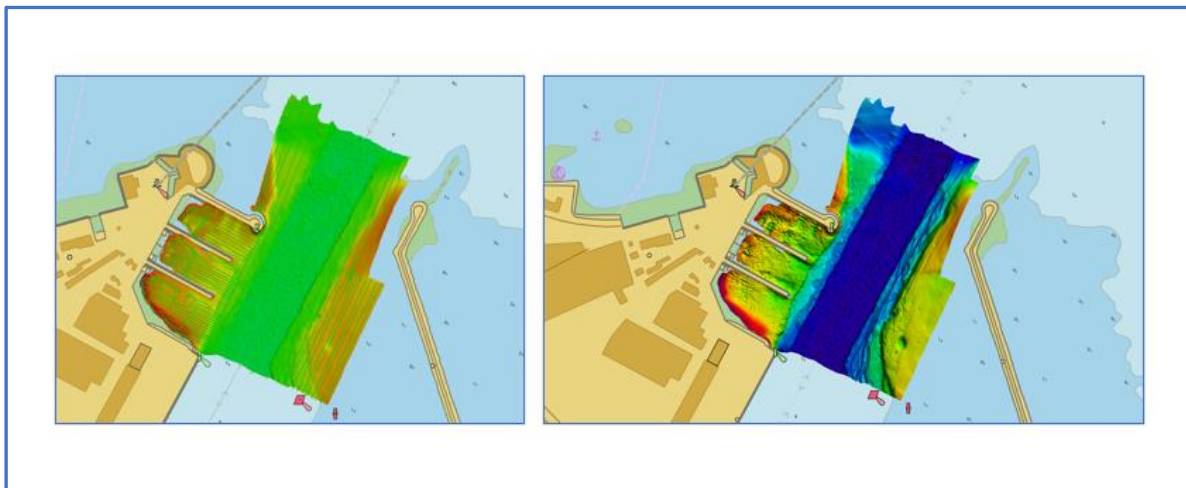


Figura 40. Superficie batimétrica generada con datos VERIL 01 (derecha exagerada verticalmente).

Para comprobar que todas las profundidades (sondas) adquiridas, que no deja de ser una nube de puntos, se han obtenido de manera óptima, se ha realizado un análisis exhaustivo por áreas, para detectar fácilmente la presencia de objetos extraños o profundidades anómalas.

El modelo 3D del fondo marino reseñado anteriormente es una superficie batimétrica basada en el algoritmo «CUBE⁹» (algoritmo batimétrico de incertidumbres combinadas), “...*el cual usa la elevación y su incertidumbre total asociada de cada sonda (valor de la profundidad) que lo forma para calcular una o varias hipótesis para un área de interés. Las hipótesis*

⁹ Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator.

resultantes se usan para estimar profundidades estadísticamente representativas en cada posición.”

Este algoritmo utiliza toda la información de las sondas adquiridas para asignar a cada posición, de acuerdo con la resolución establecida, la profundidad más probable de las propuestas con su respectivo valor de incertidumbre. Este modelo se asemejará más a la realidad cuanto mejores sean los datos adquiridos (buen solape entre las líneas adyacentes del proyecto, buena cadencia de perfiles de la velocidad del sonido, velocidad apropiada de la plataforma que toma los datos, etc.)

En las siguientes imágenes se muestra el análisis de la parte interior del pantalán central de la estación naval:

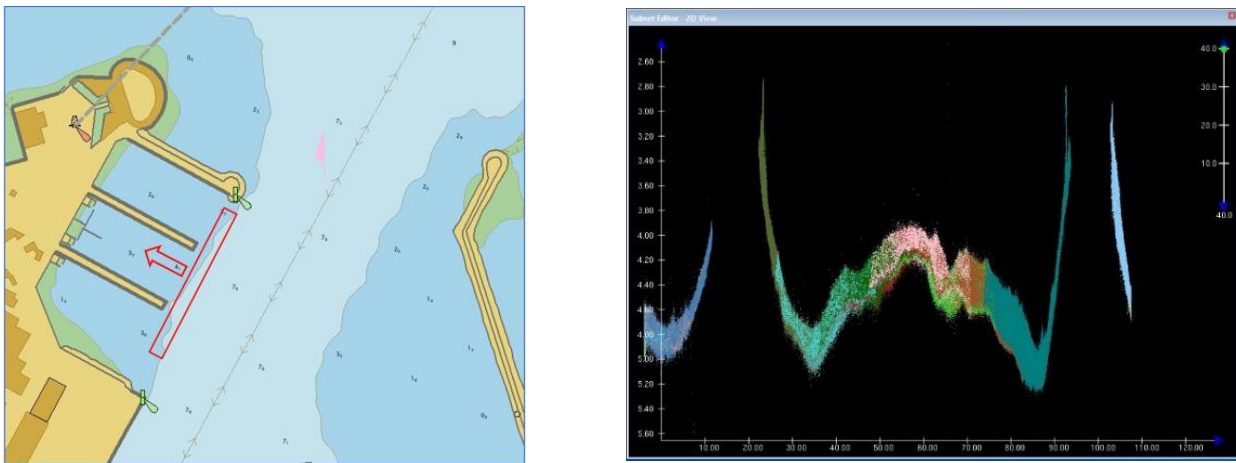


Figura 41. Procesado datos batimétricos (III).

En la parte central de la siguiente imagen se puede observar cómo disminuye el valor de la profundidad conforme la embarcación se acercó a los muelles los pilares que soportan los muelles, así como los valores de profundidad entre ambos.

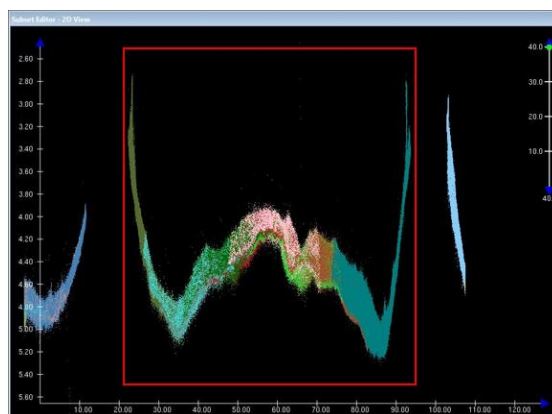


Figura 42. Área analizada en la parte interior del pantalán central de la estación naval.

Para comprobar la bondad de los datos obtenidos con el VERIL 01, se ha realizado una comparativa con datos adquiridos anteriormente con sistema multihaz (datos adquiridos en el año 2019 con la lancha hidrográfica transportable Astrolabio con sondador multihaz EM2040C):

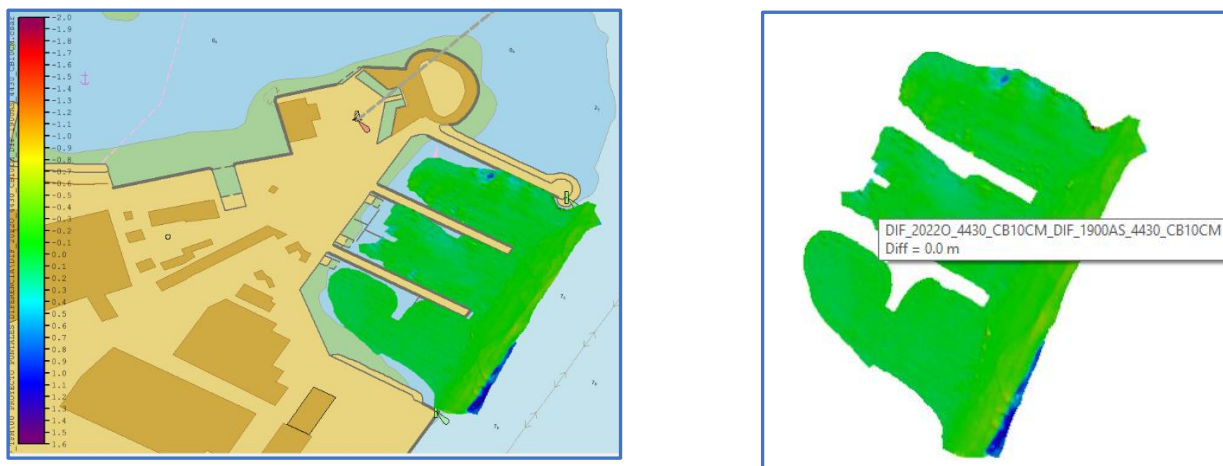
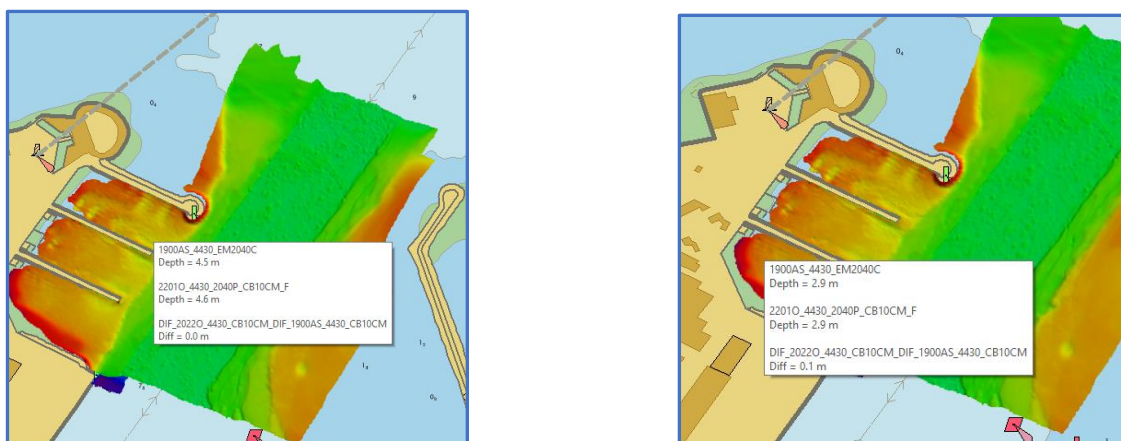


Figura 43. Diferencia entre datos 2019 y datos VERIL 01(I).

En las imágenes de la figura 42 se muestran las diferencias observadas entre ambos levantamientos dentro de las dársenas. En la mayor parte de las zonas, el rango de diferencias oscila entre 0 y 10 centímetros, que pueden deberse a la incertidumbre que tienen implícita los equipos de medida empleados (sondador, GNSS, perfilador velocidad del sonido, etc.).

Esos centímetros se encuentran dentro de la tolerancia permitida por la OHI, por lo que puede confirmarse que los datos obtenidos con el VERIL 01 son óptimos. Una de las diferencias observadas es que con el USV se pueden acceder a zonas donde la lancha hidrográfica no pudo acceder por sus dimensiones y maniobrabilidad



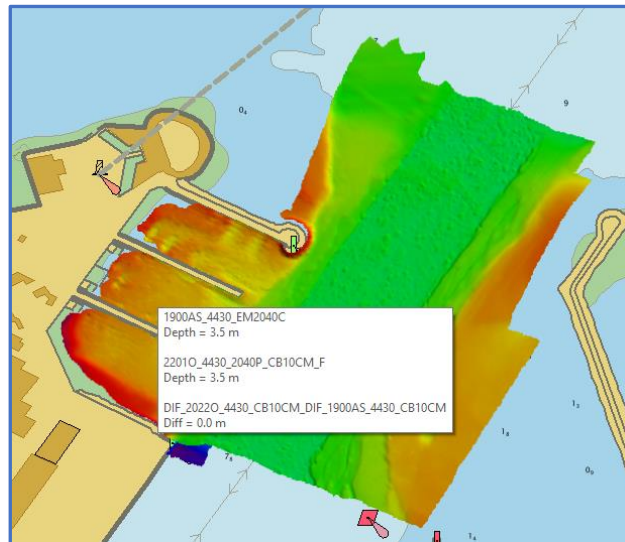


Figura 44. Diferencia entre datos 2019 y datos VERIL 01(II)

4. Conclusiones.

4.1. Uso RPAS.

Disponer de un RPAS con capacidad de realizar vuelos fotogramétricos y toma de datos mediante un sensor LIDAR ha dado al IHM una mayor autonomía a la hora de obtener información que actualice la cartografía náutica. Lo mismo ocurre con la cámara multispectral, con la que se espera una vez procesado los datos, obtener batimetría derivada de las imágenes multispectrales.

Hay que destacar los siguientes aspectos.

- **Precisión:** los valores de GSD de los vuelos realizados son mucho más pequeños que los empleados en los vuelos fotogramétricos que realiza el CECAF con la cámara “ULTRACAM EAGLE MARK 2”, (20-25 cm/píxel); este hecho hace que la precisión de los datos sea muy buena. Con valores tan bajos de GSD, la localización e interpretación de objetos resulta más factible que con los vuelos del CECAF. Como contrapartida, la extensión de los vuelos será mucho menor en comparación con los vuelos realizados por el Ejército del Aire.

- Vuelos: uno de los datos para tener en cuenta es el peso (tamaño) de los vuelos, ya no sólo por los datos brutos en sí, sino también por el peso que tendrán los productos generados posteriormente. Por ello, es muy importante planificar bien el solape transversal (lateral). No es necesario un valor muy alto (70%), sino que con valores que oscilen entre 55-65% serán suficientes ya que proporcionarán la precisión adecuada.

Lo mismo ocurre con la altura de los vuelos, partiendo de que la altura máxima permitida es de 120m, la diferencia entre realizar un vuelo a 80 o 100m en cuanto a precisión es ínfima, ya que la diferencia entre los valores de GSD es de 1 a 1.25 cm/píxel respectivamente. Sin embargo, el volumen de los datos brutos es mucho menor.

Cuando se planifica el vuelo se puede determinar el número de líneas y el número de fotografías, por lo que se puede estimar cuánto pesará el vuelo a priori. Dependiendo del resultado se podrán modificar los parámetros del vuelo para que el resultado sea óptimo.

Resumiendo, realizar vuelos a mayor altura tiene las siguientes ventajas:

- El RPAS tiene que recorrer menos distancia, por lo que la duración del vuelo también será menor.
 - Se tomará menor número de fotografías, por lo que el peso del vuelo (GB) será menor y consecuentemente el tiempo de procesado también será menor.
- Imágenes multiespectral: con el empleo de estas imágenes se tendrá la capacidad de poder obtener batimetría derivada; hasta ahora se habían efectuado pruebas con imágenes satélite, de peor resolución que las obtenidas con la cámara Micasense RED-EDGE MX.
 - Para poder realizar vuelos con el RPAS es necesario que el operador disponga de la titulación exigida en las FAS, por lo que será conveniente disponer de un plan de formación de manera que en un breve periodo de tiempo haya un número considerable de operadores.

4.2. Uso USV.

- Con este tipo de plataformas el IHM será capaz de obtener datos batimétricos en zonas donde otro tipo de embarcaciones no pueden acceder y actuar en entornos sensibles.
- A diferencia del estudio realizado por Specht (referencia «q»), donde los datos obtenidos mediante USV no coinciden con los representados en la carta náutica, la calidad de los datos batimétricos adquiridos es similar a la obtenida mediante otros sensores.
- Con las características de este tipo de sistemas, volumen y requerimientos logísticos, el IHM tiene la capacidad de desplegar un equipo hidrográfico en poco tiempo allá donde sea necesario.
- Debido a la poca altura del USV, es posible que en ciertas zonas pierda la recepción de correcciones diferenciales RTK. Para solventar este problema, se plantean dos posibles soluciones, una, la instalación de antenas receptoras con mayor altura respecto a la plataforma, segunda, procesar los datos en modo PPK con los ficheros de la estación base más cercana.
- No existe, hoy en día, normativa que regule el uso de este tipo de plataformas en la mar, es por ello fundamental que el USV disponga de un medio de transmitir su posición y trayectoria para que otras embarcaciones en la zona puedan detectarlo. Esto se puede conseguir sustituyendo el actual AIS receptor que tiene por otro transmisor/receptor.