



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Estructura de ensamble de datos georreferenciados y no  
referenciados a través de optimización de estrategias  
fotogramétricas SFM-MVS: aplicaciones en cuerpos de  
agua superficiales**

Tesis que presenta  
**Fermín Villalpando Tovalín**

Para obtener el grado de  
**Doctor en Geociencias Aplicadas**

**Directores de la Tesis:**  
**Dr. José Tuxpan Vargas**  
**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

San Luis Potosí, S.L.P., enero de 2022



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estructura de ensamble de datos georreferenciados y no referenciados a través de optimización de estrategias fotogramétricas SFM-MVS: aplicaciones en cuerpos de agua superficiales**” presentada para obtener el Grado de Doctor(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Fermín Villalpando Tovalín** y aprobada el día de mes de año por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Director

---

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Director

---

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**  
Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Ana Elizabeth Marín Celestino**  
Miembro del Comité Tutorial

---

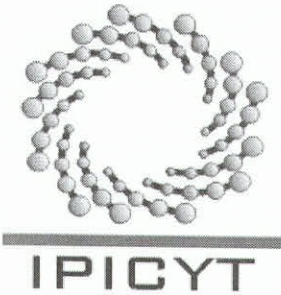
**Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en el laboratorio de geomática y modelación numérica de la División Geociencias Aplicadas, del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Tuxpan Vargas, y del Dr. José Alfredo Ramos Leal

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (596134) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 024 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 25 días del mes de enero del año 2022, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dra. Ana Elizabeth Marín Celestino</b>	<b>Secretaria</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Clemente Rodríguez Cuevas</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UASLP</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**DOCTOR EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Fermín Villalpando Tovalín**

sobre la Tesis intitulada:

*Estructura de ensamble de datos georreferenciados y no referenciados a través de optimización de estrategias fotogramétricas SFM-MVS: aplicaciones en cuerpos de agua superficiales*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
**Dr. José Alfredo Ramos Leal**


El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 17:40 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 25 días del mes de enero de 2022.

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



**IPICYT**  
SECRETARÍA ACADÉMICA  
INSTITUTO POTOSINO DE  
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
Y TECNOLÓGICA, A.C.

## Dedicatorias

*A mi madre, que siempre me brindó su apoyo incondicional, amor y comprensión, gracias a los cuales he podido superar los obstáculos de la vida y alcanzar mis objetivos y metas.*

*A la memoria de mi padre y hermano, que con su ejemplo de trabajo constante y perseverancia, me inspiraron para no darme por vencido a pesar de las adversidades*

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Que a través de la División de Geociencias Aplicadas me permitieron realizar mis estudios de Doctorado.

Agradezco de manera especial al Dr. José Tuxpan Vargas por su valiosa dirección y asesoría durante la realización de este proyecto de investigación, por su constante disposición y apoyo para la culminación exitosa del mismo.

Mi profundo agradecimiento a mi asesor, el Dr. José Alfredo Ramos Leal por su importante labor, en la dirección del presente trabajo de investigación, por su constante asesoría y apoyo.

A los miembros de mi comité tutorial, cuyas acertadas observaciones contribuyeron de manera imprescindible a la mejora del presente trabajo.

Al grupo de trabajo del Laboratorio de Geomática y Modelación Numérica, valiosos compañeros y amigos.

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
Anexos	xii
Glosario	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvi
CAPÍTULO 1	
Generalidades	
1.1 Generalidades	1
1.2 Fundamentos teóricos	1
1.3 Descripción del estado del arte	4
1.4 Planteamiento del problema	7
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo general	8
1.5.2 Objetivos secundarios	8
1.6 Antecedentes de implementación	9
1.7 Consideraciones	12
CAPÍTULO 2	
Marco teórico	
2.1 Sensores pasivos y activos	15
2.2 Captura de imagen e instrumentación	16
2.3 Principios básicos de captura de luz	17
2.4 Sensores ópticos y cámaras digitales	20
2.4.1 Sensor CCD	21
2.4.2 Sensor CMOS	22
2.5 Principios de Sonar	23
2.6 Sensores Acústicos	24
2.7 Plataformas	28
2.8 Datos multidimensionales	33
2.9 Fusión de datos	34

CAPÍTULO 3	
Materiales y métodos.	
3.1 Cámara multiespectral sumergible	35
3.2 Cámara multiespectral aérea	36
3.3 Sensor acústico	36
3.4 métodos de calibración ópticos	39
3.4.1 Modelos de calibración extendidos	39
3.5 Cámara multiespectral sumergible (calibración y pruebas)	41
3.6 Muestreos preliminares	42
3.6.1 Integración de plataforma acuática	42
3.6.2 Método de Captura	43
3.7 Prueba de segmentación y detección de objetos	44
CAPÍTULO 4	
Metodología	
4.1 Enfoque metodológico	47
4.2 Fusión de datos heterogéneos	47
4.3 Integración de sensores y plataformas	49
4.4 Estandarización de datos	50
4.5 Métodos SFM-MVS	52
CAPÍTULO 5	
Resultados	
5.1 Estrategias reconstrucción 3D	55
5.2 Generación del modelo virtual	56
5.3 Validación de Resultados	58
5.4 Fusión de datos	59
5.5 Casos de aplicación	61
5.5.1 Manantial Los Peroles	62
5.5.2 Lago de Camécuaro, Michoacán	70
CAPÍTULO 6	
6.1 Conclusiones	77
6.2 Nuevas perspectivas de investigación	78
Bibliografía	87



## **Lista de tablas**

Tabla 1. Regiones y límites del espectro electromagnético	2
Tabla 2. Luminancia producida por distintas fuentes	18
Tabla 3. Resumen del control de calidad cada plataforma debido al tipo de datos recolectados.	66
Tabla 4. Control de calidad de los dispositivos UAV ala fija y USV.	72

## Lista de figuras

Figura 1. Espectro electromagnético	2
Figura 2. Ejemplo de estudio multi-plataforma (satélite, uav, usv) y multi-sensor en ambientes complejos con interacciones agua-tierra.	7
Figura 3. Diagrama de flujo de la información recogida e interoperabilidad.	10
Figura 4. Esquema de generación y refuerzo de datos espaciales adquiridos con un dron con información geofísica/geológica.	11
Figura 5. Espacio de color CIELAB de 1976	20
Figura 6. Esquema de una cámara con sensor CMOS, con sus componentes principales.	22
Figura 7. Relación una onda con la cantidad de energía acústica que transporta.	24
Figura 8. Funcionamiento normal de un sonar y ecosonda multi-haz.	27
Figura 9. Esquema ilustrativo de las plataformas aéreas en función de su altitud de operación y área de cobertura.	29
Figura 10. Cuadro ilustrativo de clasificación de los UAV.	31
Figura 11. Esquema de plataformas marinas y sumergibles.	32
Figura 12. Componentes involucrados en el sistema de comunicación, localización, guiado y control típicos de un bote no tripulado USV.	33
Figura 13. Principales características del sensor sumergible	35
Figura 14. Sensor de plataforma aérea	36
Figura 15. Resumen de características del sistema de sensor acústico, y dispositivos.	37
Figura 16. Esquema control con línea de vista (LOS)	38
Figura 17. Pruebas en ambiente controlado: recorrido en laboratorio, plataforma de arrastre, y acuario de prueba de ambiente acuático.	41
Figura 18. Plataforma motorizada flotante.	42
Figura 19. Escenarios de calibración de sensor óptico aéreo sobre cuerpos de agua.	43
Figura 20. Procedimiento de captura de información a partir de secuencia de video.	44
Figura 21. Esquema del procedimiento de segmentación en sus 3 etapas principales.	45
Figura 22. Esquema metodológico propuesto para la fusión de información heterogénea y multiplataforma.	48
Figura 23. Cuadro comparativo de metodologías utilizadas en el estudio. con representación del escenario de aplicación y las diferentes etapas de cada método asociado a su respectiva plataforma UAV-USV.	49

Figura 24. Características principales del sensor aerotransportado y diagrama simplificado de la plataforma remota con el sensor sumergible.	50
Figura 25. Alteraciones en la superficie del agua Inducida por la plataforma flotante.	51
Figura 26. Comparativa de 2 de trayectorias de navegación dependiendo de la geometría del área de muestreo.	52
Figura 27. Diagrama de flujo del proceso de captura, procesamiento y flujos de trabajo para la generación de modelos geométricos y reconstrucción.	53
Figura 28. Tabla que contrasta los resultados de la reconstrucción 3D en relación con el flujo de trabajo utilizado para la reconstrucción 3D (supervisada y no supervisada) y a la plataforma utilizada (UAV-USV)	56
Figura 29. Vista superior del área de estudio y trayectoria geométrica calculada a partir de SFM supervisado.	57
Figura 30. En esta figura se muestra el resultado de la comparación de las nubes de puntos obtenidas a partir de los datos UAV-USV.	59
Figura 31. Reconstrucción obtenida a partir de la fusión de las técnicas SFM y fotogrametría digital aérea de cada una de las plataformas UAV-USV.	60
Figura 32. Vista panorámica del manantial y zona exterior.	62
Figura 33. Esquema de integración de plataformas y sensores para el caso de estudio.	63
Figura 34. Esquema de toma de muestras por sensor/plataforma.	65
Figura 35. Vista en perspectiva de cada una de las nubes de puntos obtenidas según el sensor y plataforma utilizados.	68
Figura 36. Ensamble de las tres nubes de puntos en un solo modelo de reconstrucción.	69
Figura 37. Detalle del área de estudio área de estudio con los dispositivos usados para el levantamiento.	71
Figura 38. Visualización lado a lado de los modelos de reconstrucción batimétrico por USV y nube de puntos del UAV.	73
Figura 39. Detalle del resultado del acople de las dos reconstrucciones en 3D, se muestra la batimetría en perspectiva dado que se encuentra bajo la línea de los árboles modelados.	74

## **Anexos**

1. Casco y sistema de potencia	79
2. Información técnica del perfilador de velocidad de sonido	81
3. Características técnicas de la ecosonda utilizada	83
4. Mapa de batimetría, versiones preliminares del proyecto de conservación del lago de Camécuaro CONANP, Michoacán.	83
5. Mapa de corrientes, versiones preliminares del proyecto de conservación del lago de Camécuaro CONANP, Michoacán	84
6. Artículo Publicado	85

## Glosario

**ADC.** Dispositivo capaz de convertir señales analógicas en señal digital, con el propósito de facilitar su procesamiento (codificación, compresión, etcétera) y hacer la señal resultante (digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.

**ADCP.** Un perfilador de corriente Doppler acústico (ADCP) es un medidor de corriente hidroacústica similar a un SONAR, que se utiliza para medir las velocidades de la corriente del agua en un rango de profundidad utilizando el efecto Doppler de las ondas sonoras dispersadas desde las partículas dentro de la columna de agua.

**CCD.** Un dispositivo de carga acoplada (CCD) uno de los elementos principales de las cámaras fotográficas y de video digitales. En estas, el CCD es el sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen. Desde allí la imagen es procesada por la cámara y registrada en la tarjeta de memoria.

**CMOS.** Semiconductor complementario de óxido metálico es un tipo de conjunto de transistores empleados en la fabricación de circuitos integrados en la actualidad, como microprocesadores y memorias, cámaras digitales etc.

**DRONE.** Forma más habitual de llamar a los vehículos aéreos no tripulados, si bien el termino de dron (dron en español) se originó en el ámbito militar, se popularizo en el ámbito civil cuando estos dispositivos estuvieron disponibles comercialmente.

**ERT.** Tomografía de resistividad eléctrica (ERT) es una técnica geofísica que permite obtener imágenes de las estructuras del subsuelo a partir de las mediciones de resistividad eléctrica realizadas en la superficie mediante electrodos.

**GPS.** Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sistema de navegación y localización satelital. Fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y permite, a través de una red de 24 satélites, indicar la posición de un objeto en la superficie terrestre con gran precisión.

**LIDAR.** Es un dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la detección de la señal reflejada. Este dispositivo es ampliamente usado en geología, sismología y física de la atmósfera.

**LOS.** Normalmente conocida como ley de guiado por la línea de vista (Line of Sight), es un método ampliamente utilizado para calcular trayectorias de referencia de rumbo, para aplicaciones de seguimiento de trayectorias de vehículos marinos.

**MVS.** Es una técnica de reconstrucción tridimensional a partir de imágenes bidimensionales calibradas. Y obtiene su nombre de los programas informáticos que utilizan la técnica de procesamiento de imágenes multi-visión estéreo, para generar modelos 3D a partir de una nube de puntos.

**RGB.** Modelo de color formado por los tres componentes de colores primarios (Red, Green, Blue). El modelo RGB se basa en la suma aditiva de color, donde empleando la intensidad del rojo, el verde y el azul en diferentes proporciones, se produce el resto de los colores.

**RPAS.** Del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*, hace referencia a un vehículo operado a control remoto, es un término análogo y muy poco usado al de vehículo no tripulado UAV.

**SFM.** Es una técnica de imagen fotogramétrica por alcance, usada para estimar estructuras tridimensionales a partir de secuencias de imágenes bidimensionales. Construir una estructura a partir del movimiento presenta un problema similar al de encontrar la estructura a partir de la multivisión estereoscópica (MVS). En ambos casos, hay que encontrar la correspondencia entre las imágenes y la reconstrucción del objeto 3D.

**SONAR.** Es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua principalmente para navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos.

**TLS.** El escaneo láser terrestre (TLS) es un método de imagen activo basado en tierra que adquiere rápidamente nubes de puntos 3D densas y precisas de superficies de objetos mediante telémetro láser.

**UAS.** El término sistema de aeronaves no tripuladas (UAS) fue adoptado por el departamento de defensa de los Estados Unidos, este término subraya la importancia de otros elementos además de la aeronave. Incluye elementos como estaciones de control en tierra, enlaces de datos y otros equipos de apoyo.

**UAV.** Hace referencia a una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejerce su función de manera remota, este término hace referencia a una plataforma reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de combustión, eléctrico o de reacción.

**USV.** Son embarcaciones o buques que operan en la superficie del agua sin tripulación. Estos vehículos operan con varios niveles de autonomía, desde el simple control remoto, hasta la navegación autónoma.

**VES.** Es un método geofísico para la prospección de un medio geológico. El método se basa en la estimación de la conductividad eléctrica o resistividad del medio. La estimación se realiza a partir de la medición de la tensión del campo eléctrico inducido por electrodos distantes conectados a tierra.

# Resumen

## **Estructura de ensamble de datos georreferenciados y no referenciados a través de optimización de estrategias fotogramétricas SFM-MVS: aplicaciones en cuerpos de agua superficiales**

Vivimos en una era digital donde se tienen una cantidad basta de datos adquiridos de múltiples sensores y plataformas. Los datos por su propia naturaleza son heterogéneos entre si ya sea espacial, espectral o temporalmente, haciendo muy compleja la integración de los mismos. Esto es particularmente complejo cuando se trata de datos sin orientación espacial, que, a pesar de contener información valiosa, al no contar con una georreferencia adecuada, la tarea de integrar dichos datos implica un reto todavía mayor.

En este trabajo se propone un enfoque de fusión de datos para el monitoreo y caracterización de masas de agua superficiales combinando: a) vehículos de superficie no tripulados (USVs), b) vehículos aéreos no tripulados (UAVs), c) sensores ópticos aéreos y sumergibles, d) sensores acústicos y e) instrumentos de perfilado de sonido en el agua. Como parte del proceso de integración y procesamiento de los datos se implementaron técnicas de segmentación de objetos para el seguimiento e identificación de la fauna subacuática, acompañadas de técnicas basadas en el movimiento (SFM) y estereofotogrametría multi vista (MVS) para la reconstrucción 3D. Los resultados obtenidos permiten recrear modelos morfológicos de las zonas de estudio/prueba acoplando toda la información existente por encima y por debajo del espejo de agua. La resolución espacial obtenida es centimétrica y posee la calidad idónea que permite contemplarla como una opción adecuada para el mapeo submarino, seguimiento y mediciones tridimensionales de las masas de agua superficiales. La precisión de los modelos generados y sus mediciones físicas están del orden del centímetro para ello se generaron y utilizaron las diversas nubes de puntos a partir de los videos/fotogramas/mediciones de los sensores disponibles aumentando la densidad de puntos a través de la redundancia de datos.

### **PALABRAS CLAVE.**

Fusión de datos, sensores submarinos, UAV, vehículo aéreo no tripulado, USV, vehículo de superficie no tripulado, SFM, MVS, cartografía submarina.

## Abstract

Structure of georeferenced and non-georeferenced data assembly through optimization of SFM-MVS photogrammetric strategies: applications in surface water bodies.

We live in a digital age in which we have a vast amount of data acquired from multiple sensors and platforms. These data, by their own nature, are heterogeneous, either spatially, spectrally, or temporally, which makes their integration very complex. This is especially complex when dealing with non-spatially oriented data, which despite containing valuable information, without proper georeferencing, the task of integrating such data is even more challenging.

In this work, we propose a data fusion approach for monitoring and characterizing surface water bodies by combining: a) unmanned surface vehicles (USVs), b) unmanned aerial vehicles (UAVs), c) airborne and submersible optical sensors, d) acoustic sensors, and e) aquatic sound profiling instruments. As part of the data integration and processing process, object segmentation techniques were implemented for tracking and identification of underwater fauna, accompanied by motion-based techniques (SFM) and multi-view stereophotogrammetry (MVS) for 3D reconstruction. The results obtained make it possible to recreate morphological models of the study/test areas by coupling all the existing information above and below the water mirror. The spatial resolution obtained is in the order of centimeters and has an ideal quality that allows it to be considered as a suitable option for underwater mapping, monitoring and three-dimensional measurements of surface water bodies. The accuracy of the generated models and their physical measurements is in the order of centimeters. For this purpose, the various point clouds were generated and used from the available sensor videos/photograms/measurements, increasing the point density through data redundancy.

### KEY WORDS.

Data fusion, underwater sensors, UAV, unmanned aerial vehicle, USV, unmanned surface vehicle, SFM, MVS, underwater mapping.



# Capítulo 1

## Generalidades

### 1.1 Generalidades

La percepción remota se define como la adquisición de información sobre un objeto sin estar en contacto físico con él. La información se adquiere detectando y midiendo los cambios que el objeto manifiesta en el campo circundante, ya sea electromagnético, acústico o potencial.

Puede tratarse de un campo electromagnético emitido o reflejado por el objeto, de ondas acústicas reflejadas o perturbadas por el objeto, o de perturbaciones del campo de gravedad o de potencial magnético circundante debidas a la presencia del objeto.

El proceso de detección inicia en el momento que existe una fuente de energía que ilumine o irradie energía al objeto o zona de interés.

La energía viaja entonces desde su fuente hasta el objetivo, en el proceso esta puede entrar en contacto con distintos elementos como por ejemplo la atmosfera, y sucede en ambas direcciones.

Después de que la energía haya sido dispersada por el objetivo o emitida por él, necesitamos un sensor para recolectar y registrar la radiación electromagnética u onda detectada. La energía registrada por el sensor se trasmite o almacena en una estación de recepción y/o procesamiento donde los datos son almacenados y procesados.

La información procesada entonces se interpreta con algún método adecuado, usualmente mediante procesos informáticos para extraer información sobre el objetivo que fue sensado. Para finalmente mediante la información obtenida caracterizar algún objeto o comprender de mejor manera un determinado fenómeno.

### 1.2 Fundamentos teóricos

El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es el medio por el que se transmite la información desde un objeto hasta el sensor a través de un campo eléctrico y/o magnético emitido, transmitido o reflejado. La interacción de las ondas electromagnéticas con el entorno depende en gran medida de la longitud de onda y de las propiedades geométricas, eléctricas, magnéticas y conductoras del medio que interactúa (Marzano, 2014).

La forma más conocida de la energía electromagnética es la luz visible, esta energía constituye sólo una parte pequeña de todo el espectro electromagnético, como se observa en la Figura 1 los segmentos más grandes de este espectro se encuentran fuera del alcance de la visión humana y requieren de otros medios para ser detectada.

En términos generales se conoce como espectro electromagnético al conjunto de todos los tipos de ondas electromagnética y su distribución con respecto de su longitud de onda. Estas ondas de energía viajan y se propagan a medida que penetran en el medio. La luz visible que emana del sol es una onda electromagnética, del mismo modo que las ondas de radio que salen de una emisora de radio. Los tipos de radiación electromagnética que componen el espectro electromagnético son los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio.

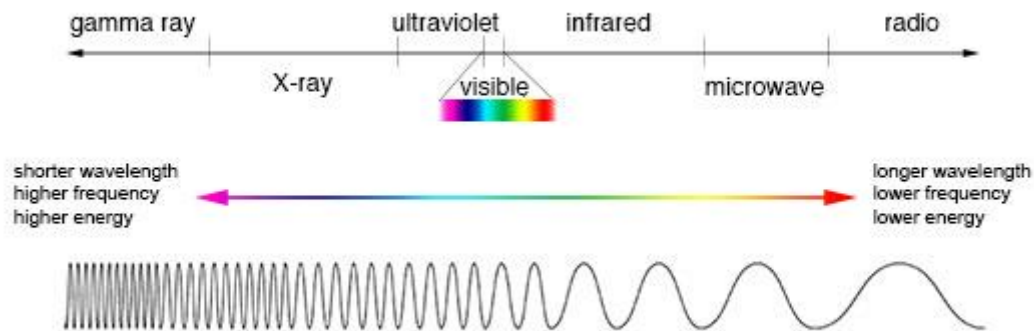


Figura 1. Espectro electromagnético, créditos: NASA <https://imagine.gsfc.nasa.gov/>.

Las técnicas de percepción remota normalmente parten de la región ultravioleta del espectro, por lo que en este trabajo no mencionaremos detalladamente las energías de longitud de onda corta que se encuentra por debajo de esta región, como los rayos X y los rayos gamma (Barrett & Curtis, 1976).

Tabla 1. Regiones y límites del espectro electromagnético.

Región	Límites
Rayos gamma	< 0.03 nm
Rayos x	0.03–300 nm
Radiación Ultravioleta	0.30–0.38 $\mu$ m
Luz visible	0.38–0.72 $\mu$ m
Radiación Infrarroja	0.72nm-1,000 $\mu$ m (1 mm)
Microondas	1 mm–30 cm
Radio	$\geq$ 30 cm

## **Espectro ultravioleta**

La luz ultravioleta tiene longitudes de onda más cortas que la luz visible, por lo que no es posible verla con el ojo humano, es una fuente de todo el espectro de radiación ultravioleta, que se suele subdividir en ultravioleta cercano y el ultravioleta lejano. La radiación ultravioleta cercana es conocida por su capacidad de inducir fluorescencia, emisión de radiación visible, en algunos materiales; tiene importancia para una forma especializada de percepción remota(Wang et al., 2010).

## **Espectro visible**

Los límites del espectro visible están definidos por la sensibilidad del sistema visual humano. Las propiedades ópticas del espectro visible fueron investigadas por primera vez por Isaac Newton, quien realizó experimentos que revelaron que la luz visible puede dividirse en tres segmentos. Hoy conocemos estos segmentos como los primarios, definidos aproximadamente de 0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ , de 0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$  y de 0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ . Los colores primarios (RGB) se definen de manera que ningún primario pueda formarse a partir de una mezcla de los otros dos, a la vez que el resto de los colores pueden obtenerse de la mezcla de los tres primarios.

## **El espectro infrarrojo**

Las longitudes de onda más largas que la parte roja del espectro visible se denominan región infrarroja es muy amplio en relación con la región visible, se extiende desde 0,7 hasta 15  $\mu\text{m}$ , es decir, es más de 40 veces más amplio que el espectro de la luz visible.

A esta zona del espectro se le puede dividir en dos categorías importantes; la primera abarca el Infrarrojo cercano e Infrarrojo medio. La radiación en la región del infrarrojo cercano se comporta, con respecto a los sistemas ópticos, de manera análoga a la radiación en el espectro visible.

La segunda categoría de radiación infrarroja es la región del infrarrojo lejano, que consiste en longitudes de onda mucho más allá del visible, que se extienden a regiones que bordean la región de las microondas. Mientras que la radiación del infrarrojo cercano es esencialmente radiación solar reflejada por la superficie de la Tierra, la radiación del infrarrojo lejano es emitida por la Tierra. En términos más sencillos, el infrarrojo lejano consiste en formas de "calor" o "energía térmica". A veces, esta parte del espectro se denomina "infrarrojo emitido".

## **Microondas y radio**

Las microondas son una región que se encuentra en el extremo de mayor frecuencia del espectro, de 1 mm a 1 m aproximadamente. En su parte más corta tiene propiedades similares a la región del infrarrojo térmico, mientras que las longitudes de onda más largas se aproximan a las utilizadas para las emisiones de radio. Las microondas pueden penetrar la niebla, la lluvia y nieve y son una gran herramienta para la observación de la superficie terrestre desde el espacio.

### **1.3 Descripción del estado del arte**

Desde los albores de la historia el ser humano ha tenido la necesidad de medir los fenómenos naturales de su entorno en un principio el ser humano estaba limitado por sus propios sentidos es decir la información que podría captar con los sentidos de su propio cuerpo, es decir su vista su tacto su olfato, gusto y oído. Con el avance de la civilización y el desarrollo de nuevas herramientas, el ser humano fue perfeccionando sus métodos para percibir el mundo y de ahí fue capaz de sentir o percibir de manera exitosa las características físicas más básicas del ambiente. La primera característica que se logró medir de manera exitosa fue en la temperatura, originalmente el ser humano se limitaba a observar los efectos de la temperatura (frio o calor) sobre diferentes objetos y materiales, hasta que eventualmente desarrolló la primera herramienta que le permitió medir de manera precisa la temperatura. Este primer instrumento fue conocido como termoscopio, y fue desarrollado por Galileo en el siglo XVI (Taylor, 1942). Este dispositivo considerado el predecesor del termómetro consistía en un tubo de vidrio con diferencias en sus extremos. Un extremo estaba compuesto por una esfera cerrada herméticamente, mientras que el otro lado se encontraba abierto y se sumergía boca abajo dentro de una mezcla de alcohol y agua mientras la esfera quedaba en la parte superior, conforme se calentaba el líquido, este subía por el tubo, evidenciando el efecto de la temperatura sobre dicho líquido. Mediante este primer dispositivo fue posible observar los cambios de temperatura que ocurrían en el ambiente; sin embargo, no se contaba con una medida o escala de referencia para calcular la temperatura observada con dicho instrumento al momento de su desarrollo.

Tradicionalmente el tipo de energía que se podía detectar y medir correspondía a la radiación electromagnética proveniente del sol; más específicamente la luz visible y la energía infrarroja que produce calor, y que es absorbida por distintos objetos en la superficie terrestre. El avance tecnológico permitió desarrollar técnicas e instrumentos de medición enfocados hacia la detección de otras formas de energía en distintos medios, como por ejemplo; la propagación del sonido en el agua (Cohen, 2000).

De esta manera fue como el ser humano paso de la observación con sus ojos y sus otros sentidos a los primeros instrumentos para medir la temperatura y posteriormente al desarrollo de otro invento revolucionario: el telescopio.

De la descomposición de la luz en un prisma hasta el advenimiento de la fotografía, el radar y el sonar entre otros. Asimismo, la necesidad de transportar dichos instrumentos creció de manera paralela, se pasó de portar el instrumento en mano a instalarse en espacios que permitieran mejorar su precisión y alcance; eventualmente fueron montados en cometas, embarcaciones, globos aerostáticos. Posteriormente se instalaron en los primeros aeroplanos y eventualmente en cualquier otro espacio donde la necesidad y creatividad lo permitieran, dándose de manera natural la estrecha relación entre el sensor y plataforma.

Con el desarrollo de la electrónica, el desarrollo de estas tecnologías crece de manera exponencial, haciendo que éstas se volvieran indispensables en muchos ámbitos de las actividades humanas, y pasando eventualmente de su pasado puramente militar al ámbito civil. De forma similar, la percepción remota se consolidaba como un campo de estudio formal con amplias expectativas.

Sí bien el estudio histórico respecto al desarrollo de sensores y plataformas puede resultar interesante, es conveniente abordarlo desde el momento en el que la percepción remota se convirtió en una disciplina ampliamente estudiada. Lo que coincide con la aparición de los primeros satélites para observación de la tierra en la década de 1960(Campbell & Wynne, 2011) Estas primeras plataformas eran capaces de llevar cámaras fotográficas, y eran ideales para detectar características de la superficie terrestre, cómo podrían ser cuerpos de agua, líneas carreteras y de ferrocarril, arcos volcánicos, flujos de lava, entre muchas otras características que estas primeras cámaras permitían.

Estas primeras imágenes resultaron ser de gran valor para aplicaciones geológicas, cartográficas y otras áreas afines; sin embargo, la fotografía espacial presentaba limitantes propias del tipo de sensor, cómo es la dependencia de la luz del sol para el registro de información, quedando en evidencia la necesidad de desarrollar sensores que no dependieran de la emisión de energía natural, es decir que no se comportarán de manera pasiva a las condiciones naturales. La alternativa se dio mediante la implementación de otros tipos sensores, separando a partir de entonces a los sensores en dos categorías que conocemos hasta la fecha cómo sensores pasivos y activos(Guo et al., 2016).

La era moderna de la percepción remota se puede considerar que inicia en 1972 con el lanzamiento de satélite Landsat-1, que no sólo marcó el inicio de la era del satélite comercial, sino que también dio el gran impulso a la percepción remota como disciplina científica(Lulla et al., 2012), con los consecuentes avances

tecnológicos, y las crecientes capacidades de la informática, se desarrollaron a la par nuevas técnicas de procesamiento de información.

Hoy en día se dispone con una gran diversidad de sensores. Los sensores ópticos multiespectrales e hiperespectrales han evolucionado considerablemente en las últimas dos décadas (Bioucas-Dias et al., 2013) los basados en tecnología LiDAR(Light Detection and Ranging) y sus nuevas técnicas de fusión de datos se presentaron en 2015 (Khodadadzadeh et al., 2015) Los de radar de apertura sintética SAR, se han usado ampliamente sobre la superficie terrestre. Sin embargo, para alcanzar las profundidades de océanos ríos y lagos, sensores acústicos y SONAR(Sound Navigation And Ranging) son la tecnología más eficiente bajo la superficie acuática. Esta gran variedad de ambientes con características únicas requiere en la misma medida de una amplia variedad de sensores y plataformas capaces de transportarlos. La disponibilidad de estas plataformas ha ido aumentando con el tiempo, de tal modo que ambas tecnologías se complementan. Sensores cada vez más avanzados, livianos y resistentes permiten ser instalados en plataformas que antes no podían trasportarlos.

Por otro lado, los vehículos y plataformas que transportan estos sensores aumentan constantemente en número; así como en las capacidades que ofrecen. Durante mucho tiempo las aeronaves fueron la plataforma ideal para llevar sensores ópticos, más adelante sensores acústicos aparecieron en embarcaciones. El desarrollo de los vuelos espaciales hizo posible superar la barrera atmosférica de la tierra permitiendo poner en órbita satélites. Recientemente, se destaca el desarrollo de plataformas autónomas no tripuladas, como los dispositivos aéreos no tripulados (UAV) que son ampliamente utilizados(Watts et al., 2012). La creciente oferta de estas tecnologías ha reducido su precio permitiendo que estén al alcance de cada vez más usuarios, que han encontrado en las plataformas no tripuladas una alternativa a los costos, inconvenientes o peligros que pueden presentarse con las plataformas tradicionales operadas por personas(Carrivick et al., 2013). Ya que cuentan con facilidad de ser desplegados en distintos ambientes, y con la capacidad de desplazarse o mantenerse estacionarias según las necesidades de la operación. Pueden llevar a bordo diferentes sensores y permiten la observación en áreas donde vehículos tripulados no lo permiten.

Y así hasta la actualidad en la que nos encontramos en la era de las tecnologías de la información y la comunicación, el internet de las cosas y la ciencia de datos. Estos avances están revolucionando la manera en que percibimos el mundo y marcando la pauta a una digitalización del entorno, nuestros dispositivos móviles de uso cotidiano capturan imágenes y videos, integran módulos GPS y podómetros, registran datos de temperatura y presión ambiental, fuerzas magnéticas e incluso son capaces de registrar información biométrica como huellas dactilares o ritmo cardíaco, al mismo tiempo que permanecen conectados con otros dispositivos y a

internet. Las casas y los automóviles inteligentes se vuelven más habituales con el paso del tiempo; así mismo la cantidad de tecnologías en diferentes ambientes urbanos permiten obtener información valiosa para una mejor administración de las ciudades y administrar los recursos de manera eficiente. Así se acuña el termino Smart City, que hace referencia a una ciudad que usa un conjunto de herramientas tecnológicas que permiten el crecimiento planeado y ordenado de las ciudades(Trubka et al., 2016), mejorar el confort , seguridad, movilidad, salud y bienestar de sus habitantes (Pik et al., 2019).

#### 1.4 Planteamiento del problema

Los trabajos de sensado remoto actuales suelen realizarse en ambientes heterogéneos más complejos, áreas donde los cuerpos de agua con distintas características de profundidad y condiciones del medio interactúan con diferentes tipos de suelo y vegetación. Para la conocer de mejor manera las características de estos ambientes en la actualidad se cuenta con distintos sensores activos y pasivos, que pueden estar instalados en plataformas aéreas y/o flotantes, según las necesidades del estudio. En la Figura 2 se observa un ejemplo ilustrativo de este tipo de aplicación en sitios con presencia de cuerpos de agua, distintos tipos de terreno y vegetación.

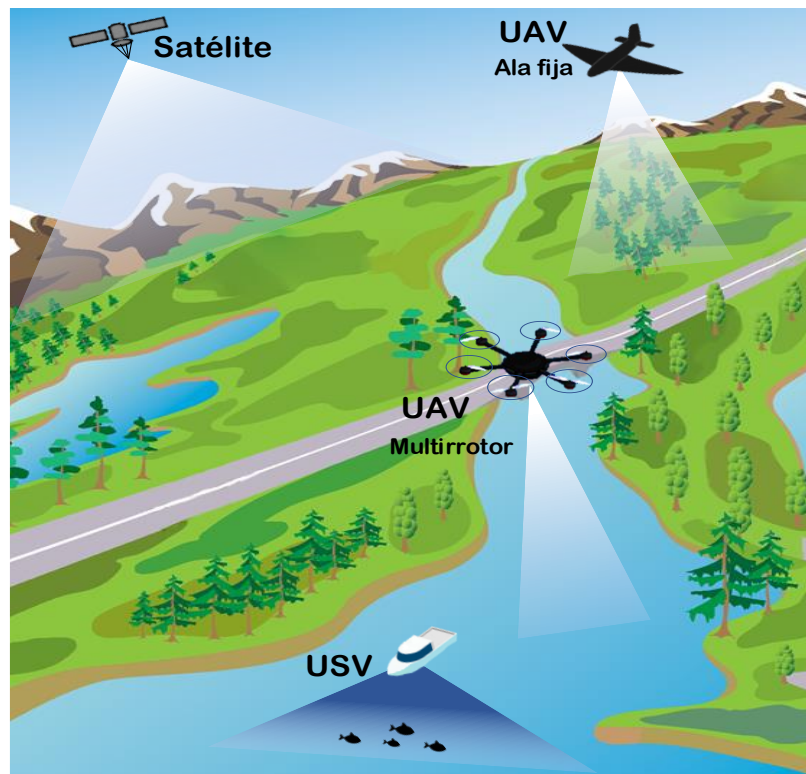


Figura 2. Ejemplo de estudio multi-plataforma (satélite, UAV, USV) y multi-sensor en ambientes complejos con interacciones agua-tierra.

La morfología sobre y bajo la superficie del agua es un elemento importante de observar, por ejemplo; para detectar la presencia de manantiales sumergidos, cavidades, elementos artificiales y naturales sumergidos, inspección de infraestructuras e incluso el seguimiento de fauna y/o vegetación subacuática.

Sin embargo, es importante tener una buena apreciación de las interacciones materia-energía y la propagación de la energía en el medio, ya que tienen un impacto en la precisión de la información adquirida. Las ondas electromagnéticas se ven afectadas por la interacción con diferentes medios, estas ondas se propagan a través de cualquier material dieléctrico incluyendo el aire, pero no lo hacen bien a través de los materiales conductores, ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material disipando con rapidez la energía de las ondas. Si hablamos del medio acuático hay que considerar la manera en que se absorbe o dispersa la luz incidente a lo largo de la columna de agua. En este escenario los sensores basados en la radiación de microondas no son adecuados penetrar adecuadamente el medio acuático. Los basados en la detección y alcance de la luz son más eficientes en el agua. Las imágenes obtenidas desde satélites son ampliamente usadas aunque su calidad depende de las condiciones del agua y la luz (Gao, 2009).

Los sensores utilizados para cada estudio tendrán características específicas según su tipo. La información obtenida será dependiente de las condiciones espaciales y temporales en las que se utilizó el sensor, esta combinación de variables provocan una heterogeneidad en los datos lo que obliga a darles un tratamiento adecuado previo. Primero realizar los ajustes necesarios para tener una representación uniforme de las magnitudes de unidades y medidas que describen el objeto de interés y posteriormente distinguir qué datos pueden ser correlacionables entre sí para llevar a cabo la Fusión y obtener el modelo resultante.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Crear nuevo framework para la caracterización y estudio de cuerpos de agua superficiales a partir del diseño de una estructura de fusión que permita a) integrar métodos y técnicas de adquisición, b) el tratamiento y análisis de los datos y c) la visualización georreferenciada de los datos recolectados por múltiples sensores. Las estrategias a desarrollar deben considerar la naturaleza heterogénea de los datos, así como sus atributos particulares.



### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar técnicas de caracterización de sensores ópticos en medios terrestres y subacuáticos
- Proponer mecanismos de reconstrucción de ambientes 3D a partir de información georreferenciada y no referenciada
- Desarrollar e implementar una plataforma acuática de bajo costo para monitoreo y observación de cuerpos de agua superficial
- Diseñar estrategias de adquisición y métodos de corrección de datos para reconstrucción tridimensional en ambiente acuático
- Desarrollar algoritmos de análisis de imagen para detección y seguimiento de objetos
- Desarrollar una metodología de integración de sensores acústicos activos y vehículos de superficie no tripulados.
- Validar la viabilidad y pertinencia de los métodos, técnicas e instrumentos para aplicaciones de observación y monitoreo de fauna marina.
- Diseñar un nuevo modelo de fusión a partir de datos georreferenciado y no georreferenciados

### **1.6 Antecedentes de implementación**

Retomando los trabajos previamente utilizados en el ámbito de la fusión de datos, se puede señalar que los métodos que integran datos de múltiples fuentes, permiten mejorar de manera notable la calidad de la información resultante, podemos entonces tomar como antecedente un anterior, en el que se propone un nuevo marco de la fusión orientada a datos de múltiples fuentes y multitemporales para la caracterización de los deslizamientos de tierra(Villalpando et al., 2020). Este trabajo propone un nuevo marco para la fusión de datos multifuentes y multitemporales orientado al estudio y caracterización de eventos de deslizamiento.

En la Figura 3 se muestra un cuadro explicativo de esta aproximación metodológica, que consiste en generar modelos virtuales 3D en forma de nubes de puntos densas a partir de muestreos fotogramétricos, y posteriormente retroalimentarlos con la información característica del suelo y el subsuelo.

El esquema consta de tres pasos principales: La primera (Stage1)es la recopilación de datos in situ (caracterización geológica, mediciones geofísicas, específicamente

sondeos eléctricos verticales (VES) y tomografías de resistividad eléctrica (ERT) mediciones GPS y cartografía con UAV/drones).

El segundo paso (Stage2) consiste en generar un modelo virtual 3D de alta resolución (con una resolución espacial de ~1 In) a partir de los fotogramas adquiridos mediante el UAV utilizando el procesamiento de la estructura del movimiento (SFM). El modelo virtual desarrollado se optimizó con mediciones GPS para minimizar el error de geolocalización y eliminar las distorsiones en el modelo.

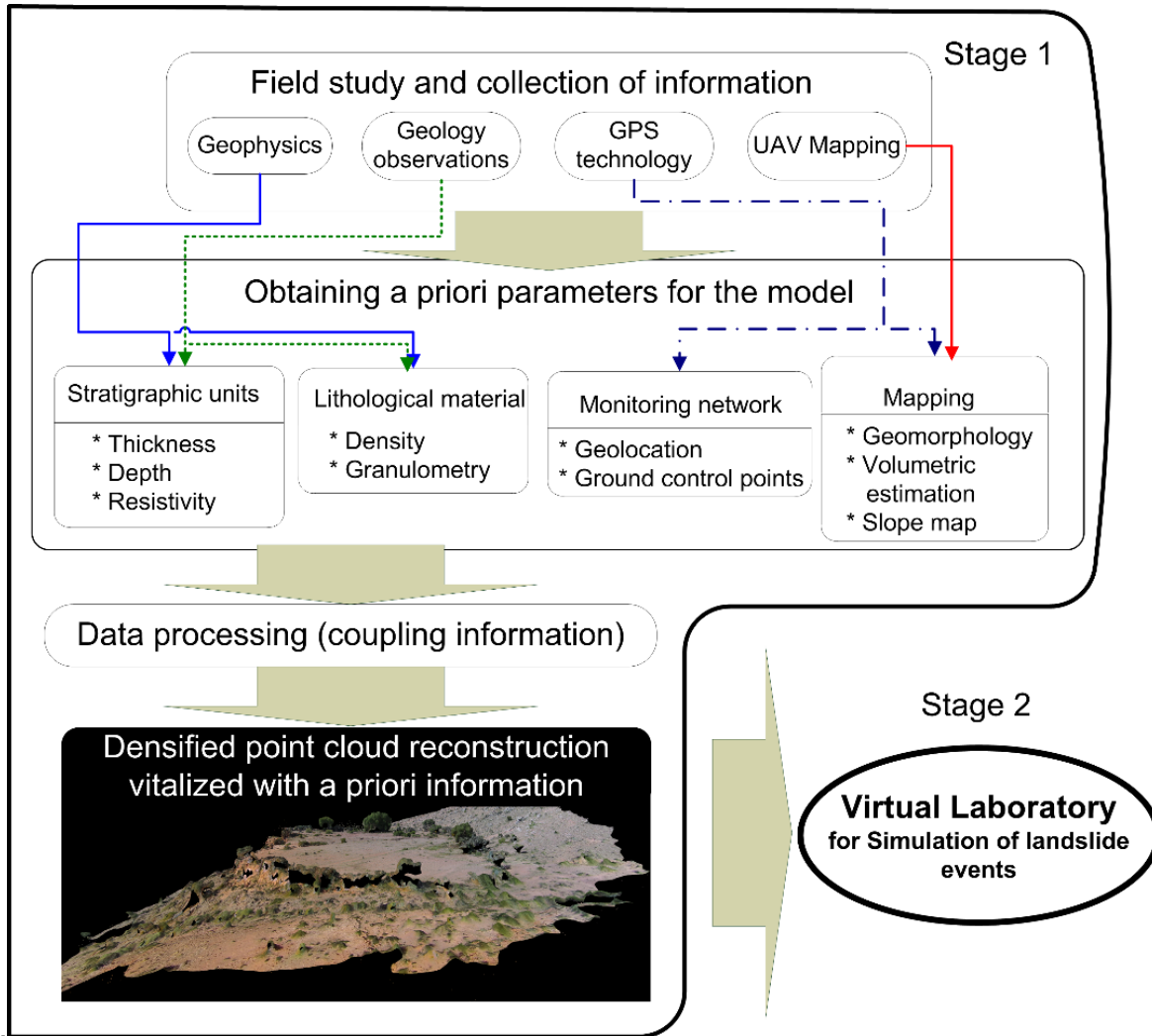


Figura 3. Diagrama de flujo de la información recogida e interoperabilidad.

El último paso consiste en ensamblar los datos adquiridos en el campo y la nube de puntos densificada teniendo en cuenta la diferente naturaleza de los datos, el procedimiento de re-escalado y la capa de apilamiento de información.

La Figura 4 muestra el diagrama de flujo de la información y las fases implementadas. En la fase 1, se cargaron las imágenes adquiridas por el UAV (1.1). Se realizó el preprocesamiento (1.2), donde se corrigieron los datos. Posteriormente se generaron las nubes de puntos densas (1.3). Éstas se ajustaron con los puntos de control y validación en el campo mediante un proceso de reoptimización (1.4); así como, la adaptación de los datos en un formato conveniente para su exportación.

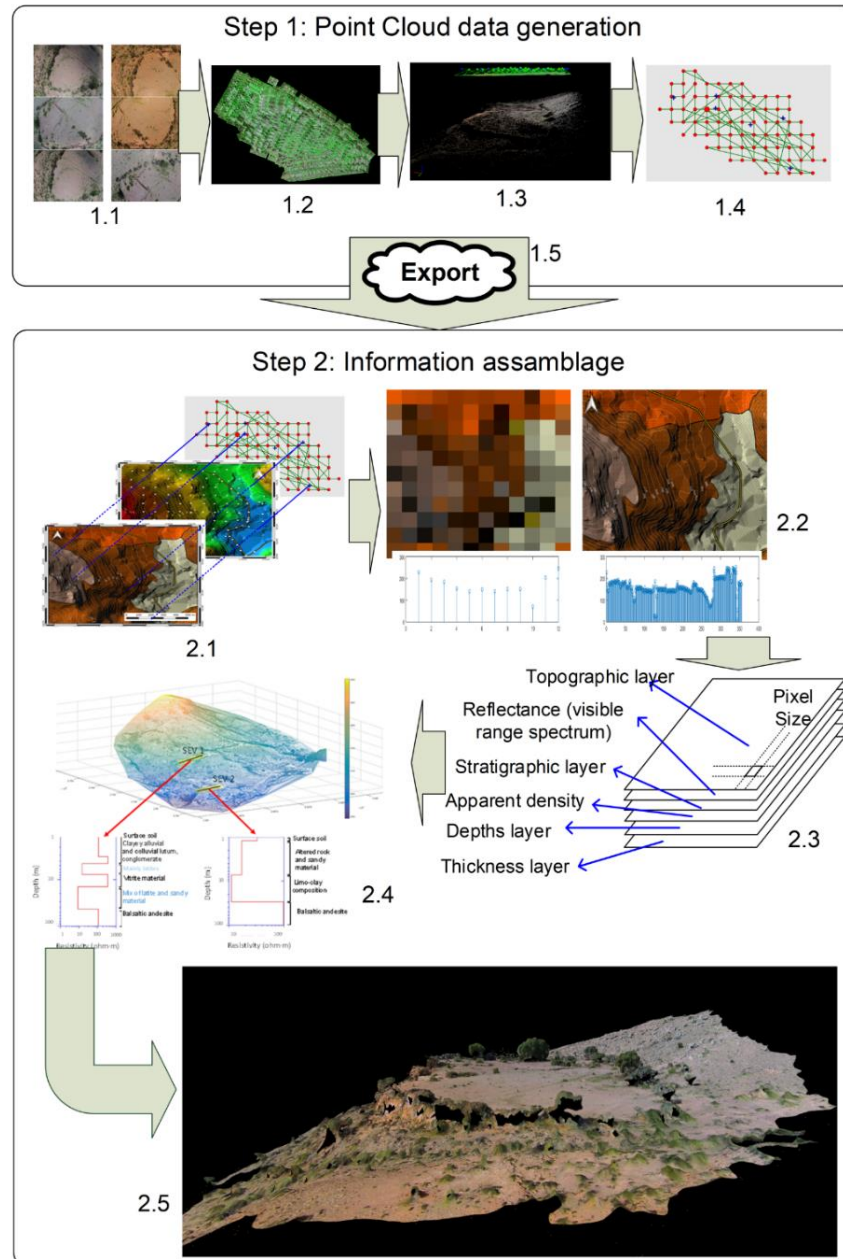


Figura 4. Esquema de generación y refuerzo de datos espaciales adquiridos con un dron con información geofísica/geológica.

La segunda etapa, consiste en el ensamblaje de los datos con el proceso de georreferenciación inicial (2.1) con el apoyo de la red de seguimiento GPS. En (2.2) se aplicaron a los datos procedimientos de escalado y sobre muestreo para una correcta representatividad espacial de los parámetros considerados (geología, resistividad, presencia de fracturas, pendientes, etc.). En (2.3) los datos se concentraron mediante el apilamiento de capas. En (2.4) se generó un modelo de superficie enriquecido y, por último, en (2.5) se añaden características de textura al modelo virtual.

El principal aporte de este enfoque metodológico reside en la capacidad de proporcionar, organizar, adaptar y estandarizar la información relevante de la zona a o fenómeno de estudio, presentándola en cuatro categorías distintas que incluyen todos los datos capturados, para a partir de estos desarrollar una estrategia de fusión de técnicas multidisciplinares en un conjunto de información geoespacial.

## **1.7 Consideraciones**

La percepción remota ofrece una alternativa de evaluación del estado de las aguas. Sin embargo, es importante tener una buena apreciación de las interacciones materia-energía y la propagación de ondas electromagnéticas en el medio, que tendrán un impacto en la precisión de la información remotamente adquirida. Las ondas electromagnéticas se ven afectadas por la interacción con diferentes medios, por ejemplo, la atmosfera introduce pérdidas de señal que no ocurren en el vacío. Estas ondas se propagan a través de cualquier material dieléctrico incluyendo el aire, pero no lo hacen bien a través de los materiales conductores, existiendo pérdidas como el caso del agua de mar, ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material disipando con rapidez la energía de las ondas (Vila Burguete, 2005).

Si se habla del medio acuático se debe de considerar cómo el agua absorbe o dispersa la luz incidente a lo largo de la columna de agua. Este fenómeno se amplifica proporcionalmente si en el agua existen materiales orgánicos e inorgánicos disueltos. Cuando la luz penetra el agua su intensidad disminuye exponencialmente con el aumento de la profundidad. Este proceso se conoce como atenuación y ejerce un efecto profundo sobre los datos de sensores remotos de los ambientes acuáticos. La gravedad de la atenuación difiere con la longitud de onda de la radiación electromagnética. A medida que aumenta la profundidad, la separabilidad de los espectros de los materiales disminuye (Mumby, 2000).

## Absorción

La absorción implica la conversión de energía electromagnética en otras formas tales como calor o energía química (por ejemplo, fotosíntesis en fitoplancton)(Mumby, 2000). Los principales absorbentes en agua son: algas (fitoplancton), partículas inorgánicas y orgánicas en suspensión (excluidas las algas), compuestos orgánicos disueltos (sustancias amarillas) que resultan de la descomposición del tejido vegetal. El agua misma, que absorbe fuertemente la luz roja y tiene un efecto menor en la luz azul de longitud de onda más corta (de ahí el color azulado del agua clara).

## Dispersión

La energía electromagnética puede interactuar con partículas suspendidas en la columna de agua y cambiar de dirección. Este proceso de dispersión es causado en gran parte por partículas inorgánica y orgánica y aumenta con la carga suspendida del sedimento (turbiedad) del agua(Jensen, 2007).

## Penetración y batimetría

La percepción remota de la batimetría se divide en dos grandes categorías: las pasivas basadas en imágenes y las activas no basadas en imagen. El método de no-imagen se basa la detección y el alcance de la luz, y detecta la distancia entre el sensor y la superficie del agua o suelo marino usando una o dos ondas. En comparación, los métodos activos de formación de imágenes se basan en la estimación de la profundidad del agua sobre los valores de píxeles de una imagen, mediante el uso de la luz visible y la radiación de microondas(Gao, 2009).

El sensado pasivo requiere que el agua sea excepcionalmente clara permitiendo medir características de hasta 50 metros de profundidad, aguas casi completamente libres de compuestos orgánicos e inorgánicos que permitan observar la topografía del fondo son muy escasas. Para alcanzar mayores profundidades el uso de sensores activos como el LiDAR (Light Detection and Ranging) es ampliamente usado, y mejora notablemente la penetración y permite observar de mejor manera la topografía del fondo acuático, LiDAR es capaz de medir la profundidad del agua desde 1,5 m a 60 metros a un nivel de exactitud de hasta 15 cm en condiciones ideales(Gao, 2009). Sin embargo, condiciones de turbidez generan un sesgo en la batimetría(Hare, 1994).

## Propagación acústica

La propagación acústica a través del agua ha sido reconocida desde hace tiempo como un mecanismo eficaz para hacer que el ambiente submarino se vuelva "transparente" (Meadows, 2013), y es creada por la perturbación del medio material (elástico, fluido, sólido). Las ondas sonoras se propagan en el medio fluido y no se propagan en el vacío. Tomando en cuenta que la velocidad del sonido en el aire para las condiciones estándar de temperatura y presión cerca de la superficie es de cerca de 340 m/s, mientras que en la superficie del océano es de cerca de 1.500 m/s, lo que es más rápido. No sólo es la velocidad de propagación acústica a través del agua es aproximadamente cuatro veces más rápida que a través del aire; además la distancia de viaje es también mucho mayor.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1 Sensores pasivos y activos

En la actualidad existe una gran cantidad y variedad de sensores, estos suelen dividirse en pasivos y activos. Los sensores pasivos son capaces de detectar la energía cuando está se encuentra naturalmente en el ambiente, por ejemplo, si consideramos la luz emitida por el sol, este tipo de sensor es capaz detectar y medir la luz que se refleja sobre los objetos. Sin embargo, si está energía no está disponible como por ejemplo por las noches, este tipo de sensor no será capaz de registrar información de manera eficiente.

Entre los sensores pasivos más conocidos podemos mencionar las cámaras fotográficas, termómetros, sensores electromagnéticos y sensores químicos. Adicionalmente podemos mencionar el caso de los sensores sísmicos y los infrarrojos los cuales pueden ser también sensores activos.

Por otro lado, los sensores activos poseen su propia fuente de energía, que emiten sobre el objeto que se desea medir, la energía reflejada por el objeto es detectada y medida para el sensor, lo que permite ser utilizado sin limitaciones por la hora del día o condiciones meteorológicas (Favorskaya & Jain, 2017). La mayoría trabaja en el rango no visible del espectro, principalmente mediante microondas, aunque otros utilizan alguna forma de onda mecánica. Por ejemplo, el radar, que es un sensor que utiliza señales de radio dirigidas a un determinado objetivo y entonces mide la velocidad con la que el pulso rebota. Su principal función es la de medir la distancia precisa a un objetivo. El LiDAR por otro lado utiliza el mismo principio; sin embargo, no utiliza señales de radio, sino que mide el rebote de un haz de luz láser.

En el caso de las sondas, estas se pueden considerar sensores mecánicos que detectan ondas, éstas ondas son después transformadas en una señal eléctrica que después puede ser procesada, y permite la medición de variables físicas como la velocidad, aceleración, fuerza y presión. El instrumento más conocido de este tipo es el SONAR el cual es capaz de medir la propagación de una onda acústica en un medio acuático y su función es similar al del radar y al del sonar, existen también sensores sísmicos activos los cuales pueden transmitir una onda en el subsuelo, usualmente un pulso o impacto controlado, que propaga energía que es medida por el sensor haciendo posible obtener información de las características del subsuelo(Fraden, 2016).

Tanto los sensores activos como los pasivos poseen ventajas y desventajas que los hacen idóneos para un determinado tipo de estudio. Sí bien a primera vista los sensores activos parecen más atractivos es importante recordar que estos sensores requieren de emitir su propia energía y esto conlleva un gasto energético considerable en función del tipo de sensor y ambiente en el que se va utilizar. También significa que la plataforma que lo lleve deberá ser adecuada a las necesidades del sensor y el tipo de uso que se le va a dar. Los sensores pasivos por otro lado poseen limitaciones importantes al depender de energía que se emite de manera externa a los mismos y los escenarios en los que pueden ser utilizados están acotados. Sin embargo, estos sensores destacan en su bajo costo, facilidad de uso, y su versatilidad para ser utilizado en todo tipo de plataformas.

## 2.2 Captura de imagen e instrumentación

El sentido de la vista puede distinguir el mundo que le rodea gracias que es capaz de percibir la luz emitida por el sol u otras fuentes, esta luz baña los objetos sobre los que ilumina haciéndolos visibles para los ojos del ser humano, que es el sensor natural que posee.

Bajo este principio el ser humano desarrollo instrumentos capaces de capturar la luz natural o artificial para luego transformarlas en imágenes estos instrumentos han evolucionado a lo largo del tiempo. Los principios ópticos básicos eran conocidos desde la antigüedad, desde el siglo quinto existen registros de los primeros experimentos sobre cómo la luz viaja en líneas rectas, el filósofo chino Mo Tzu en el *siglo V a. C.* fue el primero en registrar información de como una imagen se observa invertida al ser observada a través de una lámina con un agujero muy pequeño. El filósofo Aristóteles también en el siglo cuarto antes de Cristo ya había realizado una formulación matemática para intentar comprender este fenómeno, otros estudiosos también observaron y describieron fenómeno. Sin embargo, hasta 1545 fue publicada la primera imagen impresa por medio de algún instrumento óptico, a este primer instrumento se le conoció como "*camera obscura*" que consistía en una sencilla caja que atrapa la luz solo con un pequeñísimo orificio en una sus extremos este pequeño agujero, o estenopo, captura la luz y luego la proyecta sobre algún material fotosensible, a partir del cual se obtiene una imagen impresa, de su figura en forma de caja obtiene su nombre de cámara término con el que se le conoce a ese instrumento hasta nuestros días.

Desde aquel primer desarrollo los instrumentos han evolucionado de manera importante con el tiempo se desarrolló la película fotosensible con la que las cámaras podían capturar imágenes en rollos de filme que después al ser revelados podrían ser impresos en imágenes de formato más grande, posteriormente se desarrollaron cámaras mecánicamente más complejas, que eran capaces de llevar



distintos lentes mejorando notablemente sus capacidades para capturar información. Eventualmente aparecieron las cámaras con funciones analógicas que dieron paso a la era de la televisión, hasta el desarrollo de las cámaras digitales que conocemos en la actualidad.

### **2.3 Principios básicos de captura de luz**

Una cámara utiliza el mismo principio que el ojo humano para capturar la luz y percibir los objetos que se observan. Así, una imagen, la imagen obtenida está formada por toda la luz que la cámara o el sensor es capaz de capturar, para entender el fenómeno de transporte de la luz es necesario mencionar algunos conceptos fundamentales de cómo funciona este proceso.

#### **Radiometría**

La medición del contenido energético de los campos de radiación electromagnética, así como la determinación de cómo se transporta esta energía desde una fuente a través de un medio hasta un sensor, se llama radiometría. En una medición radiométrica, los resultados suelen expresarse en unidades de potencia, como los watts. El resultado puede expresarse alternativamente en términos de flujo de fotones (fotones por segundo), energía (julios) o intensidad (fotones).

Las ecuaciones de la óptica geométrica se utilizan en la radiometría tradicional para tratar la propagación del campo de radiación. Es decir; que se considera que la energía radiante se transporta en la trayectoria de un rayo, y se pueden ignorar los efectos de interferencia o fraccionamiento. El flujo de energía se producirá en direcciones diferentes a las de los haces geométricos en los casos en que los efectos de interferencia o difracción sean considerables. En estos casos, el efecto de la inercia o la difracción se suele tratar como una corrección del resultado de la óptica geométrica.

La radiometría suele separarse en secciones del espectro en las que se pueden aplicar los mismos enfoques experimentales. Así, la radiometría ultravioleta en el vacío, la radiometría en el infrarrojo intermedio, la radiometría en el infrarrojo lejano y la radiometría en microondas se consideran ámbitos distintos de la radiometría espectral óptica visible y casi visible (Johnson, 2008).

#### **Fotometría**

La fotometría es un sistema de tratamiento, formulaciones matemáticas y metodologías instrumentales utilizadas para describir y medir la propagación de la luz a través del espacio y los materiales. La fotometría es un subconjunto de la

radiometría, y sólo se ocupa de la radiación en la porción visible del espectro. Las magnitudes fotométricas se definen de tal manera que incorporan las variaciones de la sensibilidad espectral del ojo humano en el espectro visible(Johnson, 2008).

Los valores fotométricos se obtienen combinando los valores radiométricos con la respuesta espectral de este observador. Los valores característicos de iluminación y sus unidades fotométricas son:

- El flujo luminoso  $\Phi$ , se expresa en lúmenes ( $lm$ )
- La intensidad luminosa, se expresa en candelas ( $cd$ )
- La iluminancia, se expresa en lux ( $lx$ )
- La luminancia, se expresa en candelas al cuadrado ( $cd.m^{-2}$ )
- La reflectancia, se expresa en estereorradianes  $sr^{-1}$

La Intensidad luminosa (número de fotones) por unidad de tiempo está representada por el flujo luminoso  $\Phi$ . Describen la cantidad de radiación luminosa emitida por una fuente. El flujo emitido por una fuente luminosa en una dirección determinada por unidad de ángulo sólido se denota por la intensidad luminosa  $I$ .

$$I = d\Phi / d\Omega.$$

El flujo luminoso por unidad de superficie, creado por una fuente con una intensidad  $I$  a una distancia  $d$ , se define como luminancia. Disminuye en proporción directa al cuadrado de la distancia:

$$E = I \cos(\alpha) / d^2 .$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo entre la normal de la superficie iluminada y la dirección de la fuente.

Tabla 2. Luminancia producida por fuente(Schlyter, 2009).

Fuente de luz	Luminancia (lux)
Noche de luna llena	0.2
Alumbrado Publico	20 a 30
Amanecer, atardecer	50
Día en exterior, (cielo nublado)	5,000
Día Soleado	10,000 a 25,000
Valor máximo de la escala	100,000

La iluminancia describe la intensidad de la luz por unidad de superficie en una determinada dirección. Es el valor más importante para la visión, ya que dicta la sensación visual que experimenta un usuario de la luz que se emite, difunde o refleja en función del ángulo entre la dirección de emisión y el ángulo de observación.

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos \theta} = \frac{dI}{dA \cos \theta}.$$

La reflectancia es una función que describe cómo la luz rebota en una superficie opaca. La función acepta una dirección de la luz entrante, una dirección de la luz devuelta la relación entre la radiancia reflejada que sale a lo largo y la irradiancia que incide en la superficie desde la dirección. La reflectancia, por tanto, no tiene unidades y tiene un rango limitado a  $0 \leq \rho \leq 1$ .

Cada dirección está parametrizada por los ángulos azimutal y cenital, por lo que la función en su conjunto es una función de cuatro variables.

La función de distribución de reflectancia bidireccional describe la reflexión bidireccional en una determinada superficie y está definida como la relación entre la iluminancia reflejada y el rayo incidente, La luminancia integrada  $L(\omega_o)$  de un entorno observado desde la dirección,  $\omega_o$  viene dada por la ecuación de transferencia radiométrica.

$$L(\omega_o) = \int_{\Omega} f_r(\omega_i d\omega_i) E(\omega_i) n \cdot \omega_i d\omega_i$$

## Espacios de color y longitudes de onda

La radiación electromagnética se representa como un espectro de longitudes de onda que es continuo. El ojo humano detecta las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda que van de 400 nm (umbral superior de la luz ultravioleta) a 700 nm (umbral inferior de la luz infrarroja). Maxwell en 1860 estableció que la luz blanca está representada en apariencia por una combinación lineal de tres primarios (Dougal et al., 2006). Anteriormente Grassmann en 1853 también propuso la trivarianza de un espacio de color. El rojo, el verde y el azul son los tres tonos primarios que se suelen emplear conocidos como espacio RGB (Krantz, 1975).

La colorimetría examina la percepción humana del color y utiliza la correlación para disminuir el espectro físico al espectro de color percibido. Necesita tres componentes básicos: una fuente de luz (iluminación), un objeto (con una medida estándar de geometría) y un observador de referencia. La Comisión Internacional de Iluminación (*Commission Internationale de l'Eclairage*) CIE llevó a cabo una serie de pruebas psicofísicas en 1931 para determinar el modelo de observación colorimétrica estandarizado, que define las funciones de correspondencia del color (CMF) de la CIE en 1931 para cuantificar la percepción del color tricromático en la visión humana. El deseo de disponer de un espacio de color coherente dio lugar a la generación de una serie de transformaciones no lineales del espacio CIE-XYZ.

Este modelo mostrado en la Figura 5, se basó en un modelo de coordenadas cartesianas y niveles de luminosidad, que eventualmente culminaron en la especificación concreta de estas transformaciones que hoy se conoce como el espacio de color CIE-LAB en 1976 (Kim et al., 2013).

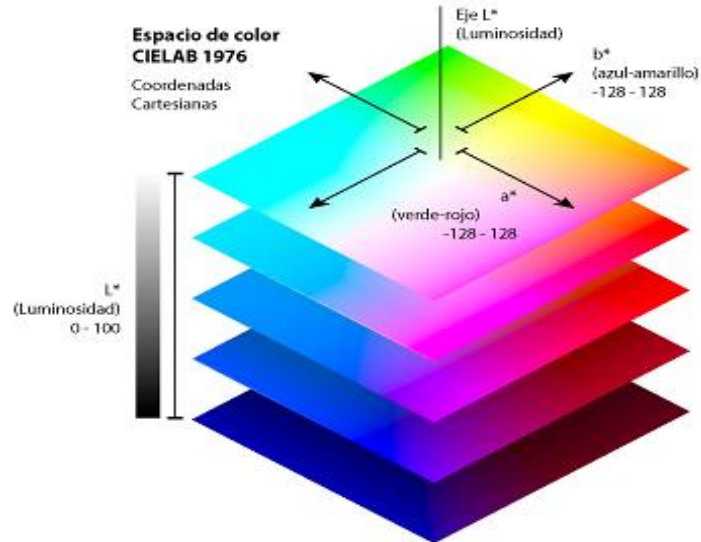


Figura 5. Espacio de color CIELAB de 1976 ([www.glosariografico.com/categoria\\_espacio\\_color](http://www.glosariografico.com/categoria_espacio_color))

El espacio CIELAB permite especificar estímulos de color en un espacio tridimensional. El eje  $L^*$  es el de luminosidad (light Ness) y va de 0 (negro) a 100 (blanco). Los otros dos ejes de coordenadas son  $a^*$  y  $b^*$ , y representan variación entre rojizo-verdoso, y amarillento-azulado, respectivamente. Aquellos casos en los que  $a^* = b^* = 0$  son acromáticos; por eso el eje  $L^*$  representa la escala acromática de grises que va de blanco a negro.

## 2.4 Sensores ópticos y cámaras digitales

Un sensor óptico es un dispositivo de estado sólido que capta la luz y la convierte en una imagen digital. Aunque la técnica de fabricación de un sensor queda fuera del ámbito de este trabajo, se utilizan obleas de silicio como base del circuito integrado, que se construye mediante un proceso conocido como fotolitografía.

Este proceso produce millones de pequeñas perforaciones conocidas como píxeles, cada uno de los cuales contiene un elemento sensible a la luz que puede detectar el número de fotones que han llegado a esa posición específica. Dado que la carga liberada por cada sitio es proporcional a la fuerza de la luz que incide sobre él, es factible recrear la imagen tal y como la observa el ojo humano (Fossum, 1997).

Como el sensor es un dispositivo analógico, la carga debe transformarse primero en una señal, que luego debe ser amplificada antes de ser convertida a un formato digital. A cada píxel sólo se le da un número de identificación para que pueda ser reconocido por un ordenador, y si amplía lo suficiente cualquier imagen digital, se dará cuenta de que cada píxel es simplemente un cuadrado de un solo color.

El sensor no es capaz de medir el color de manera directa, para esto se coloca un mosaico de filtros de color sobre el sensor para que pueda ver múltiples tonalidades, con el doble de filtros verdes, respecto de los rojos y azules, para adaptarse a la mayor sensibilidad del sistema visual humano al color verde. Como cada píxel sólo recibe información de color para el rojo, el verde o el azul, los valores de los dos colores restantes deben estimarse mediante una técnica conocida como interpolación cromática.

Más píxeles pueden significar más detalle, pero el tamaño del sensor es crucial para que esto se cumpla: esto es esencialmente porque los píxeles más pequeños son menos eficientes que los sensores más grandes que pueden retener más luz en relación con el ruido creado por el sensor a través de su funcionamiento, y una mayor proporción a favor de la señal, produce una imagen más limpia.

#### **2.4.1 Sensor CCD**

El sensor CCD (Charge Coupled Device), o dispositivo de carga acoplada fue introducido en los años 70 en las primeras cámaras digitales, En un CCD, tras la exposición a la luz y la conversión de los fotones en fotoelectrones, los electrones se desplazan fila a fila por el sensor hasta llegar a una zona que no está expuesta a la luz, el registro de lectura. Una vez trasladados al registro de lectura, los fotoelectrones se trasladan uno a uno al nodo de salida. En este nodo se amplifican en una tensión legible, se convierten en un nivel de gris digital mediante el convertidor analógico-digital (ADC) y después se envían al ordenador a través del software de imagen. Este sensor es uno de los más comunes y utilizados en la imagen digital. Proporciona buena calidad de imagen, no obstante, su fabricación es bastante compleja y costosa, las cámaras digitales que llevan incorporada esta clase de sensor tienen un coste de compra elevado.

El funcionamiento del sensor CCD, necesita de un chip externo denominado *Analog Digital Converter* o ADC, que es el que se encarga de convertir los datos de cada píxel en datos digitales binarios para que una computadora los pueda leer, esto provoca que esta clase de sensor consuma mucha energía.

Principales características del CCD:

- Obturador global
- Nivel de ruido medio a bajo

- Alto rango dinámico
- Velocidades de fotogramas de rango medio
- Sujeto a problemas de saturación luminosa

### 2.4.2 Sensor CMOS

Cada píxel de un sensor CMOS contiene componentes electrónicos en miniatura, como es el caso de un condensador y un amplificador. Esto implica que el píxel convierte un fotón en un electrón, y luego el electrón se transforma instantáneamente en un voltaje legible mientras permanece en el píxel. Además, hay un ADC para cada columna, lo que significa que cada ADC tiene que leer muchos menos datos que uno de un sensor CCD, que debe leer todo el sensor. Gracias a esta combinación, los sensores CMOS pueden funcionar en paralelo y analizar los datos mucho más rápido que la tecnología CCD. Los sensores CMOS tienen un ruido de lectura sustancialmente menor que los sensores CCD porque los electrones se mueven mucho más despacio que la velocidad máxima proyectada. En la Figura 6 se muestra el esquema de funcionamiento de una cámara CMOS (Fossum, 1997).

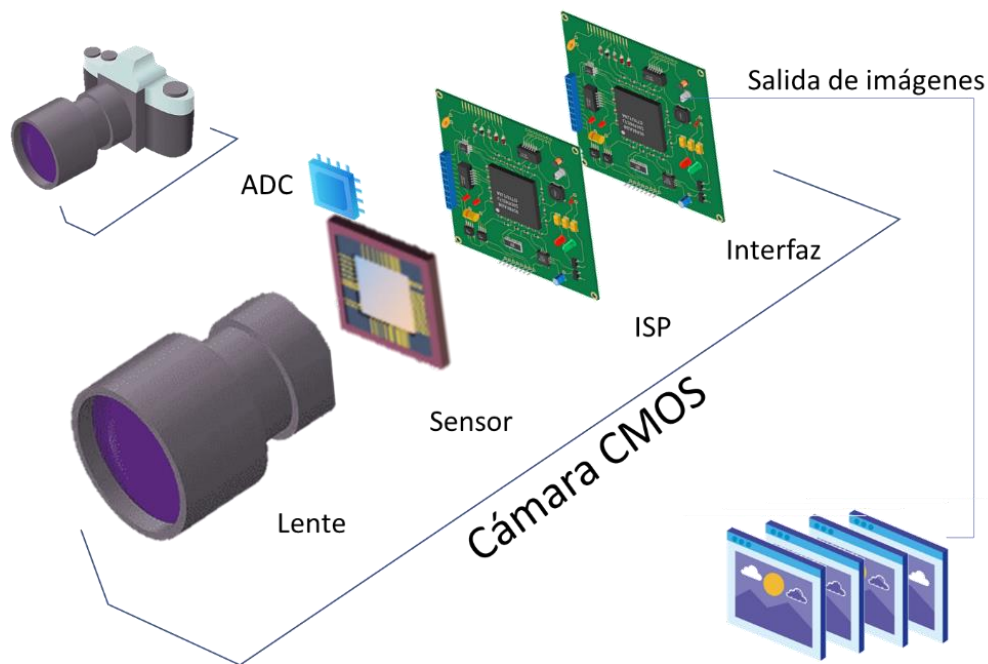


Figura 6. Esquema de una cámara con sensor CMOS, con sus componentes principales, primero el lente, luego el sensor con su convertidor analógico/digital ADC, enseguida el procesador de señal de imagen ISP, y finalmente la interfaz de salida de imagen.

Principales características del CMOS:

- Modelos con obturador global y obturador rotativo
- Ruido de bajo a muy bajo
- Rango dinámico de alto a muy alto
- Velocidades de fotogramas muy elevadas
- Sin problemas de saturación luminosa

## 2.5 Principios de Sonar

Dado que el sonido puede recorrer distancias tan largas, puede utilizarse para la detección a distancia en un entorno acuático. Los sonares son un tipo de instrumento que utiliza los sonidos en este tipo de aplicaciones. Para comprender los sonares, primero hay que comprender el sonido. En particular, hay que comprender cómo fluye el sonido en el agua.

Los sonidos se mueven con bastante eficacia a través del agua, mucho más fácilmente que en el aire. La capacidad del sonido para viajar a grandes distancias facilita la detección acústica en un entorno acuático. Los dispositivos que utilizan el sonido forman parte de la familia de instrumentos conocidos como sonares (Ferguson et al., 2019).

El sonido se desplaza en el agua en una serie de frentes de presión en movimiento, conocida como onda de compresión. Estas ondas de compresión se mueven (o se propagan) a la velocidad local del sonido. La velocidad local del sonido puede variar en función de variables del agua como la salinidad, la presión y la temperatura, pero independientemente de las características del sonido, todas las ondas sonoras se mueven a la velocidad local del sonido. La velocidad del sonido en un entorno oceánico típico es de unos 1500 metros por segundo (m/s) (Weill, 2014).

La longitud de onda de una onda sonora en movimiento es la distancia física entre los frentes de presión. La frecuencia de una onda se define como el número de frentes de presión que pasan por un lugar fijo del agua por unidad de tiempo. La longitud de onda medida en metros  $m$  y la frecuencia medida en ciclos por segundo  $Hz$  están conectadas por la velocidad del sonido medida en metros por segundo  $m/s$ .

Una onda sonora lleva consigo una cantidad de energía acústica. Esta energía puede medirse con un hidrófono, que controla las oscilaciones de presión al paso de los frentes de presión de las ondas sonoras. La amplitud de la onda se define

por la magnitud de estas oscilaciones. Esta amplitud es proporcional a la cantidad de energía acústica transportada por la onda; las ondas de mayor amplitud transportan más energía. La energía de una onda sonora por unidad de tiempo (llamada potencia) está relacionada matemáticamente con el cuadrado de su amplitud. Este fenómeno se puede observar en la Figura 7.

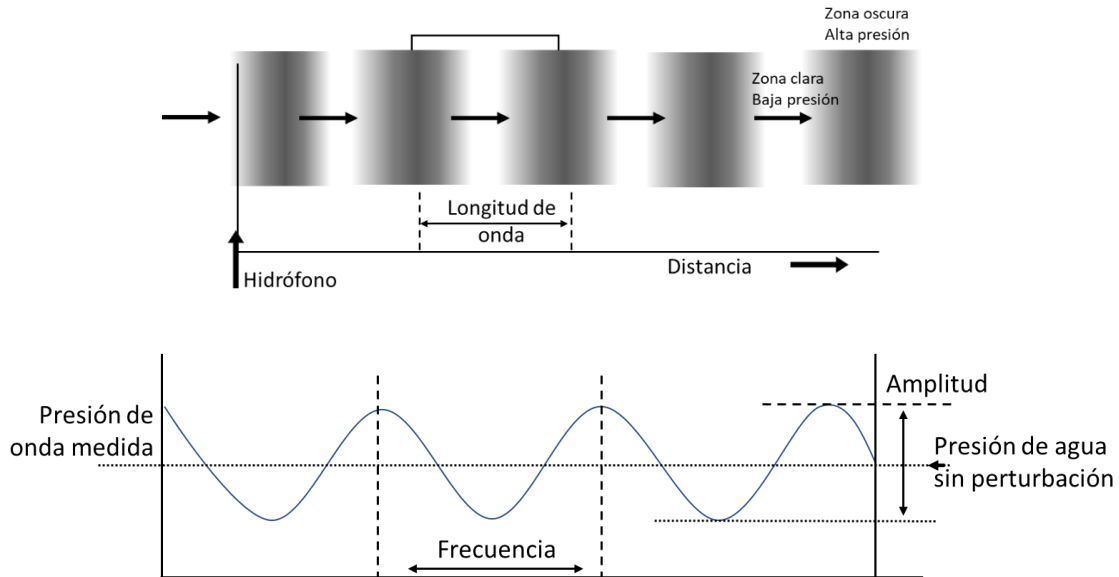


Figura 7. Relación una onda con la cantidad de energía acústica que transporta.

## 2.6 Sensores Acústicos

Un sonar es un dispositivo para detectar y localizar a distancia objetos en el agua mediante el sonido, el sonar tradicionalmente se divide en pasivos y activos: Los sonares pasivos son esencialmente dispositivos de "escucha" que registran los sonidos emitidos por objetos en el agua. Estos instrumentos pueden utilizarse para detectar eventos sísmicos, barcos, submarinos y fauna marina. Los sonares activos son dispositivos que producen ondas sonoras de frecuencias específicas y controladas, y escuchan los ecos de estos sonidos emitidos y devueltos por objetos remotos en el agua, los sonares que miden la profundidad en el océano son sonares activos (Ceramicola et al., 2018).

Por la naturaleza de este estudio se hará énfasis en dispositivos de sonar activos utilizados para medir a distancia la profundidad del fondo acuático, un proceso llamado sondeo de eco o medición de batimetría. Los más comunes son El SONAR (Sound Navigation and Ranging) y el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Mientras que el sonar funciona sin ser atendido directamente, la ecosonda suele ser operada o guiada para enviar las señales en la trayectoria adecuada y en dirección del objeto de interés (Weill, 2014).



Otra diferencia entre el sonar y la ecosonda es su movilidad. Mientras que el sonar es instalado de forma fija y permanente en el casco del barco, la ecosonda es un equipo portátil, que se utiliza en embarcaciones relativamente pequeñas, y que por lo general utilizan el sistema sólo para pesca, no para determinación de geología o topografía marina. Sin embargo, para la instalación y correcto funcionamiento de la ecosonda, debe garantizarse su verticalidad, esto requiere una calibración del equipo, cada vez que se pone en operación. Las ecosondas son, por lo general, de menor costo que los equipos de sonar.

Las ecosondas determinan la profundidad produciendo un breve pulso sonoro, o "ping", y luego escuchando el eco del pulso desde el fondo. El tiempo que tarda un pulso en ser transmitido y su eco en ser devuelto es el tiempo que tarda el sonido en viajar hasta el fondo y volver. Conocer este tiempo y la velocidad del sonido en el agua permite determinar la distancia desde la superficie hasta el fondo. Por ejemplo, si se descubre que tarda 10 segundos entre que se emite un ping y se escucha su eco, entonces se sabe que ha pasado  $10 \text{ seg} \cdot 1500 \text{ m/s} = 15000 \text{ m}$ . Como esta es la distancia de "ida y vuelta" (hacia y desde el blanco), el alcance hasta el fondo es la mitad de 15000, es decir, 7500 m.

$$\text{Alcance} = (1/2) * \text{Velocidad} * \text{Tiempo de eco.}$$

Los sonares batimétricos requieren proyectores capaces de generar impulsos sonoros precisos, predecibles y repetibles de forma regular. Utilizan proyectores cerámicos piezoeléctricos, que cambian de tamaño minuciosamente cuando se les suministra una tensión. Una ecosonda puede emplear voltajes precisos para inducir la oscilación del proyector piezoeléctrico, lo que resulta en la transmisión de una onda de presión con características de frecuencia específicas en el agua. Un proyector de este tipo es similar a una bocina común, que traduce los impulsos eléctricos en oscilaciones de una membrana de cartón o papel grueso, transfiriendo la energía al aire en forma de ondas sonoras en forma de voz o música.

Un pulso sonoro producido en el agua se extiende esféricamente desde su fuente, con igual energía viajando en todas las direcciones. A medida que la esfera del frente del pulso crece, su energía se dispersa por una región más grande y amplia, lo que provoca una disminución de la energía por unidad de superficie, el pulso también está sometido a la atenuación, o pérdida de absorción. La pérdida de transmisión es la suma de las pérdidas por dispersión y absorción. La cantidad total de pérdidas por transmisión que experimenta una onda sonora es proporcional a la distancia que recorre; cuanto más se propaga una onda, más débil se vuelve.

Cuando una onda sonora entra en contacto con una zona del fondo, se dice que esa porción está iluminada o zonificada. Lo que ocurre con la energía acústica en

esta fase puede ser bastante complicado. Una parte de la energía es absorbida por el fondo marino. La cantidad de energía transferida viene determinada por el material del fondo. La arena y el limo absorben mucha energía. En cambio, las rocas y los elementos metálicos absorben muy poca energía acústica. La mayor parte de la energía que el objetivo zonificado que no puede absorber, se refleja o se dispersa de nuevo en el mar. La fuerza de retrodispersión del fondo es la proporción de energía incidente por unidad de superficie que se devuelve en la dirección del proyector.

La ecuación del sonar es una herramienta utilizada por los ingenieros de sonares para llevar la cuenta de todas las variables que intervienen en el proceso de eco acústico. Esta ecuación expresa el Exceso de Señal (*SE*), o la fuerza del retorno del eco medido, en términos de las cantidades mencionadas anteriormente: Pérdida de Transmisión (*TL*), Fuerza de Retrodispersión (*BS*), también conocida como fuerza del blanco cuando se utiliza para detectar objetos discretos como una mina o un submarino), Área del Blanco (*TA*) y Nivel de Ruido (*NL*). También contiene el nivel de la fuente transmitida (*SL*), que es una medida de la cantidad de energía acústica emitida por el proyector en el agua. Todas las mediciones están en decibelios (*dBs*) por convención (Caruthers, 1977):

$$SE = SL - 2TL + BS - NL + TA$$

Las ecosondas de un solo haz fueron los primeros dispositivos de sondeo por eco, los más sencillos y los más utilizados. El objetivo de estos equipos es realizar mediciones puntuales de la profundidad del océano en diversos lugares. Las profundidades que se han medido pueden fusionarse con sus ubicaciones físicas para crear una representación tridimensional del fondo oceánico. Las sondas mono-haz suelen estar preparadas para tomar datos desde un barco en movimiento. Aunque su construcción es sencilla y asequible, así como su manejo y comprensión, la ecosonda mono-haz presenta una serie de inconvenientes fundamentales que la hacen inadecuada para los trabajos de levantamiento batimétrico a gran escala. Estas limitaciones han sido el impulso para la creación de sonares multi-haz cada vez más complicados y costosos.

El objetivo de un estudio batimétrico a gran escala es obtener mediciones precisas de la profundidad en cualquier lugar cercano del fondo marino para poder formar una imagen exacta de la morfología del fondo. Para conseguirlo con eficacia, el sonar utilizado debe hacer dos cosas: proporcionar mediciones precisas de la profundidad que correspondan a lugares bien definidos del fondo marino (latitudes y longitudes concretas), y ser capaz de realizar un gran número de estas mediciones

en un tiempo razonable. La ecosonda mono-haz, sin embargo, se queda corta en ambas categorías.

El propósito fundamental de una ecosonda es estimar adecuadamente la distancia al fondo del océano. Un sonar es más eficaz en un estudio batimétrico si estima el alcance hasta una posición precisa en el fondo, idealmente justo debajo del barco que realiza el estudio. Utilizando la ecosonda mono-haz, se puede pensar que el momento del primer eco de un ping define el alcance hasta el fondo directamente por debajo del barco de prospección, porque es ahí donde el ping toca teóricamente por primera vez el fondo si se tratase de una superficie ideal plana. Sin embargo, en cualquier otra circunstancia se puede entender que el eco recibido no es el que se encuentra justamente por debajo, este fenómeno se ilustra en la Figura 8.

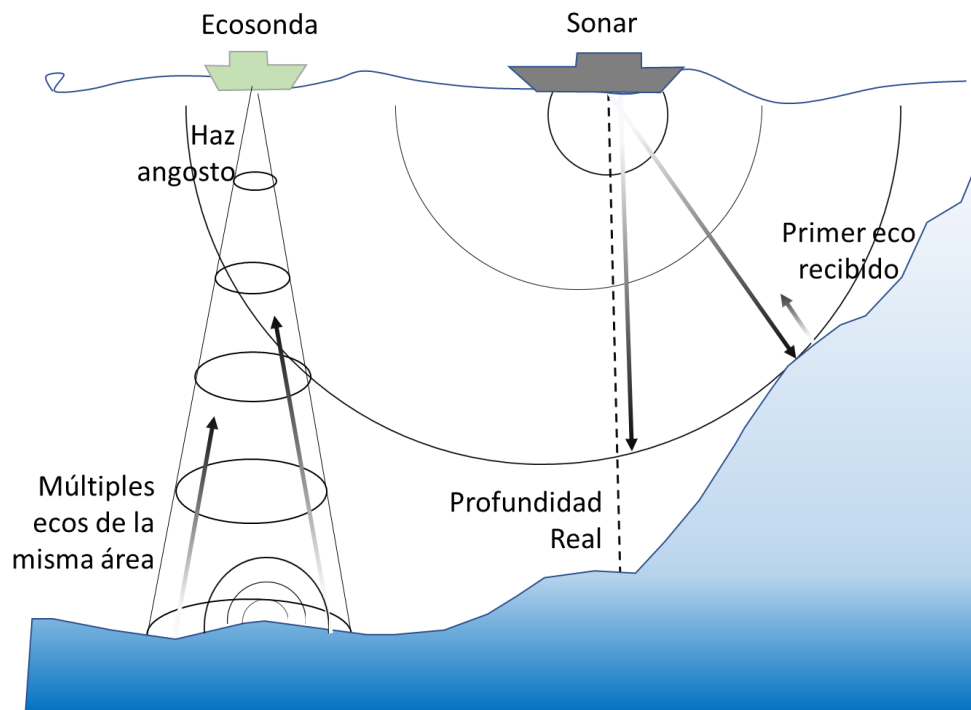


Figura 8. Funcionamiento normal de un sonar y ecosonda multi-haz.

Las ondas de la ecosonda mono-haz del sonar, que se propagan de forma esférica en todas las direcciones, el operador de la embarcación no tiene forma de saber que el eco de retorno inicial no procede del fondo que está justo debajo.

Una ecosonda multi-haz puede cartografiar muchos lugares del fondo marino por cada pulso y con mejor resolución que las ecosondas tradicionales. La función de una ecosonda de un solo haz se realiza efectivamente en varios puntos distintos del fondo al mismo tiempo. Estas localizaciones del fondo se fijan de tal manera que

cartografían una sección contigua del fondo, normalmente una franja de puntos perpendicular al rumbo de la embarcación.

Esto es muy beneficioso, ya que los sonares multi-haz pueden sondear extensiones enteras del fondo oceánico en aproximadamente el tiempo que tarda un eco en volver desde el ángulo más lejano. Un sonar multi-haz puede costar varias veces más que un sonar mono-haz, ya que es bastante más complicado. Sin embargo, este gasto se ve compensado con creces por el ahorro asociado a la reducción del tiempo de operación del levantamiento. Por ello, los sonares multi-haz son el instrumento de prospección preferido en la mayoría de las aplicaciones batimétricas.

## **2.7 Plataformas**

La observación de la tierra suele llevarse a cabo desde muchos tipos de plataformas, como torres, globos, aviones, satélites y estaciones espaciales.

Se conoce como plataforma de sensor a cualquier elemento capaz de llevar instalado un determinado sensor. Estas plataformas tienen la función de transportar el sensor durante una determinada distancia. Sí bien existen plataformas que se les puede llamar estáticas como puede ser una torre de sensores, boyas oceánicas, sensores terrestres, globos meteorológicos, etc. Este tipo de estructuras poseen cobertura limitada a la zona en la que están instaladas, por lo que suelen usarse para realizar monitoreos continuos. Sin embargo, sensores fijos resultan imprácticos para cubrir grandes áreas, por lo que se ha migrado paulatinamente al uso de vehículos no tripulados.

El proceso de sensado consiste en llevar el sensor a una determinada distancia en función de la cobertura deseada, conceptualmente es una operación sencilla; no obstante, en la práctica rara vez es posible contar con las condiciones que permitan realizar esta actividad a voluntad, de tal manera, que poseer una plataforma adecuada tendrá un rol significativo en qué tan eficiente será la recolección de los datos, así como, la calidad de los mismos (Glackin, 2014).

### **Satélites**

Un satélite artificial, es un dispositivo que órbita alrededor de la tierra, es esencialmente un módulo capaz de llevar distintos instrumentos instalados, estos dispositivos se ponen en órbita por medio de un cohete espacial y pueden capturar y transmitir información continuamente hacia la tierra, algunos de estos dispositivos son capaces de ajustar sus trayectorias y corregirlas gracias a sus sistemas de propulsión (Tummala & Dutta, 2017) que permiten impulsarlos por cortos periodos de tiempo.

La mayoría de los satélites de observación de la Tierra se colocan en órbitas circulares, casi polar y heliosincrónicas, entre 600 a 900 km sobre la superficie de la Tierra. Un satélite en una órbita heliosincrónica (sincronizada con el sol) pasa por encima de una región determinada en el suelo aproximadamente a la misma hora local cada día, esto significa que el ángulo de iluminación solar cambia de forma relativamente lenta para esa área de día a día permitiendo la captura más uniforme de datos. Estas plataformas existen desde hace más de 40 años (Lulla et al., 2012); Landsat-1 se lanzó en 1972, seguido de SPOT-1 en 1986 e Ikonos en 1999.

### Plataformas aéreas (aeronaves)

Una aeronave es un vehículo capaz de desplazarse por el aire, poseen distintas formas de elevarse dependiendo de su diseño, las aeronaves más comunes son aviones, helicópteros y globos aerostáticos. Un cuadro comparativo de estas plataformas con respecto de su alcance de cobertura y altitud de operación se muestra en la Figura 9.

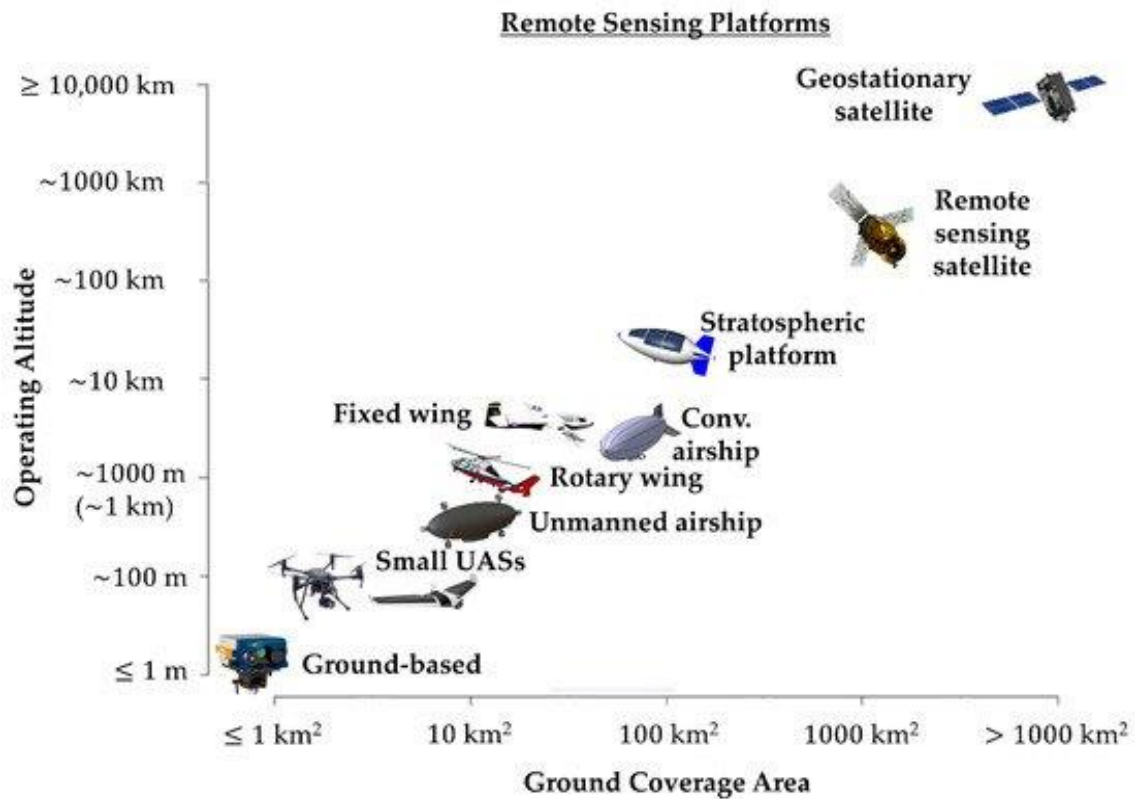


Figura 9. Esquema ilustrativo de las plataformas aéreas en función de su altitud de operación y área de cobertura (Gili et al., 2021).

## **Globo aerostático**

Es el dispositivo más sencillo de todos, debido a que es más ligero que el aire que le rodea y no requiere de mecanización para realizar los vuelos. El artefacto no consume combustible o energía eléctrica, por lo que puede operar durante largos periodos de tiempo. Si bien su utilización ha disminuido paulatinamente a lo largo del tiempo, todavía es muy utilizado para mediciones meteorológicas. Este dispositivo es fácil de operar y económico, pero su carga útil es muy poca y depende de las condiciones del viento para desplazarse.

## **Aviones**

vehículos tripulados de ala fija, se caracterizan por ser la plataforma muy utilizada para el transporte de sensores, estas plataformas son capaces de recorrer grandes distancias, y llevar una carga útil importante. Sin embargo, suelen ser costosas de operar y no se encuentran siempre disponibles, su portabilidad y alcance está limitada a la cercanía de los aeropuertos.

## **Helicópteros**

Los helicópteros funcionan bajo el mismo principio de los aviones, usando sus alas para mantenerse en el aire, solo que, en el caso de este, en lugar de alas tiene hélices adheridas a un rotor, que al girar rápidamente lo sostienen en el aire. Este dispositivo no cuenta con el alcance de un avión y se suele utilizar en distancias más cortas. Además que su portabilidad es muy superior, al no estar limitado a las áreas con aeropuertos y puede permanecer estático sobre un punto determinado, por lo que puede realizar recorridos que no se podrían hacer con un avión\*.

## **Sistemas aéreos no tripulados**

UAS es el acrónimo Unmanned Aerial System por sus siglas en inglés, en español se refiere a vehículos autónomos no tripulados, VANT. Estos dispositivos pueden tener distintas formas y configuraciones de vuelo, pero por definición integran tres componentes esenciales:

- Un sistema de control autónomo o manejado por el hombre, que suele estar en tierra o en un barco, pero que puede estar en otra plataforma aérea;
- Un vehículo aéreo no tripulado (UAV)
- Un sistema de mando y control (sistema de comunicación), para enlazar ambos.

Estos sistemas incluyen, entre otros, los sistemas aéreos pilotados a distancia (RPAS), en los que el UAV/VANT es controlado por un "piloto" mediante un enlace de datos por radio desde una ubicación remota. Los UAS también pueden incluir un UAV/VANT controlado de forma autónoma o, más probablemente, un UAV/VANT semiautónomo(Watts et al., 2012).

En los últimos años, se ha desarrollado la tendencia a referirse a cualquier UAV como un Drone, aunque el término no se considera universalmente apropiado es el más conocido en el ámbito civil y comercial. Los vehículos aéreos no tripulados pueden variar de tamaño, desde los que se pueden lanzar a mano hasta los que se construyen con fines específicos. En la figura 10 se muestra una clasificación por tipo de propulsión y configuración de ala.

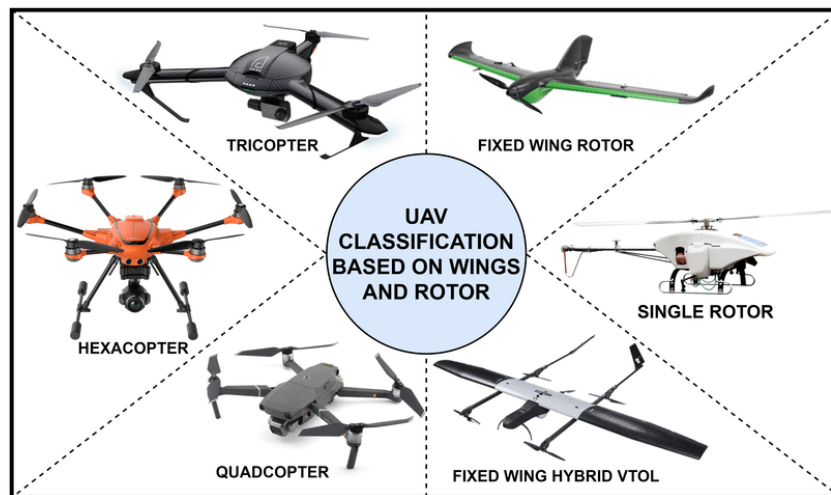


Figura 10. Cuadro ilustrativo de clasificación de los UAV(Chamola et al., 2021)

### Plataformas marinas

Se trata de un vehículo capaz de flotar en el agua y de trasladarse sobre ella se les, normalmente se piensa en ellas como embarcaciones de importante tamaño, aunque las canoas y botes comparten la característica de estar compuestos por una estructura de forma cóncava amplia y que se utiliza como medio de transporte. También existen otros vehículos y artefactos sumergibles capaces de realizar observaciones del fondo marino, dependiendo del uso estas plataformas cuentan con propulsión propia y pueden operar de manera independiente como los submarinos, o en su caso ser dispositivos arrastrados por una embarcación por sobre o debajo de la superficie. En la Figura 11 se muestran algunas de estas plataformas

Las plataformas marinas más utilizadas que funcionan como portadoras de sensores se denominan buques de exploración. Esta es una embarcación equipada

para llevar a cabo investigaciones en el océano. Los buques de exploración integran distintos sensores y pueden portar otras plataformas dentro de ellos, como embarcaciones más pequeñas, pequeños submarinos, botes autónomos USV (Unmanned Surface vehicle) o submarinos autónomos tripulados o átomos(Ludvigsen & Sørensen, 2016).

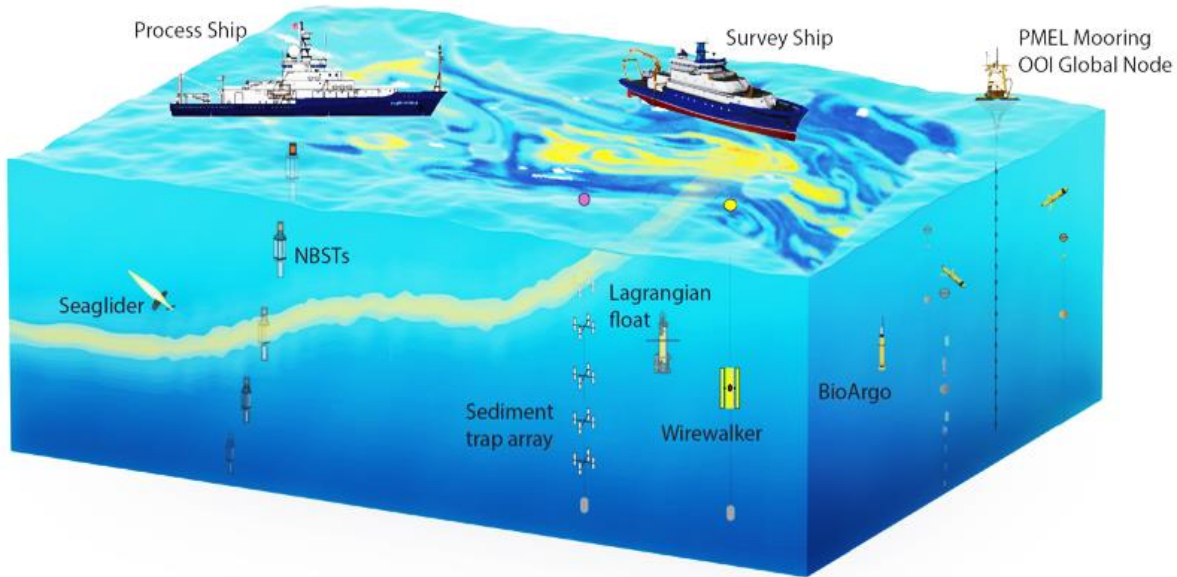


Figura 11. Esquema de plataformas marinas y sumergibles Créditos: NASA - NASA Earth Expeditions, public domain(<https://blogs.nasa.gov/earthexpeditions/2018/08/15/just-sit-right-back-and-youll-hear-a-tale-a-tale-of-a-plankton-trip/>)

### Plataformas acuáticas no tripuladas

Un vehículo de superficie no tripulado (USV) es una novedosa plataforma de superficie capaz de operar sin tripulación. Tienen diversos grados de autonomía, que van desde los vehículos controlados a distancia hasta los que llevan a cabo sus misiones con mínima intervención humana. A los dispositivos completamente automatizados se les ha dado la denominación distintiva como vehículos autónomos de superficie. Estos vehículos marinos no tripulados pueden ser manejados a distancia por pilotos desde la costa o desde una embarcación, y en algunos casos solo de supervisión durante la navegación. En el campo de la batimetría, en especial, el USV tiene algunas ventajas con respecto de sus contrapartes tripuladas, como la eficiencia, la autonomía, el coste y la seguridad(Tanakitkorn, 2019).

Los USV son plataformas versátiles, pueden estar equipados con diferentes conjuntos de sensores y mecanismos de funcionamiento para adaptarse a diferentes tareas. También es típico convertir una embarcación tripulada existente en un USV. Para que estos dispositivos funcionen de forma autónoma, necesitan



un sistema de navegación especializado, cuyo funcionamiento y elementos principales se muestran en la Figura 12, y que les permite navegar de un sitio a otro mientras se operan a distancia(Manley et al., 2000).

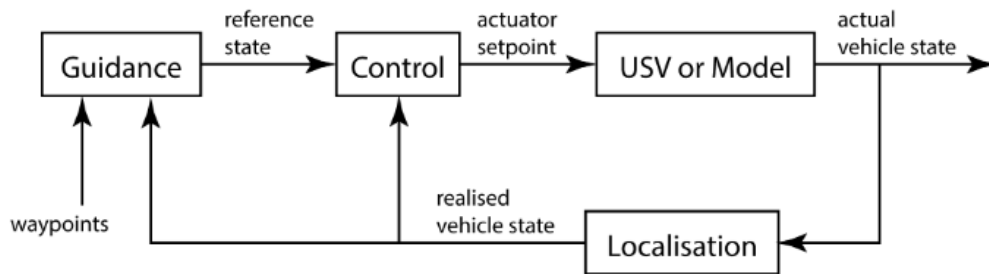


Figura 12. Componentes involucrados en el sistema de comunicación, localización, guiado y control típicos de un bote no tripulado USV. Tomado de *A review of unmanned surface vehicle development*(p.3).Tanakitkorn, 2019.

Como se puede ver la relación entre sensor y plataforma siempre es fundamental por lo que la implementación de algunas estrategias será de gran utilidad, como por ejemplo la implementación de distintos sensores sobre la misma área u objeto de interés, de ser posible de manera simultánea(Nagai et al., 2009). Sin embargo, requiere de una plataforma única capaz de transportar gran cantidad de sensores. Este tipo de plataformas no siempre se encuentran disponibles, además que la información obtenida requiere a su vez un tratamiento especial al tratarse de un volumen importante de datos.

Otro enfoque que es de utilidad la del llamado “censado cooperativo” mediante el uso de distintas plataformas, esto permite integrar el uso de distintos sensores con distintas orientaciones de observación e incluso en distintos medios permitiendo obtener más variedad y cantidad de información(Toth & Józsków, 2016). La relación entre sensor y plataforma es fundamental para realizar el censado de manera eficiente, por lo que la elección del tipo de plataforma y el tipo de sensor deberá realizarse de manera cuidadosa.

## 2.8 Datos multidimensionales

Actualmente los datos se recopilan y procesan en cantidades más grandes, su uso se ha extendido entre una mayor cantidad de usuarios. Si bien la mayoría de los datos geoespaciales se han registrado tradicionalmente como datos bidimensionales, la evolución de los métodos de recopilación de datos y las exigencias de los usuarios han llevado estos datos a describir fenómenos multidimensionales complejos(Guilbert et al., 2016). Un ejemplo sencillo de esto es el uso de representaciones 3D en mapas urbanos, donde a partir de datos 2D se

agrega una dimensión adicional a partir del tratamiento de los datos mediante técnicas fotogramétricas SFM-MVS, aumentando notablemente su alcance y uso respecto de su condición original (Sester et al., 2011).

A esta evolución de las dos a las tres dimensiones, se le puede la dimensión espacial que permite ubicar el modelo geométrico generado de manera correcta en el espacio (Biljecki et al., 2015), también la dimensión temporal hasta llegar a hablar en términos generales de dimensiones multispectrales a partir de datos multisensor (Lu et al., 2016). La integración de todos estos datos para poder obtener un modelo que integre de manera adecuada cada uno de ellos en función de sus características requiere de una estrategia de fusión adecuada, para que el resultado final sea representativo del fenómeno u objeto que se desea estudiar.

## **2.9 Fusión de datos**

Durante la década de 1980 se hicieron los primeros trabajos encaminados en este sentido, sin embargo fueron Hackett y Shah (Hackett & Shah, 1990) quienes publicaron la primera clasificación y recopilación del estado del arte sobre la fusión de sensores y datos usando este término de manera formal. Posteriormente Wald (1999) presenta un review, analizando los trabajos hasta la fecha. Discute la necesidad de un consenso en los términos, conceptos de las definiciones de fusión de datos y propone una definición más adecuada en el campo percepción remota.

La fusión de datos es un marco formal en el que se expresan los medios y herramientas para la combinación de datos provenientes de diferentes fuentes, y tiene como objetivo obtener información de mayor calidad, y agrega que: la fusión de datos debe verse como un marco metodológico, y no simplemente como una colección de herramientas y medios (Wald, 1999).

En la actualidad los estudios encaminados a la integración de plataformas, sensores y datos han ido en aumento, como propuestas de monitoreo de fenómenos geofísicos, meteorológicos, ambientales e industriales (Alcarria et al., 2018), es importante mencionar que su aplicación en las geociencias se ha ido incrementando, especialmente en el análisis de afloramientos geológicos (Tavani et al., 2014) y para modelar característica de sus facies (Assali et al., 2014), así como en aplicaciones de geología estructural (Bemis et al., 2014). Vigilancia y evaluación de cambios topográficos en zonas costeras (Gonçalves & Henriques, 2015), de mapeo y monitoreo integral ambiental IEMM en ambientes marinos (Nilssen et al., 2015), y la implementación de plataformas que integran ecosondas y cámaras multispectrales para mediciones batimétricas y ambientales en aguas someras (Giordano et al., 2015).

# Capítulo 3


## Materiales y métodos

El muestreo y caracterización de ambientes complejos requieren de la implementación de distintos sensores por lo que es necesario conocer sus características y comportamientos en distintos escenarios, en este capítulo se mencionan los medios y métodos utilizados durante la etapa de instrumentación, pruebas y calibración.

La primera parte de la metodología propuesta envuelve el uso de sensores ópticos multiespectrales que son capaces de percibir la luz en el espectro visible, debido a las propias condiciones del medio acuático se utilizarán dos sensores distintos instalados en dos plataformas que son capaces de moverse sobre el agua, así como desplazarse por aire. La plataforma acuática lleva un sensor sumergible capaz de capturar información dentro del medio acuático evitando así las atenuaciones de dispersión y/o reflexión de la luz en la superficie del agua, mientras tanto el sensor aerotransportado será capaz de capturar información por encima de la superficie del agua si bien se esperan interferencias al momento de registrar la información que se encuentra por debajo del espejo de agua, estas pueden ser reducidas al momento de la toma mediante el ajuste de las trayectorias de vuelo y del ángulo de la cámara. En la Figura 13 se muestra el sensor sumergible utilizado y sus características principales.

### 3.1 Cámara multiespectral sumergible

El primer sensor utilizado fue una cámara de bajo costo modelo Fuji XP90 con un sensor de 16.4 megapíxeles capaz de capturar imagen y video mientras se encuentra sumergida en agua.

	Modelo:	<b>Fuji XP90</b>
	Sensor:	<b>BSI-CMOS 1/2.3" pulgadas</b>
	Resolución:	<b>16,4 MP</b>
	Espacio de color:	<b>RGB</b>
	Sensibilidad ISO:	<b>6400</b>
	GPS:	<b>No</b>
	Temperatura de operación:	<b>-10° a 40° Celsius</b>




Figura 13. Principales características del sensor sumergible

### 3.2 Cámara multispectral aérea

Para el caso del sensor aerotransportado, su caracterización es más sencilla ya que al tratarse de un dispositivo comercial enfocado a trabajos de fotogrametría cuenta con una integración de otros sistemas y sensores que mejoran su precisión, como un módulo de posicionamiento GPS, un barómetro para medir la altitud y un sensor ultrasónico para medición del terreno a bajas alturas. Permite además una mayor cantidad de configuraciones de la cámara, sin mencionar que la esta se encuentra montada se sobre un estabilizador mecánico, con lo que los errores inducidos por vibraciones y movimientos quedan ampliamente reducidos, quedando como fuente de incertidumbre los errores inducidos por las condiciones ambientales y las características del objeto que se desea medir como, por ejemplo, textura, condiciones de luz, o distancia al objetivo. Las principales características de este sensor se muestran en la Figura 14.

	Modelo:	<b>DJI phantom 3</b>
	Sensor:	<b>Sony EXMOR CMOS 1/2.3"</b>
	Resolución:	<b>12.4 MP</b>
	Espacio de color:	<b>RGB</b>
	Sensibilidad ISO:	<b>100-3200</b>
	GPS:	<b>Si</b>
	Temperatura de operación:	<b>0° a 40° Celsius</b>
		

Figura 14. Sensor de plataforma aérea

Como ya se mencionó antes en el caso de este dispositivo la calibración y pruebas se simplifica ya que, al contar con una serie de sensores e instrumentos de apoyo para su navegación y estabilización del sensor, además posee la gran ventaja de que se mueve en el aire, las pruebas están más enfocadas en la calidad de los datos obtenidos en función de las condiciones del agua.

### 3.3 Sensor acústico

Se logró integrar también el uso de un sensor acústico, el sensor en cuestión es una sonda multi-haz especialmente diseñada para trabajar en ríos y lagos y embalses, aunque también posee capacidades para operar en áreas cercanas a la costa. Este sensor está montado sobre una plataforma no tripulada especialmente diseñada para transportarlo, para su posicionamiento y navegación se vale de un sistema GPS con corrección en tiempo real que permite un posicionamiento preciso durante

la captura de datos. El cuadro de los distintos elementos que componen el sistema se muestran en la Figura 15.


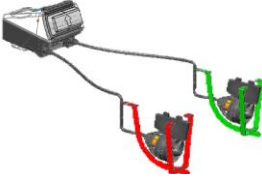



<b>Casco Principal</b>		
	Modelo: T-Board 1216 Dispositivo: <b>Casco de montaje para sistemas 1.5 x 65</b> Dimensiones: Materiales: Fibra de vidrio sobre núcleo de espuma laminada de basalto	
<b>Sistema de Potencia y Motorización</b>		
	Modelo: <b>YrQPOD</b> Dispositivo: <b>Sistema modular de vehículos de superficie.</b> Velocidad máxima: <b>1.5 m/s</b> Temperatura de operación: <b>-10° C a 40° C</b> Rango de recepción: <b>500 m</b>	
<b>Ecosonda</b>		
Modelo: <b>HydroSurveyor (variante M9)</b> Tipo de banda: <b>“Multi” (múltiples frecuencias acústicas)</b> Numero de transductores: <b>9 transductores</b> Brújula: <b>Estándar de 360 °</b> Sensor de Inclinación: <b>Sensor de dos ejes</b> Rango de profundidad: <b>0.20 a 80 metros</b> Otras funciones: <b>Navegación asistida</b>		
Dispositivo: <b>Perfilador de velocidad del sonido</b> Precisión de salinidad: <b>0,1 PSU</b> Precisión de temperatura: <b>0,05 ° C</b> Posición GPS: <b>Integrada</b> Transferencia de datos: <b>Dual</b>		
<b>Sistema de posicionamiento y navegación</b>		
Hemisphere GNSS GPS Rtk solution Precisión horizontal GPS SBAS: <1,0 m Precisión horizontal RTK GPS: <0,02 m Precisión vertical < 0.04 m		

Figura 15. Resumen de características del sistema de sensor acústico, y dispositivos.

Este dispositivo posee una configuración más compleja al tener una serie de dispositivos independientes que se integran en un mismo sistema, por lo que requieren de una configuración individual y otra en conjunto para su correcta operación. El cuadro completo de características se incluirá de manera extendida como material complementario.

Se deben tener ciertas consideraciones antes de operar un vehículo de estas características, como ya se mencionó en la sección de plataformas autónomas, este equipo no es un vehículo autónomo, se le considera de navegación asistida, donde software especializado recaba datos de telemetría del equipo e indica al operador las trayectorias levantamiento acústico, además posee funciones de detección de fondo para navegación segura. Con lo que el dispositivo emite una alarma cuando se encuentra en zonas de baja profundidad.

Así mismo el equipo no posee un sistema de guiado por cámaras, solo por instrumentos GPS y brújulas, esto implica que el operador debe navegar con línea de vista para evitar obstáculos lo cual dada la distancia y la perspectiva pueden ser considerablemente difícil si se extiende la región de sensado lejana al operador, este modo de operación se llama de línea de vista LOS (Line of Sight). Dicho esquema de funcionamiento de este tipo de operación se muestra en la Figura 16.

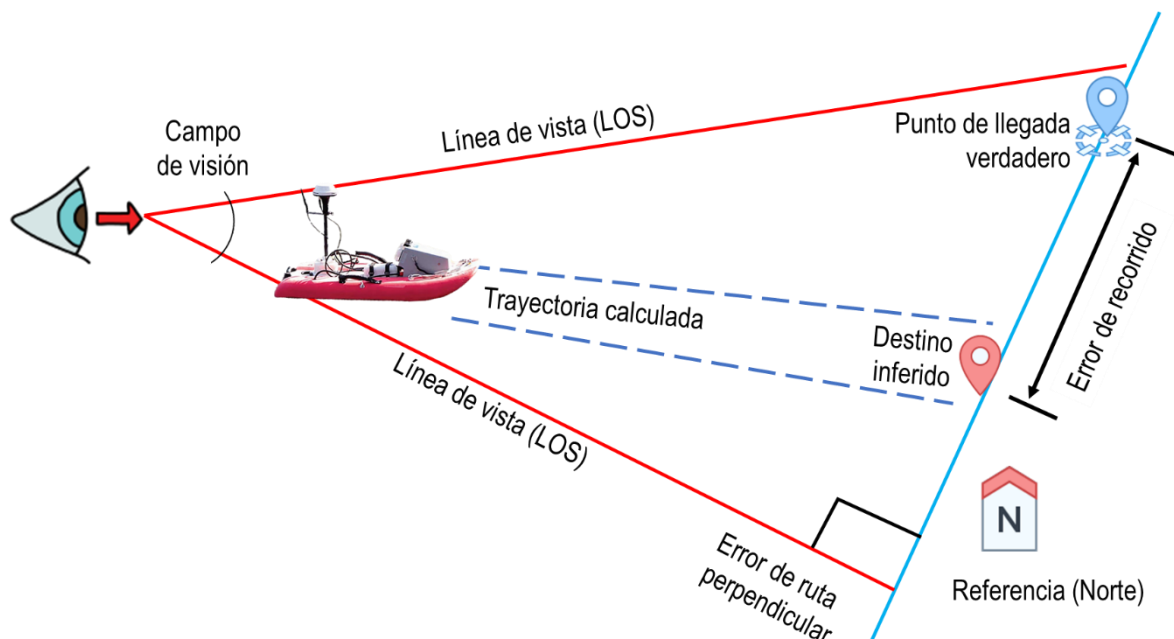


Figura 16. Esquema control con línea de vista (LOS)

El guiado por seguimiento de trayectoria es ideal para evitar una colisión cuando se opera en un entorno dinámico con obstáculos en movimiento. Sin embargo, se ha comprobado que el guiado de seguimiento de trayectoria poco eficiente para el funcionamiento típico de los USV.

Adicionalmente se debe tener en cuenta las características del sistema de control, ya que la conexión entre la base y el dispositivo puede verse afectada por elementos externos como vegetación, interferencia de otras fuentes electromagnéticas, la o propia atenuación de la señal con la distancia.

### **3.4 métodos de calibración ópticos**

La calibración es necesaria antes de realizar cualquier levantamiento de datos, en el caso de las cámaras digitales (en su mayoría de consumo), esto es particularmente necesario para que sean aplicables a la medición fotogramétrica de rango cercano.

La calibración analítica de la cámara mediante el ajuste del haz autocalibrador se creó a principios de la década de 1970 y se convirtió rápidamente en una herramienta estándar en los sistemas de fotogrametría de corto alcance (Fraser & Brown, 1986) A diferencia de las características de la calibración de las cámaras aéreas en la fotogrametría topográfica, las utilizadas para las aplicaciones de corto alcance, en particular la metrología de visión industrial, tienen requisitos de alta precisión en el espacio del objeto, lo que se traduce en una precisión en el espacio de la imagen de 0,1 píxeles o superior.

La labor que implica la calibración de la cámara también se ha estudiado en por las disciplinas de visión por computadora. Que se han dedicado en desarrollar procedimientos de calibración más fáciles de usar y más automatizados basados principalmente en enfoques lineales con paquetes de software de código abierto, como es el caso de las herramientas basadas en OpenCV.

El método estándar de calibración La mayoría de los enfoques de modelización de cámaras se basan en la introducción de parámetros adicionales para modelizar las desviaciones entre el modelo matemático ideal de perspectiva central y la realidad física de la cámara. Los modelos tienen en cuenta las perturbaciones de la colinealidad debidas al objetivo, el sensor, la electrónica y el cuerpo de la cámara. Aunque se ha publicado un gran número de conjuntos de parámetros adicionales en la literatura, el conjunto de parámetros para la distorsión del objetivo introducidos en 1971 (Brown, 1971) se ha convertido en un estándar aceptado

#### **3.4.1 Modelos de calibración extendidos**

Mientras que el modelo de calibración convencional es válido para las cámaras de perspectiva central, pueden ser necesarios modelos ampliados para las cámaras de perspectiva no central o para abordar errores sistemáticos adicionales. Las perturbaciones reconocidas de la colinealidad de los rayos de imagen, que no se compensan totalmente mediante el modelo de calibración estándar, son la aberración cromática, los cambios de la imagen en el punto principal y la falta de planeidad del conjunto de sensores.

La aberración cromática afecta a la calidad de la imagen y se produce cuando se utilizan fuentes de luz estándar para la obtención de imágenes fotogramétricas.

Debido a la dispersión, las distintas longitudes de onda atraviesan el sistema óptico de forma diferente, lo que provoca un cambio de la distancia focal y un desplazamiento lateral de los rayos de la imagen.

Para cada longitud de onda, o cada banda de color RGB, pueden modelarse y calibrarse los parámetros de punto principal, distancia principal y distorsión. Las variaciones de imagen a imagen en la posición del punto principal surgen debido a la limitada estabilidad mecánica de muchos tipos de cámaras.

Durante la adquisición de múltiples imágenes pueden producirse tensiones mecánicas debido a la inclinación y la rotación de la cámara en torno al eje óptico, así como a la manipulación descuidada de la cámara, los cambios de temperatura o las vibraciones de la plataforma. El efecto puede modelarse en un ajuste de paquetes auto calibrados creando una cámara virtual para cada imagen con parámetros individuales de distancia principal y coordenadas de punto principal, mientras que los parámetros de distorsión suelen mantenerse constantes para todas las imágenes.

A suposición de que el plano focal de la cámara es absolutamente plano es crucial para la formulación de la ecuación de colinealidad.

En la fotogrametría analógica, era tradicional garantizar la planitud del plano de la imagen por medios mecánicos o compensar las desviaciones de la planitud mediante un campo denso de puntos de referencia planares en una placa de vidrio adicional para limitar los efectos de la falta de planitud del plano focal, que provoca desplazamientos radiales dentro de la imagen.

En el caso de las cámaras digitales, se supone que la falta de planitud del sensor tiene poca importancia debido al alto grado de planaridad de los conjuntos de sensores CCD y CMOS y a su pequeño tamaño físico. Desde un punto de vista práctico, no existe una alternativa real a la aceptación de la suposición de la planitud del sensor, ya que la topografía del plano focal de un sensor de cámara digital no se presta a la medición directa, y se ha establecido que la falta de planitud no puede modelarse completamente mediante la inclusión de parámetros adicionales en una placa de ajuste del haz auto calibrado.

El problema de la falta de planeidad del plano focal se vuelve más importante a medida que el tamaño de los sensores aumenta, especialmente en el caso de los objetivos gran angulares. Como ya se ha dicho, la precisión de la medición de la imagen en el caso de fotogrametría de corto alcance puede superar fácilmente 1 nm, y con un ángulo de incidencia de 45 grados, una desviación de 1  $\mu\text{m}$  de la planitud dará lugar a un error de posición de la imagen del mismo tamaño. Si se utilizan espejos en la ruta óptica, los efectos de falta de planitud del sensor, es decir, la introducción de fallos laterales imperceptibles, pueden ser significativos.



### 3.5 Cámara multispectral sumergible (calibración y pruebas)

Cómo en todo trabajo que implica el uso de algún tipo de sensor el primer paso consiste en la caracterización de este, esto se logra mediante una serie de pruebas de calibración como las anteriormente descritas para conocer su comportamiento y capacidades. Estas se llevaron a cabo en laboratorio para medir fueron caracterizar las capacidades de la captura de imágenes cuando la cámara se encuentra en movimiento y en diferentes condiciones de luz, dentro de un ambiente controlado, buscando aislar las variables del entorno. Un esquema explicativo de cada una de las pruebas se observa en la Figura 17.

La primera de estas primeras pruebas se hizo en seco y adosando la cámara a una plataforma con ruedas que se mueve en diferentes trayectorias mientras se captura información durante el recorrido.

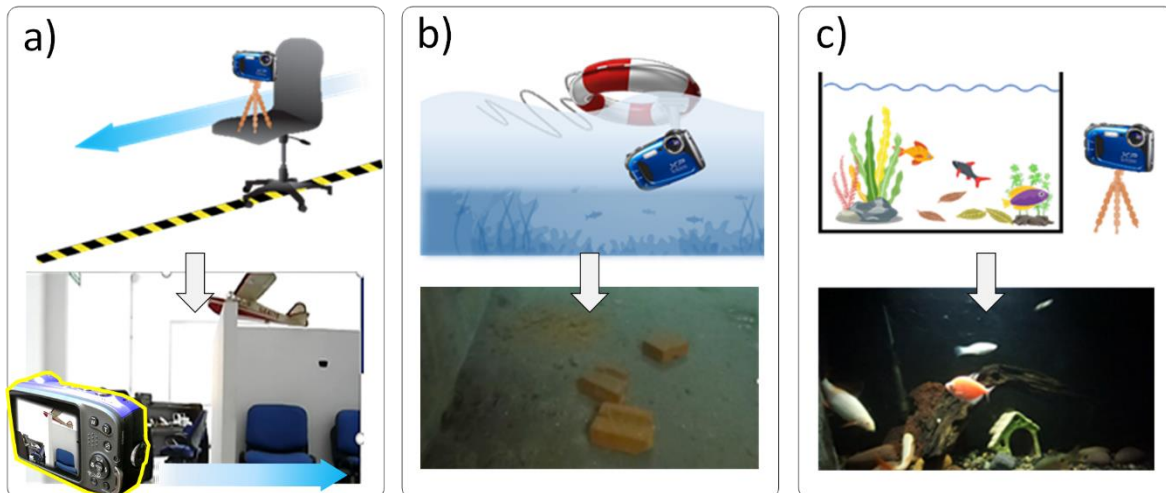


Figura 17. Pruebas en ambiente controlado: a) recorrido en laboratorio, b) plataforma de arrastre, c) Acuario de prueba de ambiente acuático.

Lo siguiente fue hacer una prueba realizando trayectorias de recorrido similares a la anterior, sin embargo, en esta ocasión con la cámara sumergida en el agua, por lo que fue necesario confeccionar un dispositivo flotante que pueda portar la cámara y haga las funciones que la plataforma con ruedas de la prueba anterior. Se diseñó dispositivo flotante la una cámara sumergible acoplada en la parte posterior del mismo b), el cual se introdujo dentro de un tanque de agua para poder realizar la captura de imágenes bajo la superficie, el desplazamiento se hizo remolcándolo de manera manual, se colocaron diferentes objetos en el fondo del tanque de medidas conocidas para medir la precisión de las tomas (Trobiani et al., 2018). Y finalmente la última prueba de laboratorio c) consistió en una toma continua de un acuario para la captura de objetos en movimiento, dentro del tanque se encuentran peces en

movimiento y diferentes objetos, esto en un ambiente de baja iluminación con el fin de emular escenarios reales con malas condiciones de luz ambiental o turbidez y medir la efectividad de registrar los elementos bajo estas condiciones.

### 3.6 Muestreos preliminares

Esta etapa se llevó a cabo siguiendo las técnicas utilizadas en laboratorio, pero añadiendo el factor de incertidumbre asociado al ambiente real. En este muestreo preliminar se puso a prueba la efectividad de las calibraciones del sensor sumergible, dado que las dimensiones en las zonas de muestreo son mayores que las del laboratorio donde se llevaron las pruebas, así como en otros ambientes controlados, el arreglo flotante donde se había colocado la cámara sumergible era inadecuado para el recorrido de muestreo, ya que es necesario moverlo manualmente, de lo cual se desarrolló una plataforma móvil de bajo costo para este propósito.

#### 3.6.1 Integración de plataforma acuática

Para realizar las pruebas de calibración del sensor en condiciones subacuáticas reales era necesario llevarlo de manera interna, por lo que se diseñó un medio de transporte para el sensor óptico sumergible. Se le agregó un sistema de propulsión sencillo controlado a distancia, un sistema de timones simple, y la montura para la cámara se colocó en la parte delantera para balancear el peso de los componentes. Imágenes ilustrativas de la plataforma y sus características principales se muestran en la figura 18.

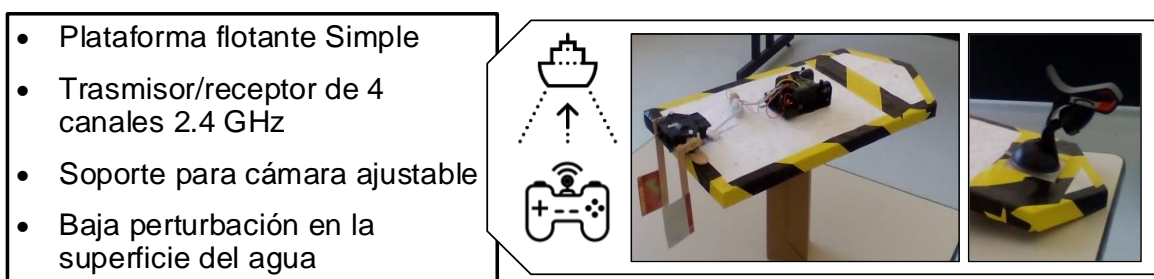


Figura 18. Plataforma motorizada flotante.

Para implementación se eligieron dos áreas principales de prueba que se ilustran en la Figura 19. Cada una de estas áreas incorpora nuevos componentes de incertidumbre del medio acuático natural, el primero de ellos (a) concretamente se trata de un estanque natural de baja corriente y en buenas condiciones de iluminación. La cámara subacuática se integró en una plataforma móvil, se realizó un mapeo siguiendo una trayectoria que maximizara el área de cobertura.

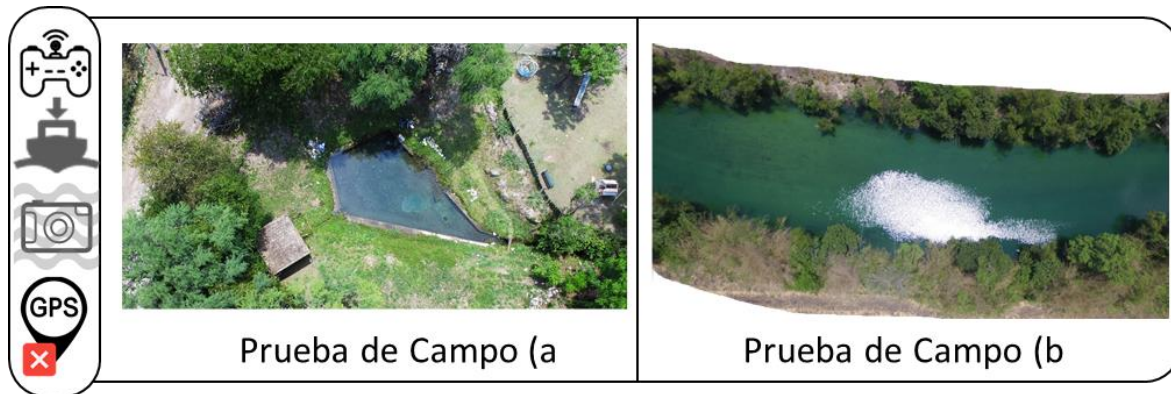


Figura 19. Escenarios de calibración de sensor óptico aéreo sobre cuerpos de agua.

Mientras la segunda (b) es un río de corriente baja y profundidad, así como, diferentes condiciones de turbidez, el estanque presenta aguas transparentes, pero con gran cantidad de algas suspendidas en la superficie, mientras que el río presenta mayor turbidez en el agua, pero con un espejo de agua sin partículas flotantes.

Este muestreo además de complementar al anterior realizado en un acuario, y de la misma manera buscamos conocer la capacidad que tiene el sensor de capturar información en escenarios reales, cabe mencionar que, en este estanque de pruebas, también se existe la presenciado de peces, lo que permite tener un elemento en coincidente importante para la etapa de procesamiento.

### 3.6.2 Método de Captura

Dadas las características de fabricación y su interpretación en función de la distancia (profundidad) entre la cámara y el objetivo, hacen conveniente que la captura de datos sea lo más continua posible, por lo que la información adquirida se almacenó en un formato de video a 60 cuadros por segundo, adquiriendo una gran cantidad de información en cada prueba. Cabe mencionar que durante el procesamiento de datos se aplicó un remuestreo seleccionando 1 cuadro por cada 30, es decir, 2 cuadros por segundo de video. A partir de estas "instantáneas", se puede obtener suficiente información para lograr la superposición de datos y la posterior reconstrucción en 3D. este proceso se puede observar de mejor manera en la Figura 20.

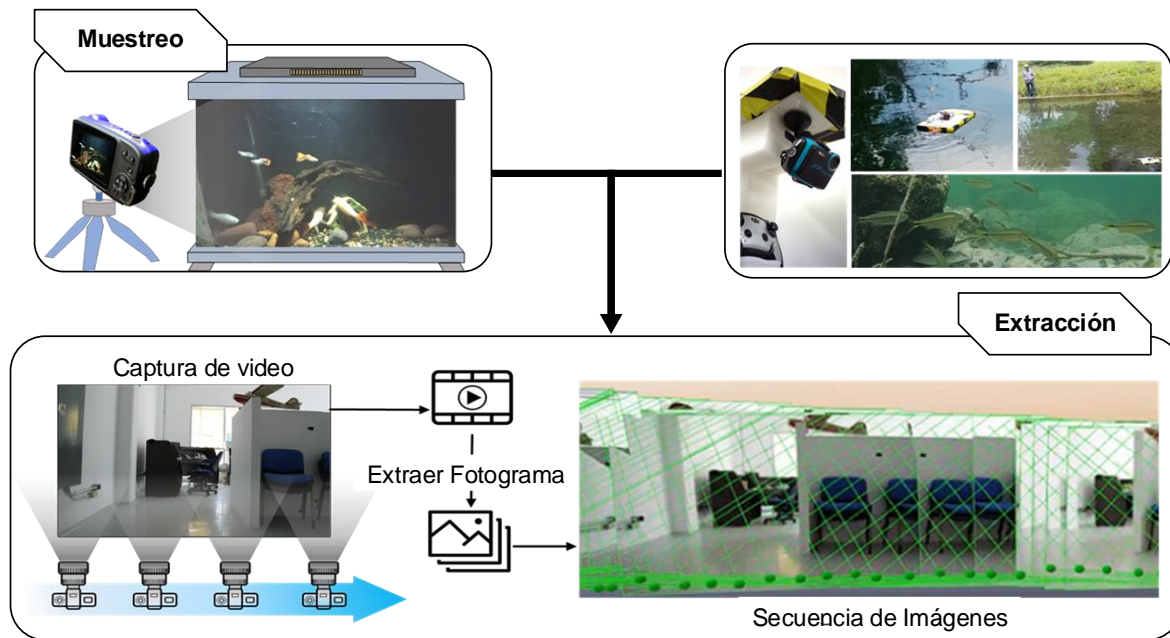


Figura 20. Procedimiento de captura de información a partir de secuencia de video.

### 3.7 Prueba de segmentación y detección de objetos en movimiento

La segmentación de una imagen es el proceso de clasificar cada píxel de forma que los píxeles con la misma etiqueta tengan cualidades visuales similares. La segmentación de imágenes produce una colección de segmentos que abarcan toda la imagen o un conjunto de contornos tomados de la misma. Y en términos de algún atributo calculado, como el color, la intensidad o la textura, cada píxel de un área es comparable, una vez realizada la segmentación es posible entonces localizar un objeto y darle seguimiento o identificarlo (Asano & Yokoya, 1981)

La práctica de encontrar y seguir un objeto en movimiento en una serie de fotogramas de vídeo se conoce como seguimiento de objetos, se emplean sensores ópticos y usualmente capturando un video como entrada de datos. En el caso de los ambientes acuáticos el vídeo grabado puede incluir algo de ruido, definido esto como anomalías visuales que reducen la calidad de este. Por lo que vigilar la toma de la muestra; así como, aplicar técnicas de preprocesamiento de los datos para mejorar la calidad de la imagen y poder detectar objetos en movimiento.

El procedimiento general para identificar objetos en movimiento a partir de objetos de fondo comienza con un umbral y binarización de las instantáneas. Los objetos que no pertenecen al fondo se pueden determinar por la diferencia absoluta entre cuadros. Para segmentar los objetos de una imagen que nos interesan, utilizamos un umbral, es decir, un valor que nos permite decidir qué píxeles compone los objetos que buscamos y qué píxeles son solo el entorno de estos objetos. Este método utiliza las escalas de grises de la imagen, por lo que es necesario realizar

un tratamiento previo. Un cuadro ilustrativo sobre el proceso de segmentación y detección se muestra en la figura 21.

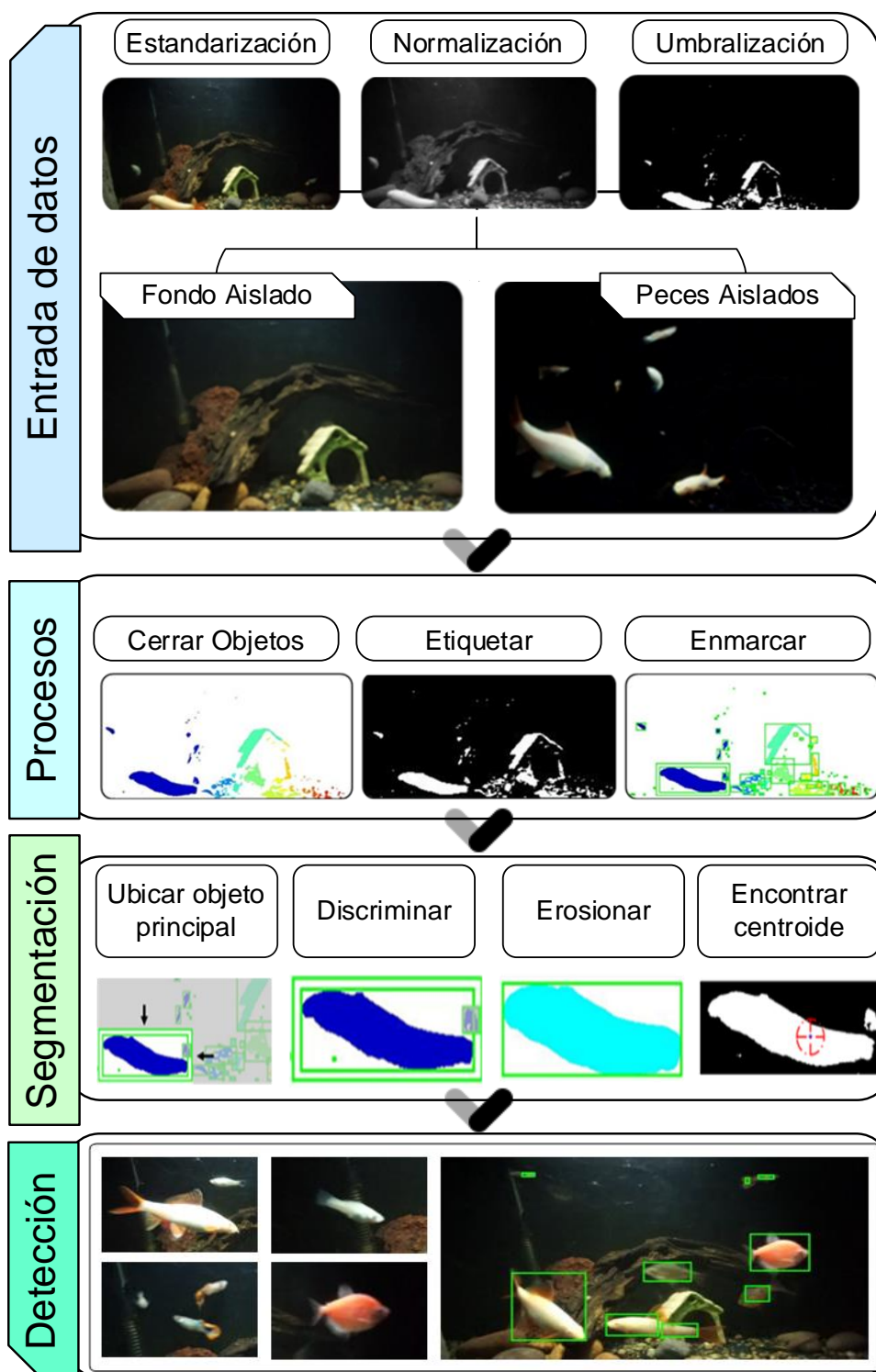


Figura 21. Esquema del procedimiento de segmentación en sus 3 etapas principales.

## **Entrada de datos.**

En esta etapa se estandarizan todos los datos de entrada a resoluciones y proporciones que sean uniformes para todas las muestras. La normalización consiste en transformar la escala de color a tonos de gris, para agilizar el tiempo de proceso, luego se calculan los umbrales para cada elemento en la escena, tras lo cual es posible identificar cada elemento dentro de la escena.

## **Procesos**

Este método se basa en dos propiedades básicas de los valores del nivel de gris (discontinuidad y similitud). La discontinuidad divide la imagen en función de cambios repentinos en el nivel de gris (detección de puntos únicos, líneas y bordes), la similitud, por otro lado, divide la imagen en función de la búsqueda de áreas que tienen valores similares (umbral, incremento de la región).

## **Segmentación**

Flujo de trabajo de la etapa de clasificación donde se identifica el objeto principal y se refina la precisión de los contornos y proporciones para mejorar la identificación del objeto (pez). En este punto se ha identificado el elemento de interés, el siguiente paso es segmentarlo y delimitar el área de identificación. Adicionalmente, se calcula el centroide del objeto, el cual será necesario para una identificación precisa del pez, ya que, aunque se mueva en diferentes posiciones, las proporciones geométricas se mantienen constantes, brindando un criterio de identificación más confiable.

## **Detección**

Los pasos anteriores permiten separar los objetos en movimiento de los objetos de fondo, por lo que ahora estos procedimientos se aplican iterativamente a la secuencia de video remuestreada logrando rastrear los objetos que aparecen en el video, lo que permitirá realizar el proceso a partir de cuadros obtenidos simultáneamente a la transmisión de video. Los procesos mostrados en cada una de las etapas fueron desarrollados e implementados bajo dentro del entorno MATLAB.



# Capítulo 4

## Metodología

### 4.1 Enfoque metodológico

El objetivo principal de la fusión de datos es estimar el estado de un objetivo u fenómeno a partir de múltiples fuentes bajo las siguientes consideraciones: la primera es cuando el fenómeno requiere de información de múltiples fuentes. La segunda hace alusión a cuando sea necesario el empleo de información redundante y complementaria (Schmitt & Zhu, 2016). Las herramientas para la Fusión varían entre disciplinas, pero se pueden englobarlas en dos áreas principales.

- Alineación de los datos/objetos: El paso de alineación se trata de transformaciones de unidades de medida, coordenadas espaciales y otros ajustes destinados a lograr una representación común de las mediciones y observaciones heterogéneas que describen el objeto de interés.
- Correlación de los datos/objetos: La etapa de correlación consiste principalmente en asociar entre sí diferentes datos multisensor de un determinado objeto de interés con el que estén relacionados. Es decir, se trata de permitir que el proceso de fusión de datos sepa qué medidas particulares se supone que deben fusionarse para dar paso a la estimación final.

En la primera etapa organizar y reformatear la información de múltiples plataformas y sensores es una tarea ardua que requiere una estructura bien definida. Enseguida se presenta una alternativa para la generación de entornos subacuáticos 3D a partir de datos de plataformas aéreas y acuáticas. Con la flexibilidad de que dichos datos de entrada pueden ser georreferenciado, o en caso contrario, no contar esta información espacial.

### 4.2 Fusión de datos heterogéneos

La figura 22 muestra la estructura general para la fusión de datos, que consta de cuatro pasos principales y un paso de caracterización, que se denomina paso 0. El paso 1 consiste en adquirir datos de diferentes plataformas, en el paso 2 se realizan los procesos de estandarización de datos multifuente, para posteriormente en el paso 3 con los datos ya alineados se puedan hacer las estimaciones

necesarias para poder integrar los datos y poder realizar la fusión de datos, que es la meta y paso último del esquema metodológico.

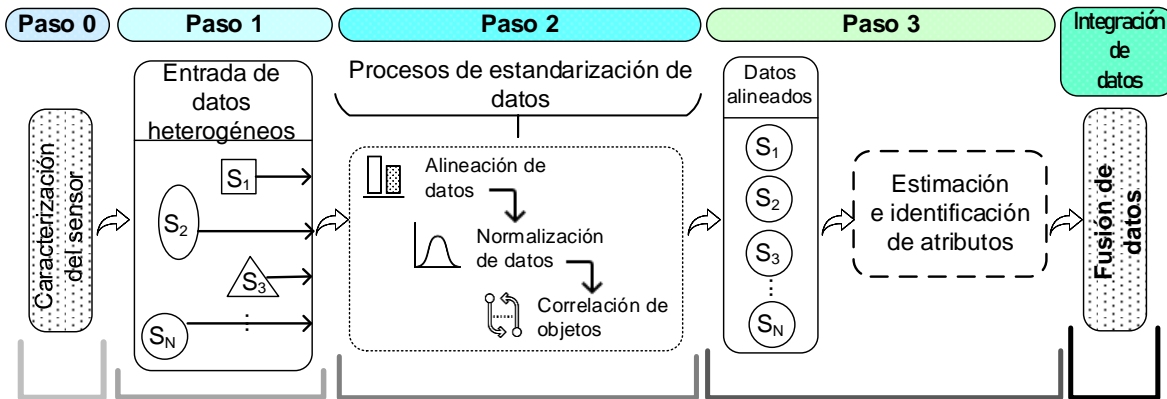


Figura 22. Esquema metodológico propuesto para la fusión de información heterogénea y multiplataforma.

En esta investigación, se propuso fusionar datos aéreos y acuáticos de sensores ópticos multiespectrales. El desafío es generar un marco que integre ambos conjuntos de datos, a pesar de que los datos adquiridos de la plataforma acuática no estén georreferenciados. Y que mediante un proceso de fusión de datos, el conjunto resultante logre mejorar la calidad del resultado maximizando las fortalezas de cada uno de los sensores utilizados. Esto tomando en cuenta que los sensores basados en imágenes dependen de la penetración de la luz en el medio (Hare, 1994). Idealmente condiciones de mucha luminosidad son deseables, aunque esto no garantiza la captura de información de manera adecuada, por ejemplo, cuando hay un reflejo del sol en la superficie del agua, es imposible ver más allá del espejo de agua.

Otro escenario es cuando existen sombras producidas por algún objeto que impiden la penetración de luz en el agua provocando una falta de información en las imágenes. Estos problemas se pueden resolver colocando un sensor adecuado dentro del medio acuático, es decir, debajo de la superficie del agua. Esto permite eliminar las variables relacionadas con el cambio de ambiente aire/agua y llenar los vacíos de información en las imágenes tomadas desde el aire. Este esquema de implementación se observa en la Figura 23 con sus distintas etapas y con respecto a cada sensor y plataforma utilizados.



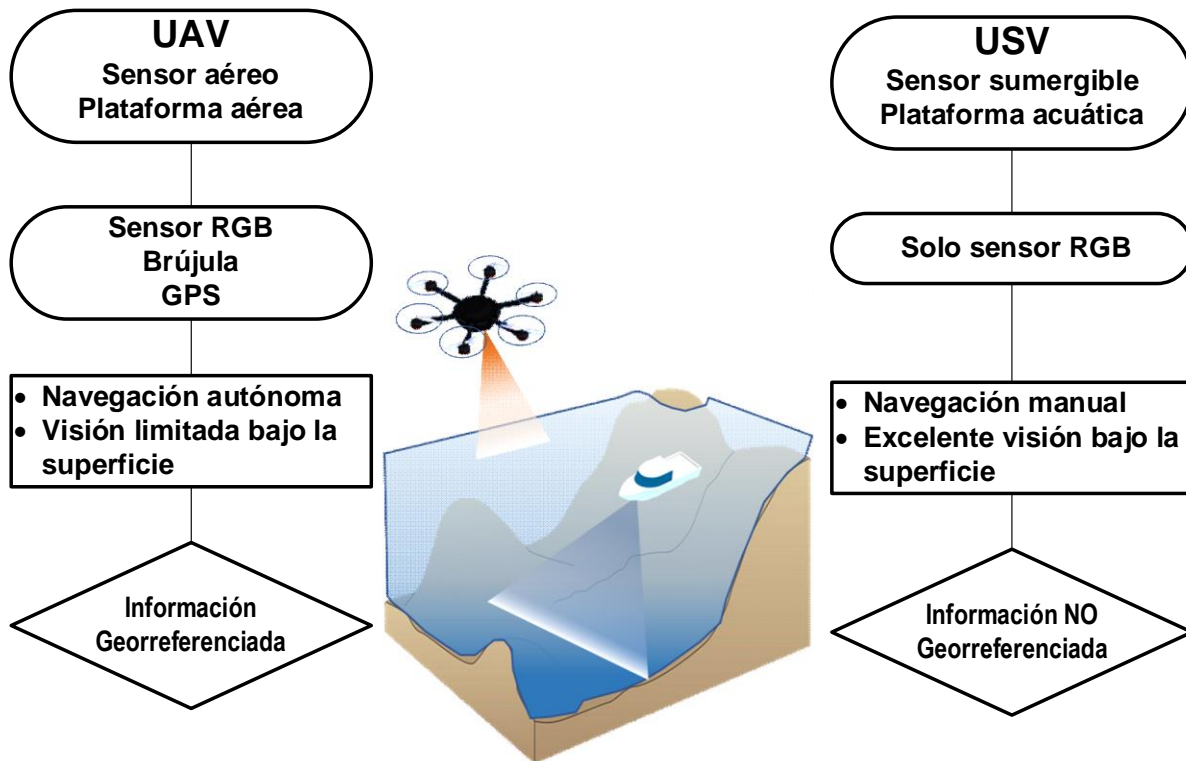


Figura 23. Cuadro comparativo de metodologías utilizadas en el estudio. En el centro hay una representación del escenario de aplicación y las diferentes etapas de cada método asociado a su respectiva plataforma UAV-USV.

### 4.3 Integración de sensores y plataformas

Fue necesario implementar una plataforma capaz de transportar el sensor acuático. Esta plataforma operada a distancia es un dispositivo simple y de bajo costo. Está construido con poliestireno extruido para darle alta flotabilidad, su bajo peso y pequeño tamaño que facilitan su utilización en campo. También se agregaron un sistema de propulsión motorizado y timones para el control.

El sensor se instaló en la parte inferior de la embarcación en un montaje articulado, teniendo en cuenta el centro de gravedad para evitar cambios en la inclinación al aplicar potencia y reducir el movimiento debido al oleaje. Las pruebas de distancia de transmisión / recepción se realizaron con y sin obstáculos entre el receptor y el transmisor, logrando una distancia de control efectiva de unos 116 metros con línea de visión y unos 50 metros con obstáculos. En la Figura 24 se muestra un esquema del bote a control remoto y la cámara sumergible.



Figura 24. La primera fila muestra las características principales del sensor aerotransportado, en la parte central se muestra un diagrama simplificado de las características principales de la plataforma remota y el acople del sensor sumergible, finalmente el modelo y características del sensor integrado en el UAV se muestran en la última fila del diagrama.

La segunda etapa de captura de imágenes en las áreas de prueba consistió en capturar imágenes desde el aire para complementar la toma submarina del área de prueba, utilizando un modelo comercial UAV Phantom 3 adecuado para este propósito.

#### 4.4 Estandarización de datos

Los procesos de estandarización de datos son parte del paso 2. Las principales acciones que realizar son la alineación de datos, la correlación de objetos y la estandarización de la información. Los datos adquiridos por la plataforma acuática son particularmente complejos debido a la naturaleza de los levantamientos. Uno

de los factores a considerar en este tipo de plataforma es la perturbación superficial provocada por el movimiento de la plataforma en el espejo de agua, así como los diversos sedimentos o elementos suspendidos en el agua. La Figura 25 muestra estas condiciones.

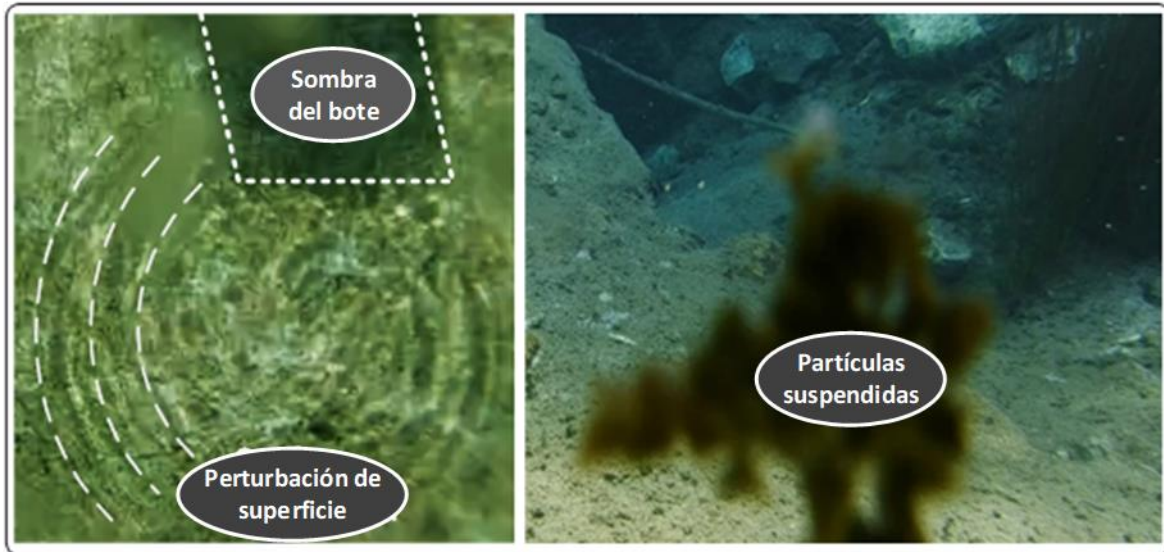


Figura 25. La plataforma puede producir alteraciones en la superficie del agua distorsionando la imagen obtenida y la materia en suspensión puede generar anomalías en las capturas u obstruir completamente la visión del sensor.

Para tener una mejor correlación entre los datos adquiridos por ambas plataformas, optamos por realizar trayectorias de mapeo especiales para cada plataforma. Para las plataformas aéreas las trayectorias suelen ser en líneas de barrido en áreas rectangulares también llamadas "adelante y atrás" para formar una malla (Di Franco & Buttazzo, 2016) eficiente en cobertura y gasto energético.

En el caso del sensor para capturar información debajo de la superficie de la laguna, la cual tiene la geometría de un polígono irregular, es deseable una trayectoria en espiral (Cabreira et al., 2019) que favorezca la navegación por el rango de giro de la embarcación y permita una mejor cobertura en las esquinas y bordes de la laguna. En la Figura 26 se muestra un cuadro ilustrativo de ambas trayectorias de navegación respecto de cada área de muestreo.

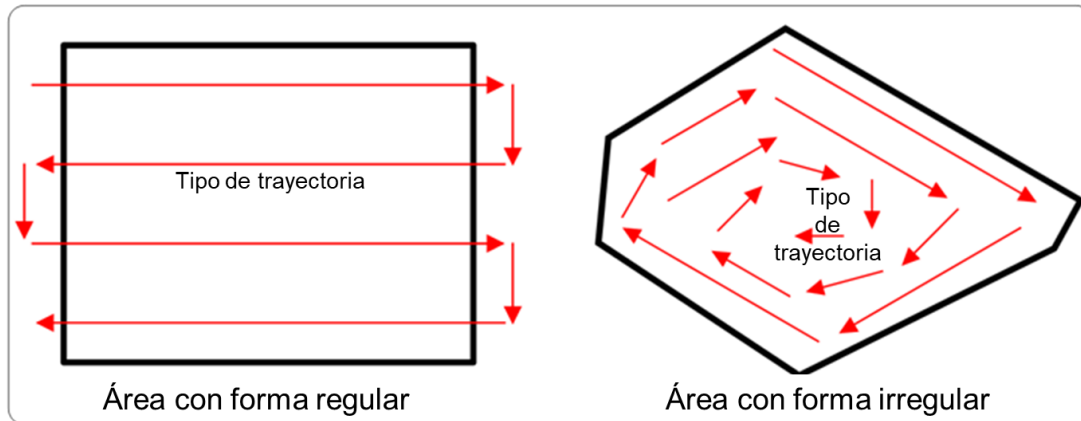


Figura 26. Comparativa de 2 de trayectorias de navegación dependiendo de la geometría del área de muestreo, trayectoria de malla en áreas regulares, y la trayectoria en espiral para áreas poligonales.

Esto es especialmente importante dado que la plataforma móvil no cuenta con GPS por lo que la información obtenida deberá ser localizada y orientada únicamente en base a los puntos de correspondencia entre imágenes. Con base en las consideraciones anteriores fue posible capturar un video continuo con una duración de 11:49 minutos con una resolución de 1280x720 píxeles a 60 cuadros por segundo, se muestrearon 6 cuadros por cada segundo de filmación para reducir el tamaño de la muestra., obteniendo 7.090 cuadros del fondo del estanque.

#### 4.5 Métodos SFM-MVS

SFM (Structure From Motion), o estructura a partir del movimiento, es una técnica de visión por computadora capaz de producir una reconstrucción tridimensional a partir de un conjunto de imágenes en dos dimensiones que se superponen entre sí. El método consiste en extraer la mayor cantidad de puntos concordantes entre cada imagen estos puntos denominados también puntos clave serán identificados entre las distintas escenas, una vez obtenidas las correspondencias se genera un sistema de referencia coordinado en tres dimensiones, también llamada nube de puntos dispersa, y mediante un ajuste iterativo de haces a partir de una optimización de mínimos cuadrados es posible calcular las posiciones tres dimensionales de la cámara con respecto de la escena. Posteriormente se aplica el método MVS(Multi View Stereo) que permiten generar la información faltante en las áreas vacías de la nube dispersa, para así generar un nuevo resultado conocido como nube densa de puntos, la cual es la una reconstrucción en tres dimensiones la escena original (Meinen & Robinson, 2020). Ambas etapas se pueden ver como una consecución de pasos en un proceso de reconstrucción a partir de imágenes, o bien como técnicas separadas dependiendo del tipo de sensor utilizado, la técnica de captura

de información y si se cuenta con un sistema de referencia espacial que complemente la información de cada imagen capturada. En la Figura 27 se muestra un diagrama del proceso general para cada uno de los métodos para cada sensor y plataforma.

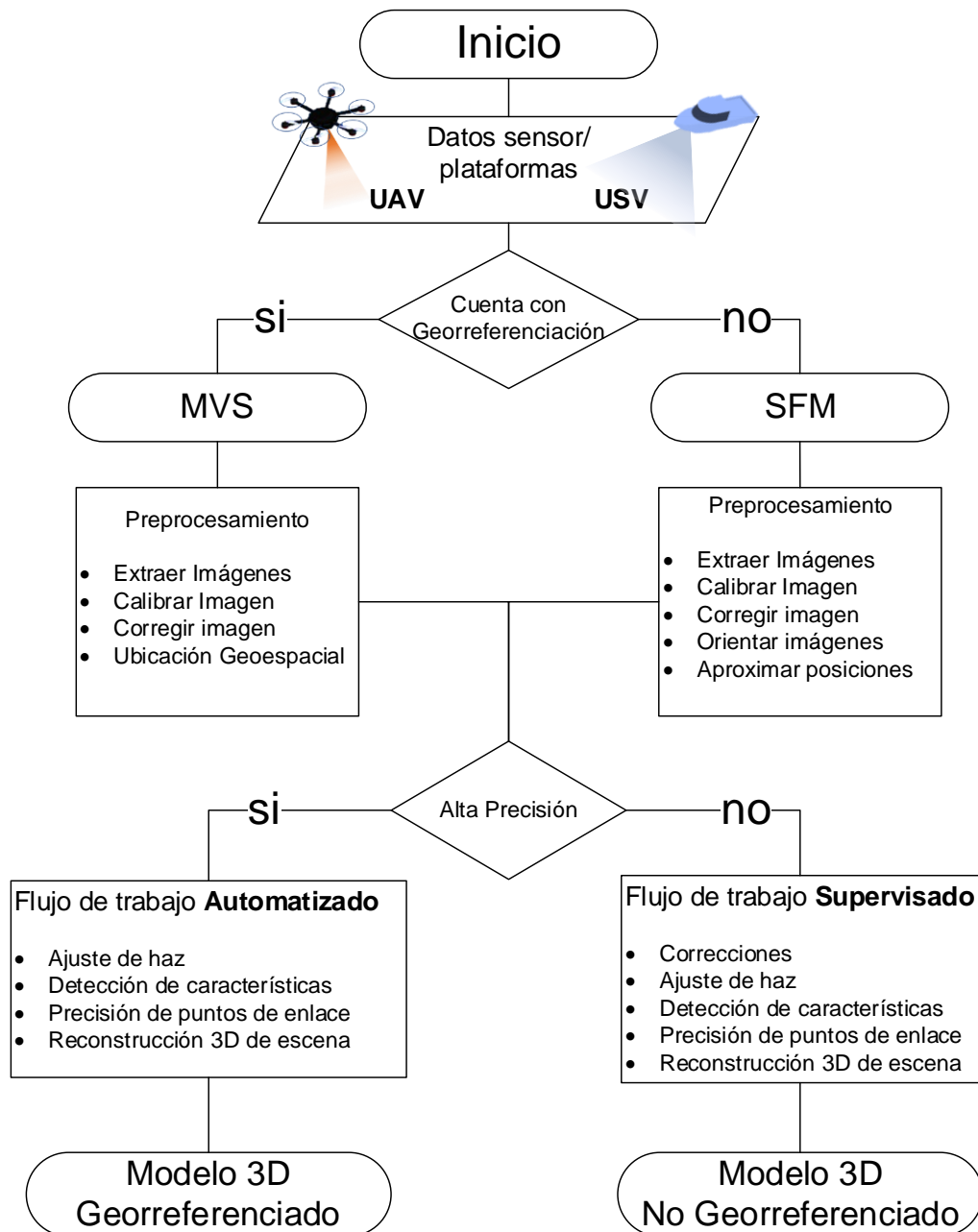


Figura 27. Diagrama de flujo del proceso de captura, procesamiento y flujos de trabajo para la generación de modelos geométricos para reconstrucción de ambiente 3-dimensional.

La técnica SFM-MVS es una técnica que permite obtener información a muy bajo costo, y ha sido ampliamente utilizada en las áreas de las geociencias (Creus et al., 2021) y la ingeniería, ya que al tratarse de una técnica basada en sensores pasivos, se disminuyen considerablemente sus costos de operación al mismo tiempo que facilita su implementación en campo, por lo tanto, es utilizada en áreas remotas o de difícil acceso, donde se imposibilita el transporte o despliegue de equipo topográfico tradicional debido a su peso y dimensiones, a su vez, determinados ambientes imposibilitan el correcto funcionamiento de los equipos por ejemplo zonas con vegetación excesiva, ambiente acuático/subacuático o condiciones climáticas adversas(Westoby et al., 2012).

Lo que la convierte en una gran alternativa a otras técnicas como la TLS (Terrestrial Laser Scanning) muy popular en el área de la ingeniería civil por la precisión que otorga(Mali & Kuiry, 2018), esta técnica se vale de un sensor laser activo LiDAR montado usualmente sobre un trípode, no obstante hay que considerar que este sensor es bastante más costoso y su operación puede ser más compleja en comparación a la SFM-SVM(Lemmens, 2011).

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se abordarán los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los métodos SFM MVS, utilizando las técnicas descritas en la sección anterior y aplicándolas al conjunto de datos previamente obtenido mediante las plataformas aéreas y sumergibles. Adicionalmente se presentan dos casos de aplicación, donde se aplica la metodología propuesta en escenarios de implementación real.

### 5.1 Estrategias de reconstrucción 3D

El enfoque de la reconstrucción 3D depende de las características del entorno, el sensor y la plataforma. En el caso propuesto, la diferencia fundamental radica en la ausencia de información geoespacial de la cámara submarina, esto influye directamente en la elección de herramientas para el procesamiento de la información.

Tanto SFM y MVS se basan en algoritmos de extracción de características de terreno basados en imagen, pero con diferentes estrategias, la fotogrametría clásica posee de antemano la posición y orientación. En el enfoque SFM la pose de la cámara y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente a través de la identificación automática de características coincidentes en múltiples imágenes. Actualmente, existe una amplia variedad de software especializado disponible que permite ingresar los datos apropiados, seleccionar los parámetros de salida y ejecutar el programa, por lo que pueden hacer que el usuario a menudo pase por alto las fortalezas y debilidades de la metodología y el software, lo que puede llevar a que se utilice como una caja negra en la que se ingresan datos y se obtienen resultados automáticamente (Remondino et al., 2017). Esto se pudo comprobar en el primer resultado obtenido utilizando el software comercial Pix4D que a través de su flujo de trabajo automatizado no se obtuvo una reconstrucción adecuada de las capturas submarinas, obteniendo nubes de puntos sin coherencia geométrica. Sin embargo, el resultado fue el esperado considerando las anomalías en las imágenes y la falta de georeferenciación.

Consecuentemente se decidió utilizar un método supervisado, apoyado por el software de código abierto VisualSFM para la reconstrucción 3D y CloudCompare para la validación de nubes de puntos. Dando como resultado la homogeneización de datos tanto de plataformas como de sensores. Los resultados del flujo de trabajo automatizado y supervisado se muestran en la Figura 28.






<b>Flujo de trabajo automatizado</b>	<b>Plataforma:</b> UAV <b>Software:</b> Pix4D <b>Flujo de Trabajo:</b> Automático <b>Ajustes de Procesamiento:</b> Modelo 3D alta resolución <b>Imágenes Calibradas:</b> 103(Calibración automática) <b>Error de reproyección RMS:</b> 0.236 pixeles <b>Error medio RMS:</b> 0.016 metros <b>Muestreo sobre terreno:</b> 1.84 Centímetros <b>Resolución DSM:</b> 1.84 cm/pixel	
	<b>Plataforma:</b> USV <b>Software:</b> Pix4D <b>Flujo de Trabajo:</b> Automático <b>Ajustes de Procesamiento:</b> Modelo 3D alta resolución <b>Imágenes Calibradas:</b> 2096(Calibración automática) <b>Error de reproyección RMS:</b> 1.1846 pixeles <b>Error medio RMS:</b> N/A <b>Muestreo sobre terreno:</b> N/A <b>Resolución DSM:</b> N/A	
<b>Método supervisado</b>	<b>Plataforma:</b> USV <b>Software:</b> Visual SFM <b>Flujo de Trabajo:</b> Supervisado <b>Ajustes de Procesamiento:</b> Visual SFM <b>Imágenes Calibradas:</b> 4000(Calibración automática) <b>Error de reproyección RMS:</b> 0.2050 pixeles <b>Error medio RMS:</b> 0.07 metros <b>Muestreo sobre terreno:</b> 0.12 Centímetros <b>Resolución DSM:</b> 0.115 cm/pixel	

Figura 28. Tabla que contrasta los resultados de la reconstrucción 3D en relación con el flujo de trabajo utilizado para la reconstrucción 3D (supervisada y no supervisada) y a la plataforma utilizada (UAV-USV)

## 5.2 Generación del modelo virtual

Esta etapa comienza con la alineación y adecuación de los datos, para este caso se busca la compatibilidad de datos georreferenciados y no georreferenciados. Como ya se mencionó, los levantamientos sin el uso de GPS requieren una buena cobertura de área y calidad de imagen para tener más puntos clave, ya que estos dependen de la textura y la resolución. Por tal motivo se extrajeron 4000 cuadros con los que se pudo obtener una reconstrucción 3D de buena calidad de la morfología del estanque, el mayor número de muestras ayuda a compensar la falta de información del posicionamiento.

En el caso de la reconstrucción a partir de las imágenes de UAV no se presentaron problemáticas, ya que la reconstrucción generada a partir de esta plataforma fue de Gran calidad siendo solo necesarias 103 imágenes, por el contrario, en el caso de



la cámara sumergible fue necesaria una cantidad 40 veces mayor para la reconstrucción ya que es necesario compensar la falta información geoespacial con la mayor continuidad de datos posible. Esto se logró extrayendo en la mayor cantidad de fotogramas posibles de la secuencia de video, estos fotogramas deben mostrar la mayor cantidad de cobertura del movimiento, para que cada parte del recorrido del sensor quede registrado en un fotograma.

A mayor cantidad de distancia más cantidad de fotogramas, por otro lado, si la distancia no cambia, pero la velocidad del recorrido sí lo hace, será necesario aumentar la cantidad de fotogramas extraídos, ya que al moverse con más velocidad el sensor la distancia que se recorre también es mayor por lo que si el muestreo no es lo suficientemente exhaustivo se pueden generar espacios vacíos, o en nuestro caso puntos ciegos en los que no se tenga información visual en un determinado momento. La Figura 29 muestra la nube de puntos dispersos resultante utilizando la técnica SFM, en el inciso a se observan discontinuidades en la densificación, estas corresponden a áreas donde hubo menos solapamiento dados.

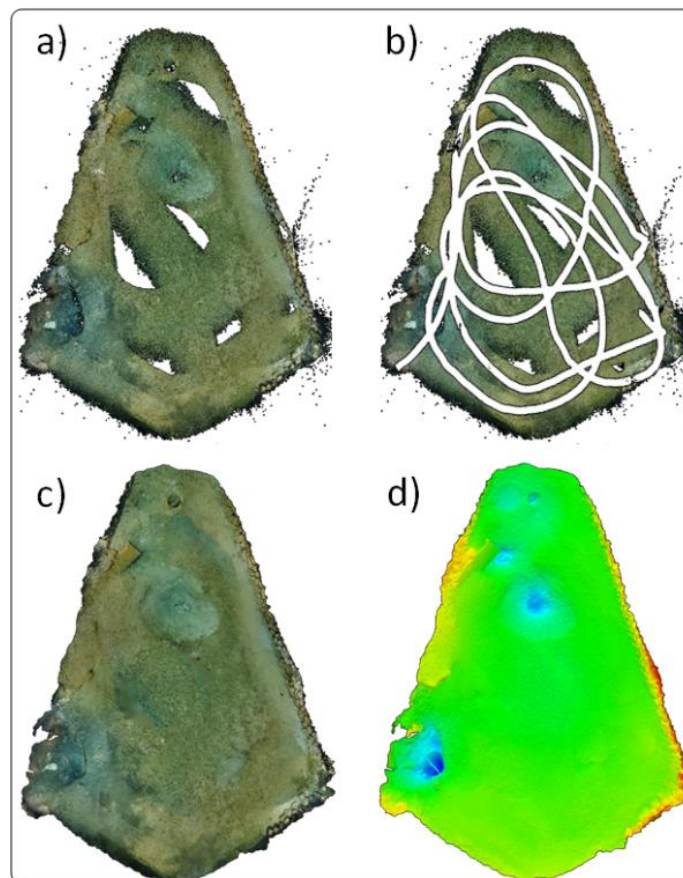


Figura 29. Vista superior del área de estudio y trayectoria geométrica calculada a partir de SFM supervisado. a) Resultado de la nube de puntos obtenida, en b) Trayectoria reconstruida a partir de la nube resultante, c) Modelo digital del terreno, d) Modelo de elevación digital.

Los recorridos de navegación y la textura del fondo, que en estas áreas es demasiado homogéneo. En el inciso b se muestra la nube de puntos debajo de la trayectoria de navegación de la plataforma USV, esta trayectoria podría reconstruirse a partir de la nube de puntos resultante de la aplicación de SFM. En el inciso c se ve un modelo digital de elevación del DEM, obtenido de la densa nube, obteniendo buen detalle de las partes inferiores en forma de cráter que corresponden a manantiales, de ahí la diferencia de coloración en comparación con el resto del fondo. Y finalmente, el modelo de elevación digital en el inciso d. Los datos están listos para integrarse con los datos georreferenciados adquiridos por el sensor aerotransportado.

### **5.3 Validación de resultados**

El procesamiento de los conjuntos de datos de aire y agua se realizó de manera diferenciada en la primera etapa, esto debido a que encontrar coincidencias entre puntos clave sería computacionalmente ineficiente dada la diferencia entre las características y capacidades de ambos sensores, así como la orientación de estos, las cámaras y el número de fotogramas utilizados en cada caso. Ambas técnicas se basan en algoritmos de extracción de características del terreno basados en imágenes, pero con diferentes estrategias, en la fotogrametría convencional la posición y orientación de la cámara se posee de antemano, mientras que en el enfoque SFM la orientación de la cámara y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente mediante la identificación automática de características coincidentes en varias imágenes.

Así, para ensamblar ambas nubes de puntos, se identificaron los puntos coincidentes más importantes, que corresponden a las depresiones de manantiales, rocas de formas definidas y elementos de coloración diferenciable. Una vez identificada, se corrigió la orientación, escala y posicionamiento de la nube de puntos obtenida de la plataforma USV, tomando como referencia la nube UAV. Para validar el resultado de la referenciación de las nubes, se llevó a cabo un análisis de nube a nube para medir la precisión de alineación y posicionamiento utilizando el software de código abierto CloudCompare, los resultados de este procedimiento se observan en la Figura 30.

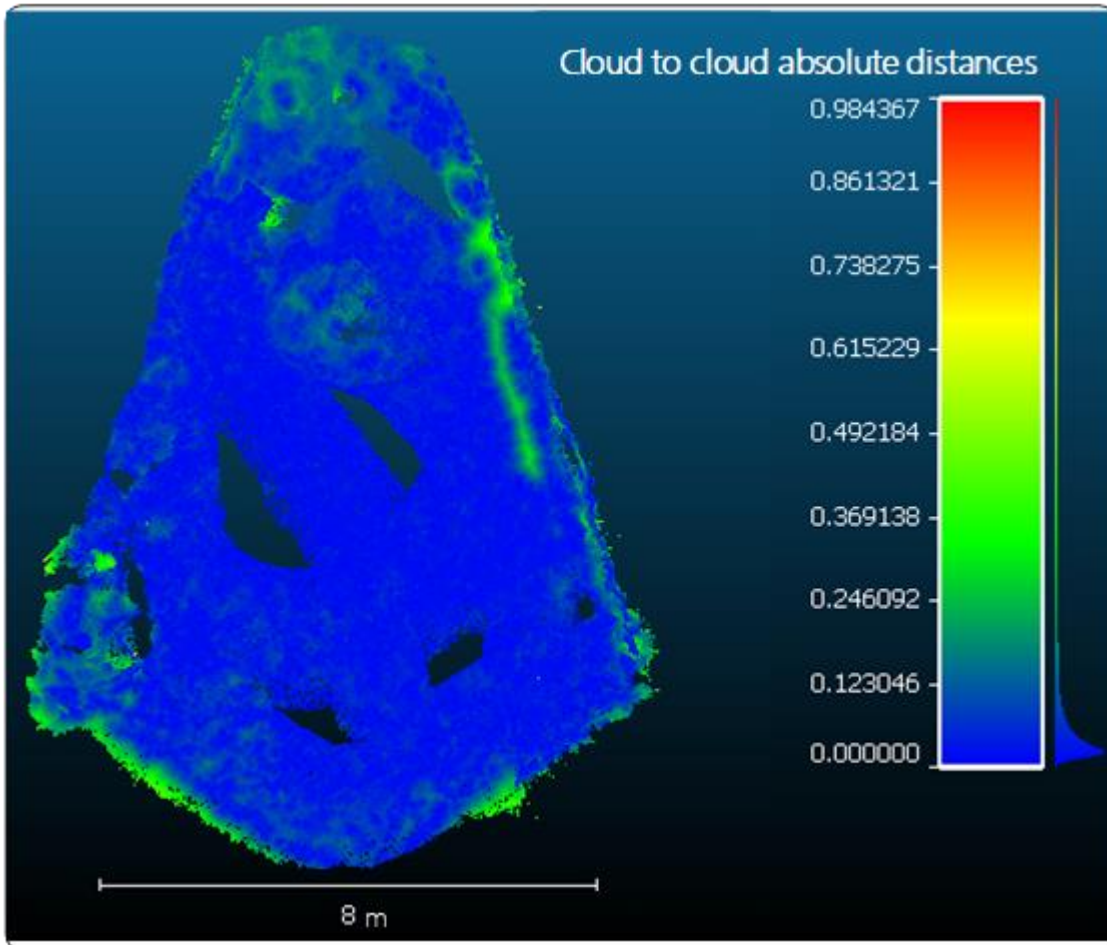


Figura 30. En esta figura se muestra el resultado de la comparación de las nubes de puntos obtenidas a partir de los datos UAV-USV. En la escala derecha se encuentra el código de color correspondiente a cada una de las distancias absolutas relativas encontradas entre las dos nubes de puntos.

Como se observa en la figura anterior, más del 70% de los puntos comparados tienen distancias absolutas  $<0.082$  m, lo que es un resultado muy preciso tomando en cuenta las plataformas, sensores y métodos usados para la toma de información. Esto además de las diferentes distancias de muestreo sobre el terreno y densidades en cada una de las nubes de puntos, y sin dejar de lado que los métodos fotogramétricos utilizados difieren en su implementación y resultados.

#### 5.4 Fusión de datos

Una vez que se validaron las nubes de puntos del UAV y USV estas ya se pudieron fusionar en una reconstrucción 3D. Los resultados de la fusión de ambas nubes son muy similares al del primer resultado del método

fotogramétrico por UAV. Lo que indica que el acoplamiento de ambas nubes de puntos no provocó un cambio significativo en la resolución y precisión del modelo final tomando en cuenta la baja cantidad de puntos de referencia coincidentes en ambas nubes de puntos y sin haber utilizado puntos de control de GPS. El modelo resultante se ilustra en la Figura 31.



Figura 31. Reconstrucción obtenida a partir de la fusión de las técnicas SFM y fotogrametría digital aérea de cada una de las plataformas UAV-USV.

Este trabajo muestra una metodología completa para el acoplamiento de datos espacialmente referenciados y no referenciados. Las principales capacidades de la metodología propuesta son: a) seguimiento, segmentación y rastreo de objetos en un entorno submarino, b) alineación de datos de plataformas comerciales y caseras. Un aspecto importante fue el desarrollo y fabricación de una plataforma acuática de bajo coste, que permitió obtener una metodología capaz de integrar datos de



fuentes sin georreferenciación espacial, y c) recrear escenarios virtuales 3D a partir de la fusión de datos aplicando técnicas de SFM- MVS.

Mediante las técnicas de segmentación fue posible fragmentar los elementos presentes dentro del entorno de prueba, en este caso los peces dentro de un acuario, e identificar los objetos a partir de fotogramas extraídos de una secuencia de video. Además, mediante el algoritmo de segmentación, es posible extraer fotogramas de una transmisión de vídeo y realizar el proceso de segmentación simultáneamente cuando hay una transmisión de vídeo en directo, lo que facilita el procesamiento in situ.

En este trabajo se destaca la relevancia de utilizar una plataforma acuática especialmente desarrollada para este estudio, que, junto con un sensor óptico sumergible demostró ser eficiente al implementarse en el campo, ya que es un elemento de muy bajo costo y simple de operar, ideal para ser utilizado en cuerpos de agua superficiales. Como complemento al vehículo de superficie se utilizó conjuntamente un vehículo aéreo no tripulado, que al ser operado en conjunto logró una cobertura completa del área de estudio, obteniendo información sobre y bajo la superficie del cuerpo de agua y el terreno circundante.

Se evaluó la pertinencia de aplicar las técnicas SFM y MVS para la reconstrucción de la información fotogramétrica submarina y aérea. También se propuso fusionar las reconstrucciones 3D de cada técnica en un único modelo. Con este resultado se pudo obtener un modelo morfológico que integra la información por encima y por debajo del espejo de agua con la calidad suficiente para ser una opción adecuada para la cartografía, el seguimiento y las mediciones tridimensionales de las masas de agua superficiales. Todo ello sin necesidad de manejar complejos dispositivos GPS. Y logrando precisiones del orden de 0,016 m utilizando nubes de puntos con diferentes densidades de puntos y obtenidas por diferentes técnicas.

## **5.5 Casos de aplicación**

En la siguiente sección se mencionan los casos de aplicación en los que se aplicó la técnica de fusión de datos propuesta en este trabajo de investigación. Esto con el fin de poner a prueba la técnica en un ambiente de aplicación real y no controlado, con estos casos de aplicación se pretende demostrar que:

- La técnica es eficiente y puede ser aplicada en escenarios reales
- Probar que es posible utilizarse en distintas condiciones y ambientes acuáticos
- La capacidad de la metodología para permitir la integración de otros sensores y plataformas

### 5.5.1 Manantial Los Peroles

Este primer estudio de aplicación comprende el uso de los sensores ópticos que habían estado disponibles durante la primera etapa de la investigación es decir la plataforma acuática y la cámara sumergible. Adicionalmente se contó con nuevas plataformas disponibles un nuevo y distinto UAV, el nuevo USV equipado con ecosonda mostrado en la sección 2.3. También se realizó un muestro manual con el perfilador de velocidad se sonido, y con muestreo automático para mejorar la calidad de la batimetría.

El lago/manantial conocido como Los Peroles, está ubicado a 40 minutos de Río Verde, en un tramo de la super carretera a la altura del km 5 aproximadamente, donde se encuentra una desviación al Ejido de San Francisco y al poblado del mismo nombre, alrededor de 17 kilómetros de la desviación. Al pasar dicho poblado se continua en dirección noroeste por alrededor de 12 kilómetros, hasta el poblado El Sabinito, comunidad más cercana al sitio, cabe mencionar que no existe una ruta única hasta la ubicación por lo que se pueden tomar varias rutas alternativas.

Como se observa en la Figura 32, la forma del manantial es muy particular, sobre la superficie posee una forma circular bien definida, mientras que en la parte inferior posee una forma semi esférica muy regular.



Figura 32. vista panorámica del manantial y zona exterior.

El agua contenida dentro de este cuerpo de agua es muy clara y en el fondo se observa de un tono que va del turquesa al azulado conforme aumenta la profundidad, el agua es de buena calidad por lo que se pueden encontrar distintas especies de peces en el interior del manantial y vegetación acuática abundante.

## Integración de sensores y plataformas

La integración de sensores y plataformas usadas en este sigue la misma premisa que la utilizada en la etapa de calibración e implementación de la metodología que se mencionó anteriormente en la sección 3.3. En el caso del sensor óptico, se utilizó una cámara sumergible de acción modelo Garmin VIRB XE, que está bien adaptada para este tipo de ambientes, esta cámara se monta en bajo el casco del bote y se coloca en una posición de 45° para captura la de información, el conjunto de sensores y plataformas utilizados se muestran en la Figura 33.



Figura 33. esquema de integración de plataformas y sensores para el caso de estudio.

En el caso del bote, se trata del modelo descrito en la figura 15 del capítulo 4, y consta de la plataforma no tripulada que lleva a su vez un ecosonda multi-haz, un sistema de posicionamiento satelital GNSS y un sistema de transmisión de radiofrecuencia para la corrección en tiempo real de la posición con la estación base mediante la técnica RTK.

Para la plataforma de aire se contó en este caso de un UAV comercial modelo Parrot Bebop 2. Este dispositivo es más compacto y ligero, más sencillo de transportar y desplegar en campo, sin embargo, posee algunas diferencias importantes que deberán que tomarse en cuenta, sobre todo en la etapa de calibración y corrección. Se trata específicamente de la estabilización, el tipo de sensor y la imagen capturada. Aunque el tamaño del sensor es el mismo (1/2.3”), este no cuenta con un estabilizador mecánico que le ayude a contrarrestar el movimiento inducido por el vuelo y el viento. Además, el tipo de lente es del tipo “ojo de pez”, se trata de un objetivo gran angular de 180° que produce una fuerte distorsión visual que se asemeja a una imagen reflejada en una esfera, y que resulta en la captura de una imagen hemisférica. Adicionalmente el formato de la imagen está compuesto por 14 megapíxeles, que es una cantidad mayor que del modelo usado anteriormente usado, no obstante, se debe tener en cuenta el sesgo geométrico e inducido por el lente.

El muestreo por otro lado se realizó de manera simultánea, un operador conducía el bote sobre el área del estanque siguiendo una trayectoria de líneas paralelas, mientras tanto el UAV relaza un vuelo autónomo en trayectoria circular alrededor del estanque. Siguiendo la metodología propuesta la información de almaceno en formato de video en el caso de la cámara sumergible y como imagen en UAV. En la Figura 34 se muestra el esquema general del proceso de muestreo.



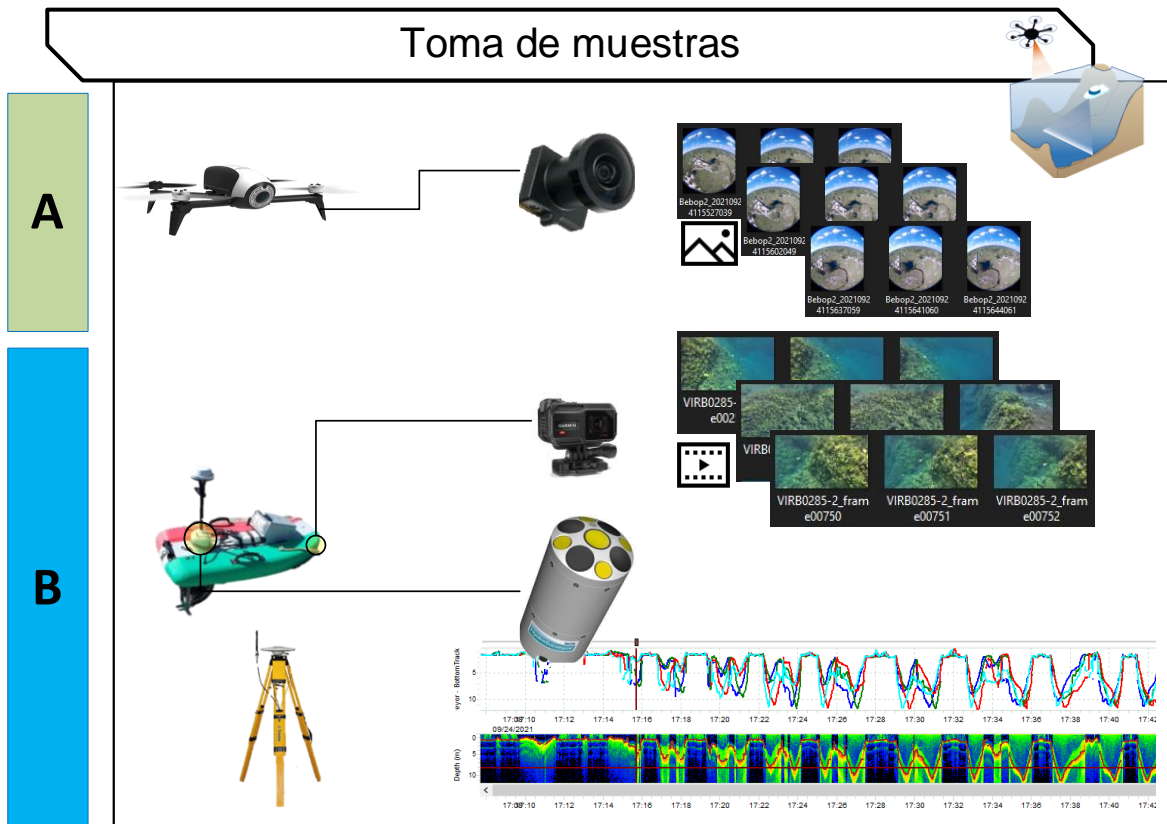


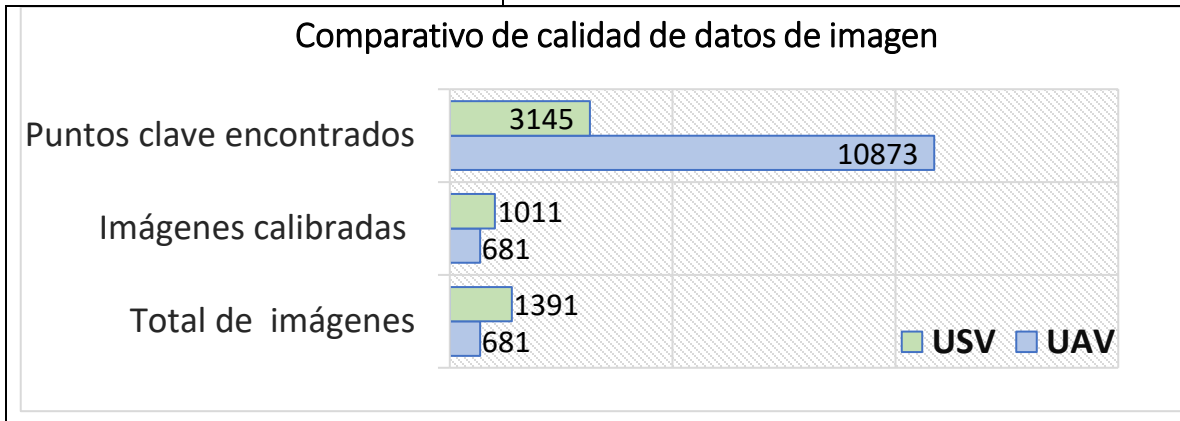
Figura 34. Esquema de toma de muestras por sensor/plataforma, en la primera sección A, se muestran las imágenes obtenidas con el UAV y que presentan el efecto ojo de pez, en la parte inferior B, se muestran los fotogramas de la cámara sumergible y la información acústica obtenida de la ecosonda instalada en el USV.

## Procesamiento

Para realizar el procesamiento se extrajeron las imágenes de los equipos y se prepararon para ser procesadas, en el caso de la cámara sumergible las imágenes se obtuvieron de los fotogramas dentro de la secuencia de video. El proceso se realizó en este caso usando el software Pix4D para las imágenes aéreas, en el caso de las imágenes subacuáticas se utilizaron distintas herramientas comerciales y de código abierto (Colmap, OpenSFM) debido a la mayor dificultad para extraer los puntos clave. Esto debido a la carencia de información geoespacial, distorsión del medio acuático, condiciones de luz y las anomalías inducidas por la plataforma y el recorrido de muestreo, en la Tabla 3 se muestra la información de calidad de los datos obtenidos por cada una de las cámaras utilizadas.

Tabla 3. Resumen del control de calidad cada plataforma según el tipo de datos recolectados.

<b>Control de calidad cámara UAV (flujo de trabajo automático)</b>	
imágenes	681
Conjunto de datos utilizable	681 imágenes calibradas
Optimización de la cámara	Automática, no se encontraron discordancias, entre los parámetros internos de la cámara de origen y los optimizados.
Correspondencias	Promedio de 10873 coincidencias por imagen calibrada
Georreferenciación	Sí
<b>Control de calidad cámara sumergible USV (flujo de trabajo automático)</b>	
imágenes	1391
Conjunto de datos utilizable	1011 imágenes calibradas
Optimización de la cámara	se encontraron discordancias del 12.37% entre los parámetros internos de la cámara de origen y los optimizados
Correspondencia	Promedio de 3145 coincidencias por imagen calibrada
Georreferenciación	No



Cabe mencionar que en el procesamiento realizado a priori donde se procesaron las imágenes obtenidas por cada una de las diferentes plataformas, las imágenes obtenidas por el medio del UAV mostraron una buena calidad y cuentan con referenciación. Además de que en el aire no se observan ningún tipo de interferencia entre la cámara y el objetivo. Por lo que las distorsiones inducidas por el tipo de lente que, en este caso es un ojo de pez pueden ser aisladas de manera más eficiente. Por el contrario, en el caso de la cámara sumergible no se posee ningún tipo de referenciación por lo que la corrección se realiza únicamente a partir de las imágenes obtenidas dadas las condiciones del estanque el ángulo de la cámara las características de la luz al momento de la toma, ligadas también al tipo de recorrido en el que se tomaron las imágenes. Por lo que existen bastantes más distorsiones

que al intentar procesarlas éstas provocan que los softwares utilizados tengan una mayor dificultad para extraer los puntos clave que pueden ser relacionados entre imágenes, provocando errores de correlación geométricos en el momento de la construcción del modelo tridimensional.

Como se observa en la gráfica la cantidad de imágenes utilizadas para el procesamiento de las diferentes plataformas aéreas y acuáticas, difieren bastante en cantidad de muestras.

En el caso del UAV se tomaron 681 imágenes, de ese total de imágenes fue posible obtener 10873 puntos clave reconocidos entre las distintas imágenes. Esto permitió que la reconstrucción fuera muy precisa y computacionalmente se pudo realizar en menor tiempo. Por el otro lado, el caso de la plataforma sumergible el total de imágenes utilizadas es de 1391 puntos una cantidad que duplica prácticamente a la otra plataforma, a pesar de que la cantidad de puntos clave encontrados fue solamente de 3145, siendo alrededor de la tercera parte de los encontrados en las imágenes del UAV. Ésta baja densidad en la cantidad de puntos concordantes entre las imágenes nos obligó a aplicar otras estrategias distintas a las del proceso automático que ofrecen los softwares comerciales. Entre esas estrategias están las de procesar las imágenes ya sea mediante correcciones en la nitidez, aumentar el contraste, eliminar posibles artefactos, encontrar de manera manual posibles objetos que sean fáciles de identificar entre imágenes y realizar un marcado de esos objetos previos al procesamiento automático.

### **Obtención del modelo virtual**

Una vez hechas las adecuaciones y correcciones necesarias se procedió a obtener las reconstrucciones tridimensionales. Se obtuvieron así 3 nubes de puntos geoméricamente bien constituidas que se pueden observar en la Figura 35, sin embargo, solo dos de ellas pudieron ser georreferenciadas.

Cabe mencionar que éstas referencias de posición difieren entre los dispositivos, siendo en el caso del ecosonda la ubicación más precisa, al contar una corrección en tiempo real en la posición.

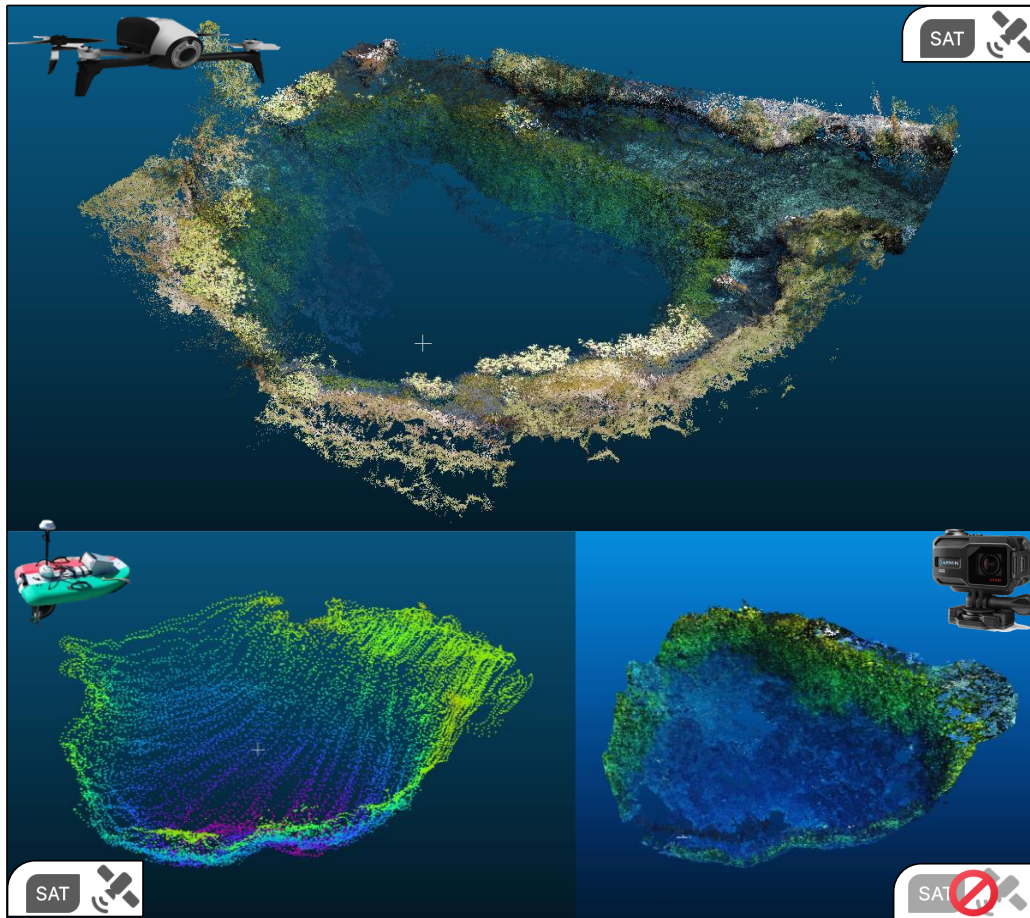


Figura 35. Vista en perspectiva de cada una de las nubes de puntos obtenidas según el sensor y plataforma utilizados.

En el caso del UAV la precisión es menor y las diferencias en la posición podrían ser importantes. Afortunadamente como en esta metodología la correlación entre cada una de las nubes de puntos, el ensamble se realiza de manera geométrica. Esto permite hacer un ensamble en las tres direcciones XYZ de manera simultánea, se procede entonces a hacer una alineación y ensamble punto a punto a partir de las reconstrucciones generadas.

Para la etapa de ensamble el primer paso es registrar cada una de las nubes con respecto de su posición en el espacio. Para el caso de estudio se tienen dos nubes de puntos generadas con georreferenciación, y una más que no tiene referencia. Por lo tanto, se procede a realizar el corregistro punto-a-punto comenzando por la nube generada a partir de la información obtenida bajo la superficie del agua. En este caso se ensamblarán primero la información obtenida por la cámara sumergible con información obtenida por la ecosonda, esto porque la información obtenida por esos sensores corresponde a la del fondo del estanque además que por las

características del sensor y el tipo de muestreo, son estos los que tienen información de mejor calidad del fondo del estanque.

Una vez hecho esto se procede a ensamblar este resultado preliminar a la nube de puntos obtenida por medio del UAV, para posteriormente verificar la precisión del modelo resultante y obteniendo un resultado positivo, logrando precisiones de 2.02 cm en más el 90 % de los puntos. Por lo tanto, se puede decir que la técnica de batimetría a partir de imágenes resulta precisa cuando es posible introducir el sensor óptico bajo la superficie del agua, es importante mencionar también que esta precisión podrá verse reducida en ambientes de baja luminosidad y turbidez.

En la Figura 36 la barra de color va del azul al rojo, indicando la calidad de en el acople de los datos, la parte azul muestra las áreas donde la diferencia entre las reconstrucciones es de 1cm o menor, en la sección exterior se observan tonos verdes donde existe menor traslape de puntos, debido a ser la zona de frontera donde los sensores sumergibles dejan de tener cobertura, y es el sensor aéreo el que predomina.

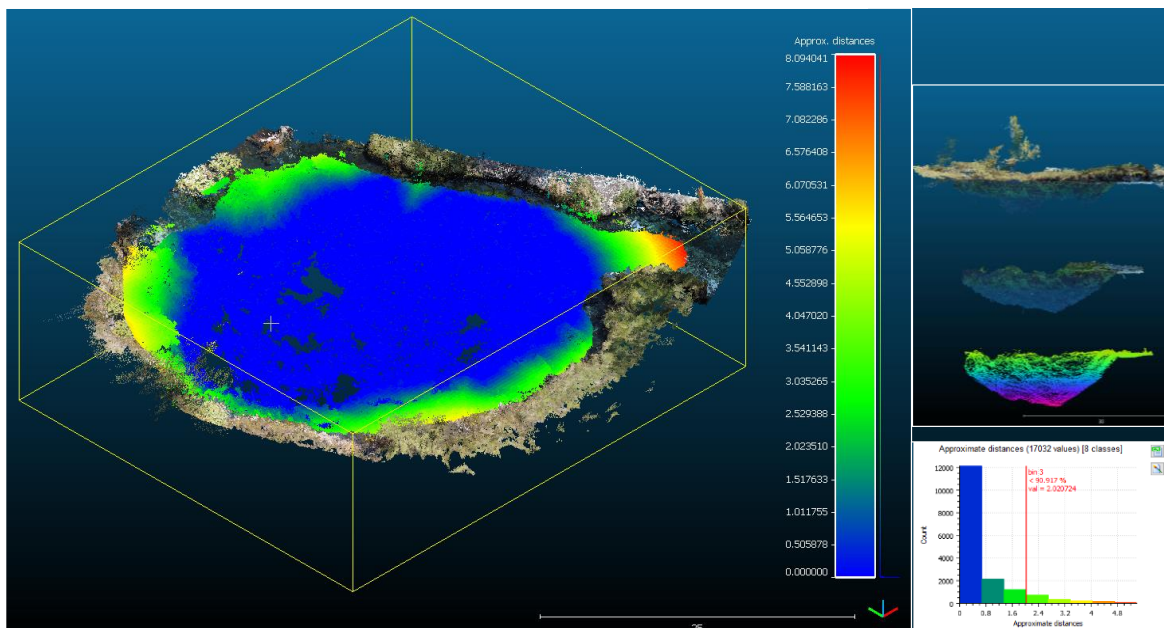


Figura 36. Ensamble de las tres nubes de puntos en un solo modelo de reconstrucción.

Como se ha mencionado anteriormente el acople de las nubes se realiza de manera geométrica entre cada una de las reconstrucciones en tres dimensiones, haciendo el acople punto a punto de manera geométrica se asegura la concordancia entre las orientaciones y las escalas, el posicionamiento se optimiza utilizando las

coordenadas de la nube más precisa, en este caso, la que se obtiene de la ecosonda y su GPS asociado de más precisión.

### **5.5.2 Lago de Camécuaro, Michoacán**

Para este caso de estudio se realizó una técnica similar a la aplicada en el caso de estudio los peroles. Sin embargo, debido a la extensión propia del lago, el tipo de actividades que se realizan dentro de él, las condiciones meteorológicas, así como la vegetación dentro y fuera del lago obligaron a plantear una estrategia de muestreo distinta.

Este lago se caracteriza por tener una vegetación abundante en las lindes del espejo de agua, se trata de árboles de gran tamaño con un follaje muy denso y cuyas ramas se extienden desde el cuerpo del árbol y pueden llegar a caer hasta la altura del tronco por lo que es común que se generen formaciones similares a cuevas o túneles de vegetación que no permiten una navegación libre. Esto sumado a que el lago al tratarse de una locación turística muy importante dentro de la zona es común que exista una gran cantidad de personas y embarcaciones navegando a lo largo del lago, esto obligó a realizar recorridos de manera más cuidadosa para evitar colisiones con las embarcaciones que circulaban.

Adicionalmente dentro del lago existen distintos tipos de vegetación flotante los cuales también implican un obstáculo para la navegación además de la presencia de islotes dentro del lago que impiden que las trayectorias se realizan de manera recta además de ser un obstáculo visual para la navegación con línea de vista (LOS).

En lo relacionado a la implementación de la plataforma aérea esta estrategia también se realizó de manera distinta, esto debido a dos principales razones, la primera era que en el momento de la toma no había las condiciones meteorológicas adecuadas para realizar los vuelos en la zona, además que no se contaba con un operador para controlar y supervisar los vuelos con el dispositivo aéreo al momento del muestreo. Por lo que la información aérea se obtuvo por otras fuentes, mediante un muestreo aéreo en un momento distinto, y con un equipo distinto a los utilizados hasta el momento en nuestra metodología.

Sin embargo, estos obstáculos no representaron un problema grave, ya que la robustez de la técnica permitió integrar distintos tipos de sensores y plataformas, por lo que el realizar esta modificación en los tiempos y maneras de llevar a cabo el muestreo no tuvo impacto negativo en el resultado final.



Las tomas se realizaron en dos etapas, la primera abarcó la parte más concurrida y amplia del lago, y la segunda cubrirá la parte más lejana del lago dónde las dimensiones de este se van reduciendo hasta adoptar la forma de un canal.

En la primera parte de estos recorridos de muestreo, las rutas fueron más rectas en el centro del lago por ser las partes más profundas y libres de obstáculos. Sin embargo, en las zonas cercanas a las lindes el tipo de navegación se realizó siguiendo el contorno propio de límite del lago, debido a la forma irregular de dicho límites, el realizar las maniobras fue una tarea complicada. Además con esto fue posible cubrir los espacios de difícil acceso y a brindar información importante en estas áreas, ya que en muchas de ellas fue posible detectar la presencia de formaciones en forma cónica similares a las observadas en el manantial Los Peroles.

### **Integración de sensores y plataformas**

Cómo se mencionó anteriormente no fue posible utilizar el dispositivo UAV aéreo al momento de la toma de los datos, dado que esta toma se realizó en otro momento por un operador independiente, no se tuvo intervención directa o indirecta en la captura de dichos datos. EL dispositivo utilizado es un UAV de ala fija Ebee X equipado con el paquete de cámaras multispectrales que se muestran en la Figura 37, aunque se lograron obtener imágenes en los espectros del infrarrojo cercano, para nuestro caso utilizaremos las imágenes en el espacio de color RGB.

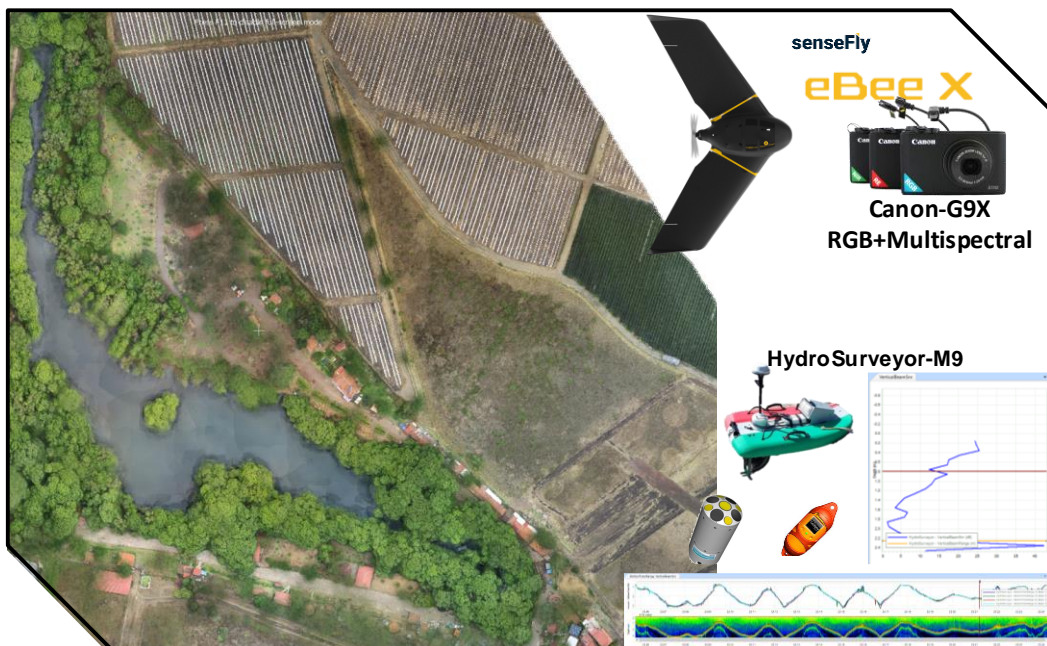


Figura 37. Detalle del área de estudio área de estudio con los dispositivos usados para el levantamiento.

Las características del vuelo de este dron difieren bastante al de los utilizados anteriormente en las pruebas y levantamientos, puesto que no se trata de un dispositivo de ala rotativa, sino de uno de ala fija. Estos dispositivos se caracterizan por tener forma similar a la de un aeroplano y son capaces de volar durante más tiempo a usualmente mayores distancias. No obstante, las alas fijas presentan ciertas características a tomar en cuenta antes de realizar levantamiento de información. Por ejemplo estas plataformas usualmente requieren de un área amplia para su despliegue y recuperación además el tipo de vuelo que realizan es más inestable que en el equipo multi rotor, ya que era la fija requiere de una mayor velocidad para mantenerse en vuelo, por lo tanto no puede realizar maniobras en espacios pequeños y tampoco puede permanecer estática en el aire. Asimismo, estas plataformas suelen ser más propensas a ser llevadas por el viento y comúnmente no poseen un estabilizador mecánico para los sensores, no obstante también presentan ventajas con respecto a sus primos de ala rotativa, como es la mayor cobertura de área, la capacidad de llevar más sensores, y mayor tiempo de vuelo. Por esta razón en el caso de esta área en particular, no se logró modelar de manera más detallada la zona por debajo de los árboles, siendo la mayor cobertura en las zonas descubiertas, y la zona limítrofe del espejo de agua.

El conjunto de datos tomado por este UAV fue posteriormente enviado de manera electrónica para su procesamiento, de los cuales se logró obtener una nube de puntos de buena calidad y referenciación debido a que el equipo utilizado posee GPS incorporado y un sensor de buena calidad.

Tabla 4. Control de calidad de los dispositivos UAV ala fija y USV.

<b>Control de calidad cámara UAV ala fija</b>	
imágenes	708
Conjunto de datos utilizable	708 imágenes calibradas
Optimización de la cámara	Automática, menos del 1% de discordancia entre los parámetros internos originales y optimizados.
Correspondencias	Promedio de 8806 coincidencias por imagen calibrada
Georreferenciación	Sí
<b>Control de calidad Ecosonda Multi-haz</b>	
Pulsos registrados	75649
Pulso por frecuencia	18912
Error de brújula	1.13°
Georreferenciación	Sí GNSS-RTK
Dilución en la precisión (PDOP)	1.35

Se puede mencionar también que en el caso de la plataforma no se contó con información del sensor sumergible debido a que las lluvias intensas en la zona



provocaron que una gran cantidad de sedimentos y partículas se transportaran dentro del agua, lo cual provocó turbidez, lo que no permitió que el sensor óptico fuera capaz de capturar información.

## Procesamiento

En el caso de la ecosonda como ya se ha mencionado en el estudio anterior la información no se obtiene a partir de imágenes, sino a través de los pulsos registrados por el sensor acústico, por lo que el proceso para obtener una nube de puntos de estos pulsos es ligeramente distinto al de la cámara sumergible, para traducir los pulsos a una imagen o mejor dicho una matriz de puntos es necesario realizar un procedimiento y correcciones en un software dedicado Hypack. En el cual se integran los datos del perfilador de velocidad del sonido para realizar las correcciones batimétricas con respecto a la mezcla de agua, y posteriormente se obtienen las distancias que corresponden a la información batimétrica. A partir de estas distancias se obtiene una matriz de puntos con coordenadas espaciales que pueden ser posteriormente integrada al de la nube de puntos obtenida por el UAV, ambos modelos se pueden observar en la Figura 38.

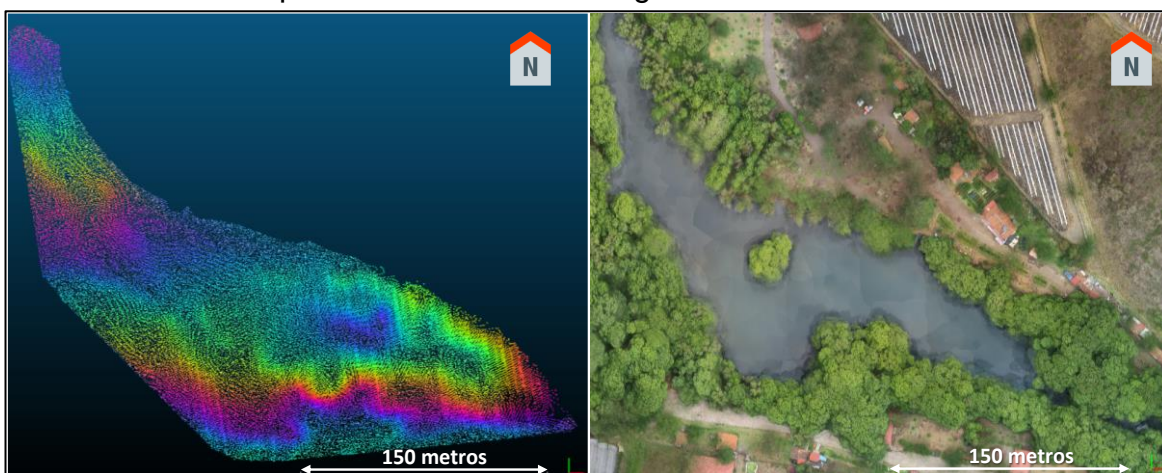


Figura 38. Visualización lado a lado de los modelos de reconstrucción, a la izquierda la nube de puntos del modelo batimétrico por USV y la derecha la nube de puntos obtenida por medio del UAV.

Se debe mencionar que la estrategia de fusión será distinta a la del caso anterior, esto se debe a que las zonas de concordancia entre ambas nubes son mucho menores. En el caso anterior de aplicación se tenían tres conjuntos de nubes de puntos que correspondían a la misma superficie, esto es la superficie por encima del espejo de agua registrada por el UAV y adicionalmente una porción de información por debajo del espejo de agua en la zona visible desde el aire, esto sumado a la información de la cámara subacuática que registró de manera uniforme

el fondo del manantial cubriendo la mayoría de los espacios y finalmente con la adición de la tercera nube de puntos correspondiente a los datos de la ecosonda multi-haz. Esto puede entenderse en términos más simples cómo el ensamble de nubes de puntos que abarcan más o menos las mismas áreas, y tienen en general la misma concordancia geométrica, ya que se trata de tres sensores registrando las mismas superficies.

No obstante, en el caso de este lago la correspondencia de datos que pueden ser directamente relacionados correspondió únicamente a la porción de área que fue alcanzada por ambos sensores y plataformas de manera conjunta, puesto que el UAV logró registrar información sobre la superficie del lago y la ecosonda USV a su vez logró registrar información del fondo del lago. Sin embargo al tratarse de áreas distintas las únicas zonas que son factibles de relacionar de manera directa son las franjas de frontera entre el espejo de agua y el terreno circundante ya que solo en estas áreas los conjuntos de datos de ambas plataformas y sensores llegan a tocarse, así que el corregistro necesario para realizar un ensamble adecuado consta de menor cantidad de información, a pesar de esto cómo ambas plataformas poseen la capacidad de obtener datos de gran calidad aunado a que ambas plataformas poseen un sistema de georreferenciación preciso fue posible realizar un ensamble de alta calidad. Tal como se observa en la Figura 39.

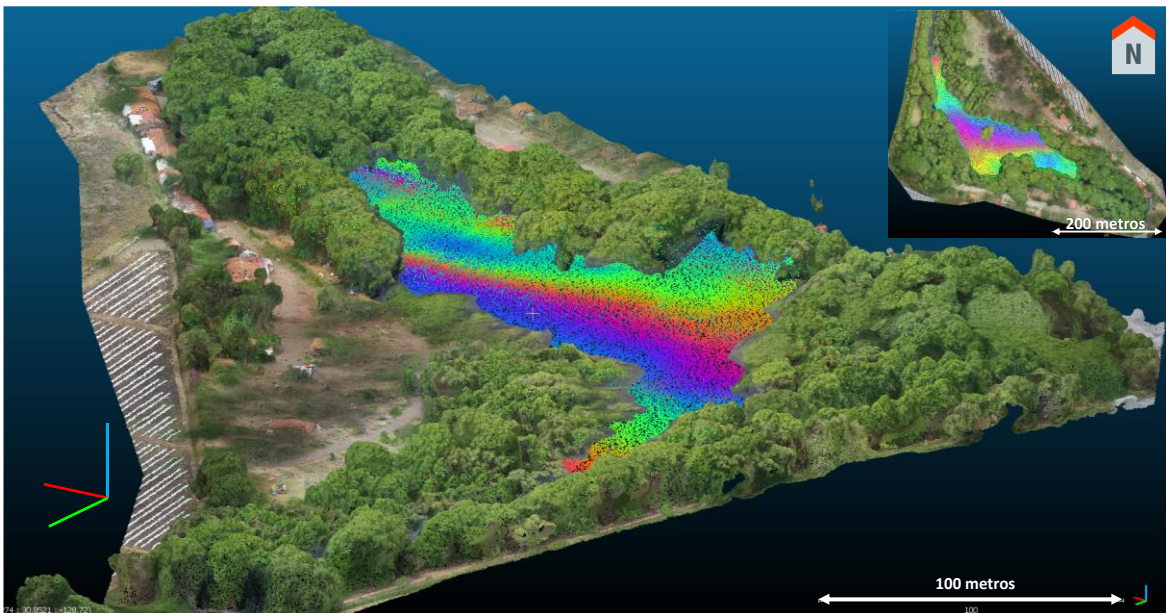


Figura 39. Detalle del resultado del acople de las dos reconstrucciones en 3D, la superficie cubierta por la batimetría parece disminuir, no obstante, la razón de esto se debe a que está se encuentra por debajo la línea de los árboles modelados.

Desde la vista en perspectiva es posible observar qué gran parte del área sondeada aparece debajo de la nube de puntos que corresponde a la topografía del parque, más específicamente es posible ver el patrón de colores arcoíris que corresponden a los sondeos del ecosonda aparece por debajo de la línea de los árboles. Esto es por qué la primera parte de estos sondeos se realizaron por debajo de las zonas arboladas. Esto implica que, visto perpendicularmente desde una perspectiva aérea, una buena parte de los sondeos quedarían cubiertos de la vista. Otra de las ventajas de esta técnica de fusión es que es posible integrar ambas nubes de puntos sin que haya solapamiento, es decir, sin que una obstruya a la otra, cómo si sucede con un sistema de capas, en dónde una capa sobrepone a la otra ocultando la información de la que se encuentra por debajo.

Debido a la escala del mapa y a la relativamente poca profundidad de las dimensiones del área, las profundidades son difíciles de distinguir de manera visual a partir de la nube de puntos a escala, para mostrar de mejor manera esto se coloreó la nube de puntos de sensor acústico en los patrones de color normalmente utilizados para LiDAR en el gradiente de colores usual, además, se ha añadido un mapa de batimetría en la sección de anexos (anexo 4 y 5) para consulta.



# Capítulo 6

## 6.1 Conclusiones

Este trabajo muestra una metodología integral para el acoplamiento de datos espacialmente referenciados y no georreferenciados. La fusión de datos multisensor con características heterogéneas es posible realizarla en un mismo marco de procesamiento a partir del acoplamiento de 3 etapas: la alineación de los datos, la correlación entre los objetos y la normalización de los datos.

La metodología propuesta permite integrar una gran diversidad de datos georreferenciados y no referenciados bajo diferentes formatos. Las pruebas realizadas han mostrado su eficacia con el tratamiento y manipulación de datos en 1D (perfiles), 2D (imágenes o tablas), 3D (Recreación virtual de escenarios) y datos puntuales.

Las capacidades actuales de la metodología propuesta permitieron realizar actividades de: a) seguimiento, segmentación y rastreo de objetos en un entorno submarino, b) alineación de datos procedentes de plataformas comerciales y caseras y c) recrear escenarios virtuales 3D a partir de la fusión de datos aplicando técnicas de SFM- MVS.

La estrategia desarrollada aprovecha las ventajas de las técnicas SFM y MVS para la generación de escenarios virtuales 3D minimizando las debilidades de cada técnica por separado.

Se implementó una plataforma acuática de bajo costo para el monitoreo de cuerpos de agua superficial. Algunos de los aplicativos desarrollados para esta etapa son: algoritmos de segmentación, identificación de objetos, seguimiento y monitoreo. Estos desarrollos pueden realizarse en formato de imágenes o bien en video (monitoreo tiempo casi real).

Mediante las técnicas de segmentación fue posible separar los distintos elementos dentro del entorno de prueba (en este caso los peces dentro de un acuario). Y que permitieron identificar los objetos a partir de fotogramas extraídos de una secuencia de vídeo. Además, mediante el algoritmo de muestreo, es posible extraer fotogramas de una transmisión de vídeo y realizar el proceso de segmentación simultáneamente cuando hay una transmisión de vídeo en directo, lo que facilita el procesamiento in situ.

En este trabajo se destaca la relevancia de utilizar una plataforma acuática especialmente desarrollada para este estudio, que, junto con un sensor óptico sumergible, demostró ser eficiente al implementarse en el campo, debido a que es un elemento de muy bajo costo y simple de operar, ideal para ser utilizado en

cuerpos de agua superficiales. Como complemento al vehículo de superficie se utilizó conjuntamente un vehículo aéreo no tripulado, que al ser operado en conjunto logró una cobertura completa del área de estudio, obteniendo información sobre y bajo la superficie del cuerpo de agua y el terreno circundante.

Se evaluó la pertinencia de aplicar las técnicas SFM y MVS para la reconstrucción de la información fotogramétrica submarina y aérea. También se propuso fusionar las reconstrucciones 3D de cada técnica en un único modelo. Con este resultado se ha podido obtener un modelo morfológico que integra la información por encima y por debajo del espejo de agua con la calidad suficiente para ser una opción adecuada para la cartografía, el seguimiento y las mediciones tridimensionales de las masas de agua superficiales. Todo ello sin necesidad de manejar complejos dispositivos GPS, logrando precisiones del orden de 0.016 m utilizando nubes de puntos con diferentes densidades y obtenidas por diferentes técnicas.

## **6.2 Nuevas perspectivas de investigación**

Las tareas de calibración y caracterización de sensores; así como, la corrección de los datos obtenidos de los mismos, representan un campo interesante y amplio debido principalmente a las limitaciones del hardware y las plataformas que los transportan.

Esta complejidad se traslada también a la etapa de fusión de los datos multi-fuente y multi-plataforma, por lo que es necesario continuar con el desarrollo de métodos de calibración y corrección especialmente diseñados para las necesidades particulares de esta investigación y otras relacionadas.

Por lo que ya se ha propuesto un método de filtraje adaptativo para eliminar ruido o errores en la información recabada, esto a partir de un algoritmo de eliminación a partir de dos sensores, un sensor primario y uno secundario de referencia.

Este ruido es producido por distintos componentes electrónicos, en nuestro caso los sensores producen variaciones no deseadas al momento de registrar la energía del sensor, produciendo errores en los píxeles y/o energía registrada.

Los filtros adaptativos ofrecen ventajas sobre los filtros comunes o fijos, debido a que un filtro fijo reduce la calidad de los datos al eliminar el ruido. Los filtros adaptativos por otro lado permiten el tratamiento de la información de entrada, mediante la aplicación de diferentes métodos de filtraje adaptativo, mediante la minimización del error cuadrático medio de los datos a corregir, a partir de los cuales se pueden obtener los parámetros de calidad, para obtener información filtrada y de mejor calidad.

## Anexo 1

### Casco y sistema de potencia

La tabla Torrent está diseñada para su uso en todos los rangos de movimiento, incluidos los de alta velocidad. La baja resistencia, la quilla en V profunda y el doble cóncavo de la tabla permite que el aire atrapado pase a ambos lados del instrumento minimizando la aireación. Y ha sido desplegada con éxito en el campo, en velocidades de hasta 4m/s, posee además un ancla de arrastre para ayudar a maniobrar en situaciones difíciles de baja velocidad y remolinos



### Especificaciones

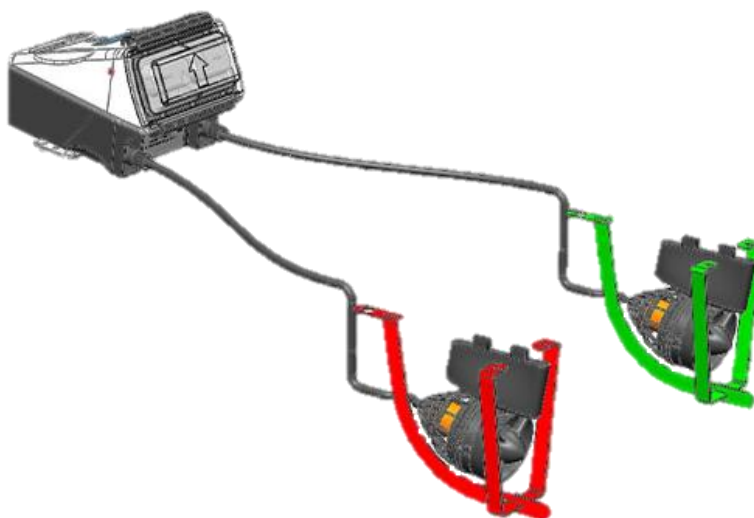
Longitud	1.05m
Anchura	0.65m
Balancín de la nariz	0.25m
Peso con M9	9,8kgs
Peso sin M9	4,7kgs

### Construcción

Fibra de vidrio sobre núcleo de espuma laminada de basalto	✓
Material de cubierta EVA en la parte superior	✓
Refuerzos laterales de EVA HD	✓
Fijaciones de acero inoxidable	✓

Sistema de aletas FCS	✓
Ancla de arrastre / escarpín para flujos lentos	✓
Velocidades del agua de hasta 5m/s	✗

### Sistema de motorización



<b>VELOCIDAD MÁXIMA</b>	1,5 m/s
<b>PESO</b>	1.8 Kg.
<b>RANGO DE TEMPERATURA</b>	-10°C a +40°C (14°F a 104°F)
<b>BATERÍAS</b>	Dji Phantom 3 LiPO x 2
<b>ALCANCE DEL TRANSMISOR</b>	500 m
<b>MODELO DE TRASMISOR</b>	Futaba T6K



## Anexo 2

### Información técnica del perfilador de velocidad de sonido *CastAway CTD*

Un CTD mide los perfiles de conductividad y temperatura con respecto a la profundidad. Las siglas CTD significan Conductividad, Temperatura y Profundidad. En el caso de un CTD, el perfilado se refiere a una serie de mediciones recogidas a medida que el propio instrumento desciende desde la superficie del agua hasta el fondo y mientras vuelve a subir. La conductividad, la temperatura y la presión se registran mientras se desciende y se asciende. Estos datos proporcionan una imagen completa de las propiedades del agua que cambian con respecto a la profundidad. Utilizando estas tres mediciones y aplicando las ecuaciones apropiadas, podemos calcular la salinidad, la velocidad del sonido, la densidad y la profundidad.

Parámetro	Rango	Resolución	Precisión	Método
Conductividad	0 to 100,000 $\mu\text{S/cm}$	1 $\mu\text{S/cm}$	0.25% $\pm 5 \mu\text{S/cm}$	medida
Densidad*	990 to 1035 $\text{kg/m}^3$	0.04 $\text{kg.m}^3$	$\pm 0.02 \text{ kg/m}^3$	EOS80**
Profundidad	0 to 100 m	0.01 m	$\pm 0.25\% \text{ FS}$	EOS80**
GPS	-	-	10m	-
Presión	0 to 100 dBar	0.01 dBar	0.25% of FS	medida
Salinidad	Up to 42	0.01	$\pm 0.1$	PSS-78†
Velocidad del sonido	1400 –1730 m/s	0.01 m/s	$\pm 0.15 \text{ m/s}$	Chen-Millero‡
Conductividad específica <sup>a</sup>	0 to 250,000 $\mu\text{S/cm}$	1 $\mu\text{S/cm}$	0.25% $\pm 5 \mu\text{S/cm}$	EOS80**
Temperatura	-5 to +45°C	0.01°C	$\pm 0.05^\circ\text{C}$	medida

-Basado en la resolución y precisión de la temperatura.

--Ecuación de estado internacional para el agua de mar (EOS-80).

†1978 Escala práctica de salinidad.

‡ Chen-Millero, 1977. Velocidad del sonido en el agua de mar a altas presiones.

<sup>a</sup> Basado en 100.000  $\mu\text{S/cm}$  a  $-5^\circ\text{C}$ .

### Especificaciones (comunicaciones)

Comunicaciones	Radio Bluetooth interna (Clase 2) Alcance de hasta 10 m
Dimensiones - Diámetro	7,11 cm   2,8 in
Dimensiones - Altura	20,32 cm   8,0 pulg.
Dimensiones - Peso	0,45 kg   1,0 lbs
Alimentación	Más de 40 horas de funcionamiento
Grabador	Grabador de 15 MB
Tasa de muestreo	5Hz

## Anexo 3

### Características técnicas de la ecosonda utilizada

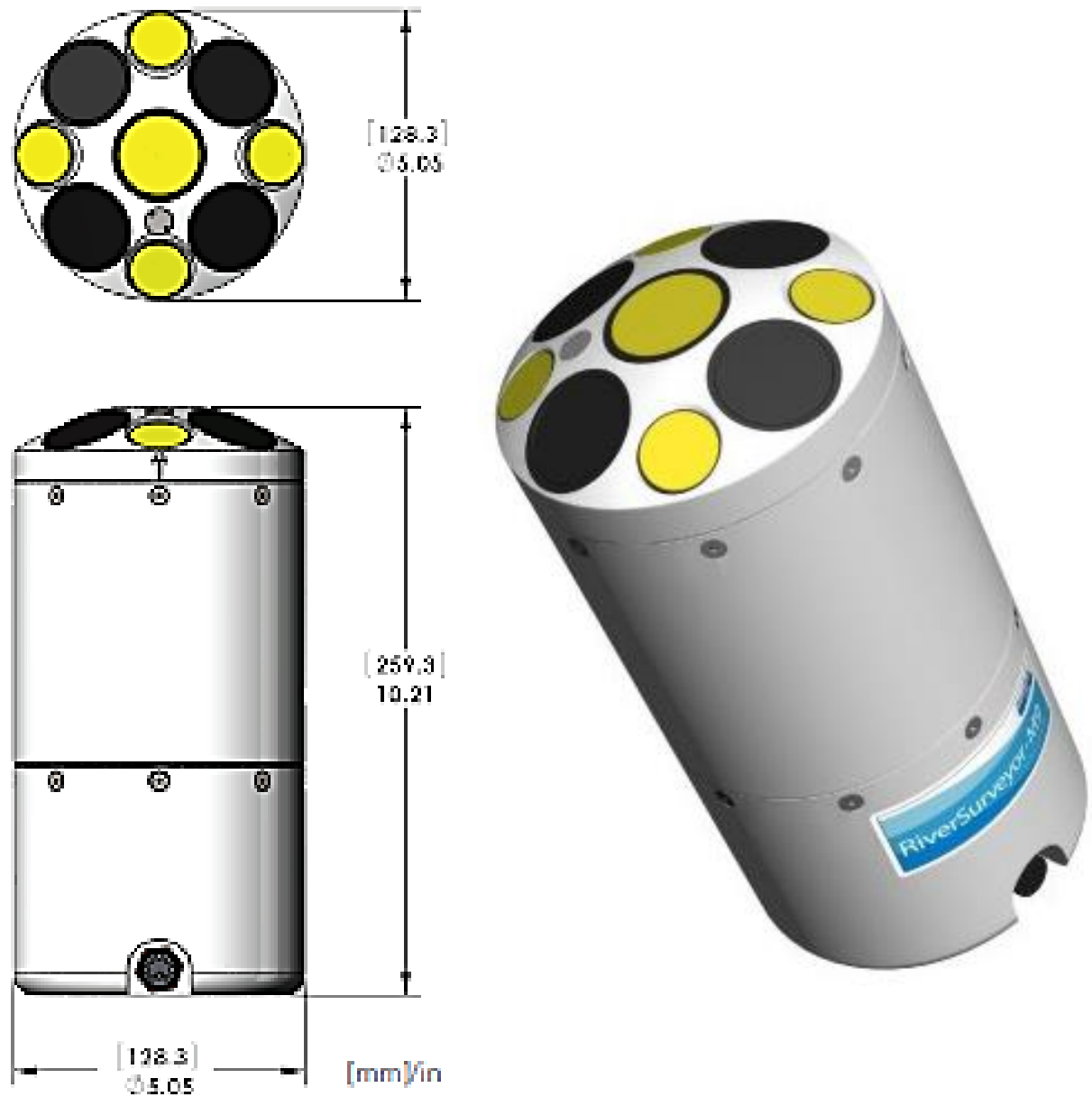
#### ESPECIFICACIONES DEL PULSO

	HAZ VERTICAL	HACES INCLINADOS
RANGO	0.2m to 80m	0.2m to 40m
ANGULO DEL PULSO	8°	3°

#### ESPECIFICACIONES GENERALES (EXTENDIDO)

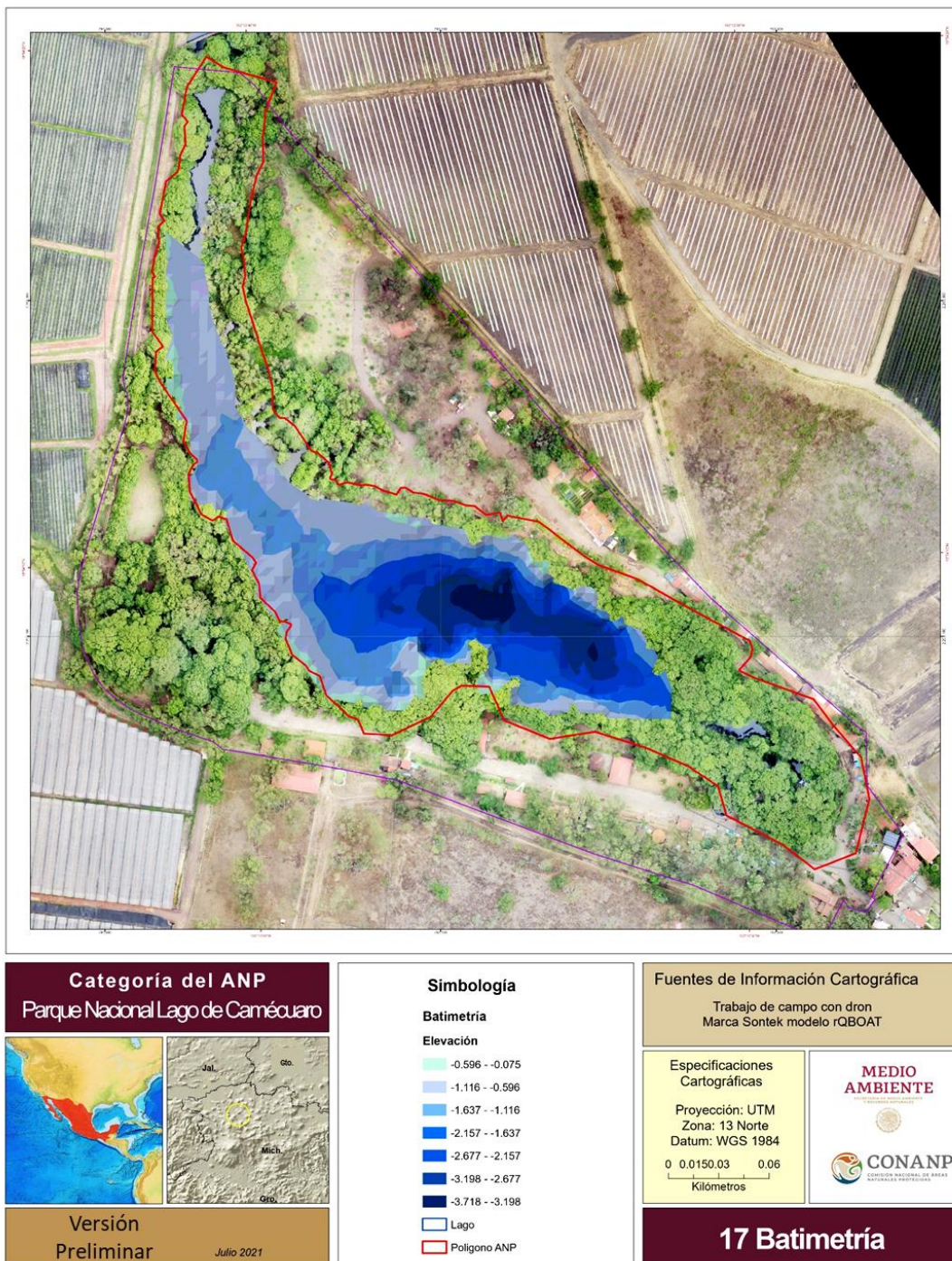
PROFUNDIDAD - PRECISIÓN	0.02m (Con velocidad corregida)
PROFUNDIDAD - RESOLUCIÓN	0.001m
ANCHURA DE LA FRANJA	50°
ALCANCE DEL PERFIL - DISTANCIA	0.06m to 40m
GAMA DE PERFILES - VELOCIDAD	± 10 m/s
VELOCIDAD - PRECISIÓN	Up to ± 0.25%, ± 0.2 cm/s
VELOCIDAD - RESOLUCIÓN	0.001 m/s
NÚMERO DE CELDAS	Up to 128
TAMAÑO DE LAS CELDAS	0.02m to 4m
SEGUIMIENTO ACÚSTICO DEL FONDO - ALCANCE	± 10 m/s
SEGUIMIENTO ACÚSTICO DEL FONDO - ALTITUD	0.2 – 40m
SONTEK RTK GPS - PRECISIÓN HORIZONTAL (REPETIBILIDAD)	<0.03m
SONTEK DGPS - PRECISIÓN HORIZONTAL DEL GPS SBAS	<1.0m
CONFIGURACIÓN DEL TRANSDUCTOR	8-beam Janus (4 x 1MHz; 4 x 3MHz) and 1 Vertical Beam (0.5 MHz)
SENSOR DE TEMPERATURA - RESOLUCIÓN	± 0.01°C
SENSOR DE TEMPERATURA - PRECISIÓN	± 0.1°C
BRÚJULA - TIPO	Solid State type, with Built-in Inclinometer
BRÚJULA - ALCANCE	Full 360°
BRÚJULA - PRECISIÓN DE RUMBO	± 2°
BRÚJULA - PRECISIÓN DE LA INCLINACIÓN	± 1°
POTENCIA	12-18 VDC
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-5°C to 45°C
TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO	-20°C to 70°C

**Esquema ilustrativo de las características físicas y dimensiones de la ecosonda utilizada**



## Anexo 4

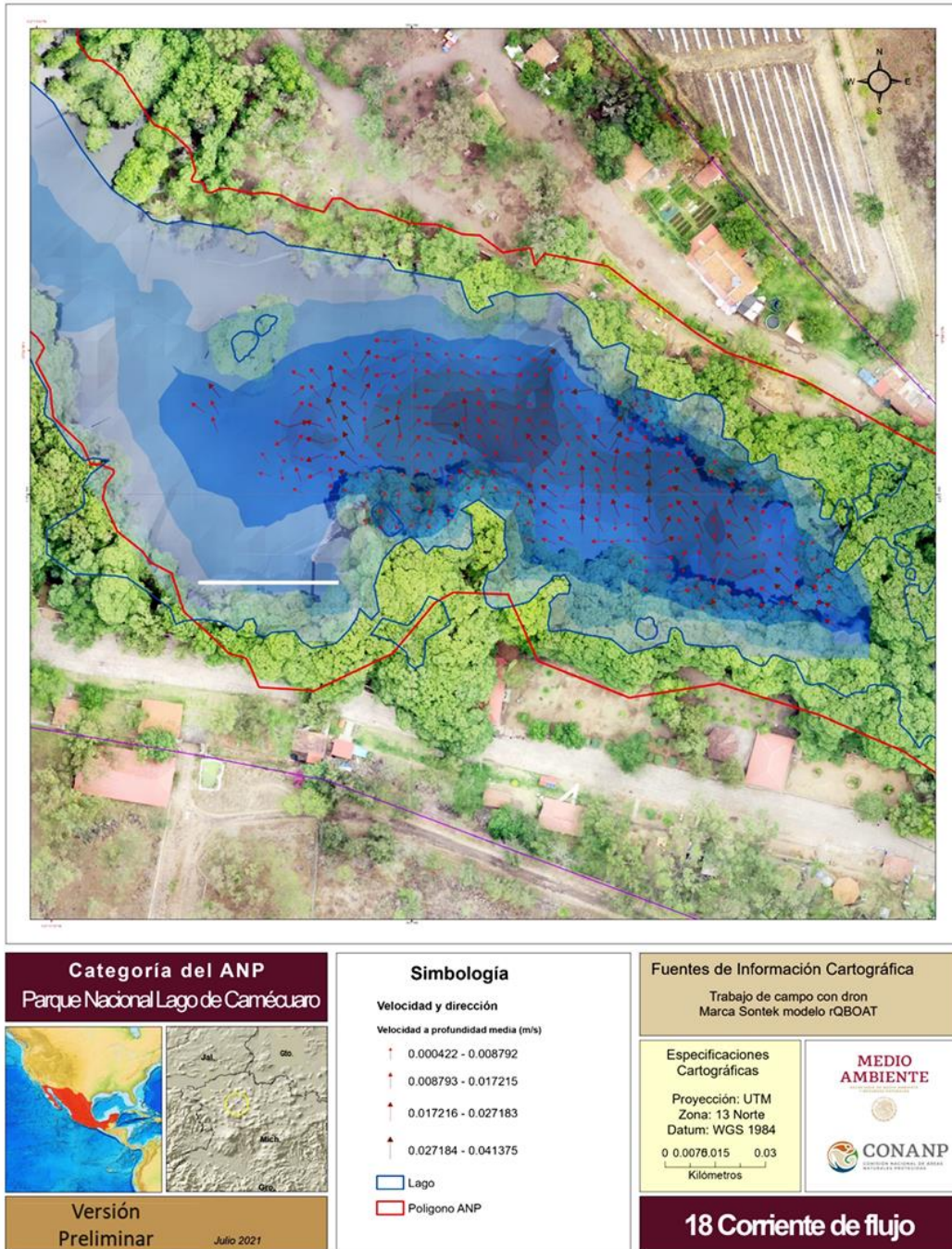
Mapas resultantes de los muestreos batimétricos en el área del lago de Camécuaro, Michoacán, a partir de los datos y obtenidos del trabajo de aplicación en la sección 7.2, en este anexo se muestra el mapa de batimetría del proyecto de conservación del CONANP, Michoacán, que se encuentra actualmente en desarrollo.





## Anexo 5

Mapa resultante de los muestreos batimétricos en el área del lago del lago de Camécuaro, este mapa de corrientes muestra la distribución y dirección de las corrientes dentro del lago. Este mapa se obtuvo a partir de los datos recabados en la sección 7.2, para el proyecto de conservación del CONANP, Michoacán, que se encuentra actualmente en desarrollo.



## New Framework Based on Fusion Information from Multiple Landslide Data Sources and 3D Visualization

Fermín Villalpando<sup>1</sup>, José Tuxpan<sup>1,2</sup>, José Alfredo Ramos-Leal<sup>1</sup>, Simón Carranco-Lozada<sup>3</sup>

1. *Division of Applied Geosciences, Scientific and Technological Research Institute of San Luis Potosí, San Luis Potosí 78216, Mexico*

2. *Cátedras-CONACyT, National Council for Science and Technology, CDMX 03940, Mexico*

3. *Centre for Scientific and Technological Studies, National Polytechnic Institute, Guanajuato 37358, Mexico*

Fermín Villalpando: <https://orcid.org/0000-0001-5220-0360>; José Tuxpan: <https://orcid.org/0000-0001-5167-0205>

**ABSTRACT:** Recent monitoring techniques employ multiple sources of information for the characterization of the phenomenon to be studied, being the coupling and adjustment of multi-source data one of the first challenges to consider and solve. The authors propose a new framework of the multi-source and multi-temporal data-oriented fusion for the characterization of landslide events. The main objective is to generate 3D virtual models (in the form of dense point clouds) and feed them back with the characteristic of soil and subsoil information. The scheme consists of three main steps. The first one is on-site data collection (geological characterization, geophysical measurements, GPS measurements, and UAV/drone mapping). The second step is generation of a high-resolution 3D virtual model (~1-inch spatial resolution) from the frames acquired through the UAV using the structure of motion (SIM) processing; the developed virtual model is optimized with GPS measurements to minimize geolocation error and eliminate distortions. The last step is assembling of the acquired data in the field and densified point cloud considering the different nature of the data, re-escalating procedure and the information stacking layer.

**KEY WORDS:** 3D model, natural risk, geophysical/geological techniques, unmanned aerial vehicle, fusion data.

### 0 INTRODUCTION

There are historical records on the incidence of landslides; however, the first historical antecedent that considers a systematic methodology applying basic remote sensing through photographs dates to the early 1900s by Ganz (1914).

Nowadays photogrammetric techniques allow generating a 3D reconstruction of the surface of the terrain at sub-metric scale, ideal for discriminating temporal changes on the observed surface and for having detailed information on its morphology (Reshetnyuk and Martensson, 2016; Stumpf et al., 2015). The model is obtained from correctly oriented two-dimensional images with adequate light, position and distance conditions (Alsadik, 2014). Short-distance photogrammetry is used for the measurement of ground deformations in landslides. This approach has significant advantages such as the coverage of large areas of land using ABDM (area-based deformation measurements) methods, a high degree of automation, rapid data acquisition and generally digital photogrammetry is cheaper than 3D scanning technology (Arosio et al., 2014). The

geodesic measurement techniques, for example, Global Positioning System (GPS), allow the acquisition of accurate information on the geometry and the current state of the slip position. The sampling method can be static or kinematic depending on the pre-survey valuation, obtaining a set of position data in the XYZ planes (Othaman et al., 2011). The GPS survey networks are particularly important when the magnitude of landslide is very small (Pirrotti et al., 2014; Abidin et al., 2004). As a rule a landslide shows a change in the morphology of the internal structure of the affected land mass, so it is feasible to use passive seismic methods as a technique to follow the propagation of rift within a mass of rock as a result of a loading stress or water freezing (Arosio et al., 2014).

Also, electromagnetic methods have been applied in different investigations of landslides (Teixidó and Quintana, 2013; Auge, 2008; Telford et al., 1990; Bogoslovsky and Ogilvy, 1977), mainly to determine the geometry of the phenomenon and to obtain the depths of the rock basement. The number of studies published from Ground Penetrating Radar data (GPR) has increased significantly in recent years (Scaioni, 2015; Arosio et al., 2014). This success, due to its range of operating frequencies (typically between 100 MHz and 1 GHz), allows information collection in metric/centimetric resolutions, which is useful in near-surface studies of disaster monitoring, profiling and detecting (Sato, 2015).

Currently, unmanned aerial vehicles (UAV) offer an efficient

\*Corresponding author: [jose.tuxpan@ipicyt.edu.mx](mailto:jose.tuxpan@ipicyt.edu.mx)

© China University of Geosciences (Wuhan) and Springer-Verlag GmbH Germany, Part of Springer Nature 2019

Manuscript received March 17, 2019.

Manuscript accepted June 25, 2019.

Villalpando, F., Tuxpan, J., Ramos-Leal, J. A., et al., 2019. New Framework Based on Fusion Information from Multiple Landslide Data Sources and 3D Visualization. *Journal of Earth Science*, xx(x): xxx–xxx. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1243-8>. <http://en.earth-science.net>

## Bibliografía

- Alcarria, R., Bordel, B., Manso, M. Á., & Iturrioz, T. (2018). Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems (ICITS 2018). In Á. Rocha & T. Guarda (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems (ICITS 2018)*. (Vol. 721, Issue Icits 2018). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7>
- Asano, T., & Yokoya, N. (1981). Image segmentation schema for low-level computer vision. *Pattern Recognition*, 14(1–6), 267–273. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(81\)90071-6](https://doi.org/10.1016/0031-3203(81)90071-6)
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., & Viguier, F. (2014). Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.014>
- Barrett, E. C., & Curtis, L. F. (1976). *Introduction to environmental remote sensing*. <https://doi.org/10.2307/2403163>
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M. R., Akciz, S., Thiele, S. T., & Bangash, H. A. (2014). Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69(PA), 163–178. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- Bioucas-Dias, J. M., Plaza, A., Camps-Valls, G., Scheunders, P., Nasrabadi, N., & Chanussot, J. (2013). Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(2), 6–36. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2244672>
- Brown, L. D. (1971). Admissible Estimators, Recurrent Diffusions, and Insoluble Boundary Value Problems. *The Annals of Mathematical Statistics*, 42(3), 855–903. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177693318>
- Cabreira, T. M., Brisolará, L. B., & Ferreira Paulo, R. (2019). Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. In *Drones* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/drones3010004>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing. *Introduction to Remote Sensing*, 1, 667. <https://doi.org/ISBN:978-1-60918-176-5>
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., Quincey, D. J., & Carver, S. J. (2013). Developments in budget remote sensing for the geosciences. *Geology Today*, 29(4), 138–143. <https://doi.org/10.1111/gto.12015>
- Caruthers, J. W. (1977). Chapter 5 Sonar Equations and Parameters. In *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 18, Issue C, pp. 63–67). [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70579-8](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70579-8)

- Ceramicola, S., Dupre, S., Somoza, L., & Woodside, J. (2018). *Submarine Geomorphology - Cold Seep Systems*. 13–25. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1>
- Chamola, V., Kotesh, P., Agarwal, A., Naren, Gupta, N., & Guizani, M. (2021). A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Networks*, 111(October), 102324. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
- Cohen, C. J. (2000). Early history of remote sensing. *Proceedings 29th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 3–9. <https://doi.org/10.1109/AIPRW.2000.953595>
- Creus, P. K., Sanislav, I. V., & Dirks, P. H. G. M. (2021). Application of SfM-MVS for mining geology : Capture set-up and automated processing using the Dugald River Zn-Pb-Ag mine as a case study. *Engineering Geology*, 293(June), 106314. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106314>
- Di Franco, C., & Buttazzo, G. (2016). Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 83(3–4), 445–462. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0348-x>
- Dougal, R. C., Greated, C. A., & Marson, A. E. (2006). Then and now: James Clerk Maxwell and colour. *Optics and Laser Technology*, 38(4–6), 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.06.036>
- Favorskaya, M. N., & Jain, L. C. (2017). *Handbook on Advances in Remote Sensing and Geographic Information Systems* (Vol. 122). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52308-8>
- Ferguson, B., Culver, R., & Ferguson, E. (2019). Eco-active sonar concept with examples. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146, 3014. <https://doi.org/10.1121/1.5137447>
- Fossum, E. R. (1997). CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 44(10), 1689–1698. <https://doi.org/10.1109/16.628824>
- Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>
- Fraser, C. S., & Brown, D. C. (1986). Industrial photogrammetry: New developments and recent applications. *The Photogrammetric Record*, 12(68), 197–217. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1986.tb00557.x>
- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(1), 103–116. <https://doi.org/10.1177/0309133309105657>
- Gili, P., Civera, M., Roy, R., & Surace, C. (2021). An Unmanned Lighter-Than-Air Platform for Large Scale Land Monitoring. *Remote Sensing*, 13(13), 2523. <https://doi.org/10.3390/rs13132523>
- Giordano, F., Mattei, G., Parente, C., Peluso, F., & Santamaria, R. (2015). Integrating sensors into a marine drone for bathymetric 3D surveys in shallow waters. *Sensors (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/s16010041>
- Glackin, D. L. (2014). Remote Sensing, Physics and Techniques. In *Encyclopedia of Remote Sensing* (pp. 691–701). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9\\_160](https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_160)



- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *104*, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Guilbert, É., Çöltekin, A., Castro, F. A., & Pettit, C. (2016). Theme section: Multi-dimensional modelling, analysis and visualization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *117*, 173–174. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.05.001>
- Guo, H., Dou, C., Zhang, X., Han, C., & Yue, X. (2016). Earth observation from the manned low Earth orbit platforms. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *115*, 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.11.004>
- Hackett, J. K., & Shah, M. (1990). Multi-sensor fusion: a perspective. *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1324–1330 vol.2. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126184>
- Hare, R. (1994). Calibrating Larsen-500 Lidar Bathymetry in Dolphin and Union Strait using Dense Acoustic Ground-Truth. *International Hydrographic Review*, *71*(1), 91–108.
- Jensen, J. R. (2007). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. In K. C. Clarke (Ed.), *Prentice Hall, series in geographic information science* (2nd ed., Vol. 1). Prentice Hall.
- Johnson, G. (2008). Radiometry and Photometry. *Color Imaging*, 319–362. <https://doi.org/10.1201/b10637-9>
- Khodadadzadeh, M., Li, J., Prasad, S., & Plaza, A. (2015). Fusion of Hyperspectral and LiDAR Remote Sensing Data Using Multiple Feature Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *8*(6), 2971–2983. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2432037>
- Kim, M. H., Hautière, N., & Loscos, C. (2013). Digital Cameras: Definitions and Principles. *3D Video: From Capture to Diffusion*, 23–41. <https://doi.org/10.1002/9781118761915.ch2>
- Krantz, D. H. (1975). Color measurement and color theory: I. Representation theorem for Grassmann structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *12*(3), 283–303. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(75\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0022-2496(75)90026-7)
- Lemmens, M. (2011). Terrestrial Laser Scanning. In *Geo-information: Technologies, Applications and the Environment* (pp. 101–121). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1667-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1667-4_6)
- Lu, M., Pebesma, E., Sanchez, A., & Verbesselt, J. (2016). Spatio-temporal change detection from multidimensional arrays: Detecting deforestation from MODIS time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *117*, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.007>
- Ludvigsen, M., & Sørensen, A. J. (2016). Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring. *Annual Reviews in Control*, *42*, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.013>

- Lulla, K., Nellis, M. D., & Rundquist, B. (2012). Celebrating 40 years of Landsat program's Earth observation accomplishments. *Geocarto International*, 27(6), 459. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.727604>
- Mali, V. K., & Kuiry, S. N. (2018). Assessing the accuracy of high-resolution topographic data generated using freely available packages based on SfM-MVS approach. *Measurement*, 124(November 2017), 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.043>
- Manley, J. E., Marsh, A., Cornforth, W., & Wiseman, C. (2000). Evolution of the autonomous surface craft AutoCat. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158)*, 1, 403–408 vol.1. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2000.881292>
- Marzano, F. S. (2014). *Encyclopedia of Remote Sensing* (E. G. Njoku (ed.)). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9>
- Meinen, B. U., & Robinson, D. T. (2020). Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*, 239(March 2019), 111666. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>
- Mumby, P. J. (2000). Mapping Mangroves. In *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. <https://doi.org/10.1109/6.367967>
- Nagai, M., Chen, T., Shibasaki, R., Kumagai, H., & Ahmed, A. (2009). UAV-Borne 3-D Mapping System by Multisensor Integration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 701–708. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010314>
- Nilssen, I., Ødegård, Ø., Sørensen, A. J., Johnsen, G., Moline, M. A., & Berge, Jø. (2015). Integrated environmental mapping and monitoring, a methodological approach to optimise knowledge gathering and sampling strategy. *Marine Pollution Bulletin*, 96(1–2), 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.045>
- Pik, B., Lau, L., Hasala, S., Zhou, Y., Ul, N., Yuen, C., Zhang, M., & Tan, U. (2019). A survey of data fusion in smart city applications. *Information Fusion*, 52(May), 357–374. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.05.004>
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W5), 591–599. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Schlyter, P. (2009). *Radiometry and photometry in astronomy* (p. 1). <http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html#10>
- Schmitt, M., & Zhu, X. X. (2016). Data Fusion and Remote Sensing: An ever-growing relationship. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4), 6–23. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2561021>
- Sester, M., Harrie, L., & Stein, A. (2011). Theme issue “Quality, scale and analysis aspects of urban city models.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2), 155–156. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.003>

- Tanakitkorn, K. (2019). A review of unmanned surface vehicle development. *Maritime Technology and Research*, 1(1), 2–8. <https://doi.org/10.33175/mtr.2019.140730>
- Tavani, S., Granado, P., Corradetti, A., Girundo, M., Iannace, A., Arbués, P., Muñoz, J. A., & Mazzoli, S. (2014). Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers & Geosciences*, 63, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>
- Taylor, F. S. (1942). The origin of the thermometer. *Annals of Science*, 5(2), 129–156. <https://doi.org/10.1080/00033794200201401>
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
- Trobbiani, G. A., Irigoyen, A., Venerus, L. A., Fiorda, P. M., & Parma, A. M. (2018). A low-cost towed video camera system for underwater surveys: comparative performance with standard methodology. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7070-z>
- Trubka, R., Glackin, S., Lade, O., & Pettit, C. (2016). A web-based 3D visualisation and assessment system for urban precinct scenario modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.003>
- Tummala, A. R., & Dutta, A. (2017). An overview of Cube-Satellite propulsion technologies and trends. *Aerospace*, 4(4), 1–30. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>
- Vila Burguete, C. A. (2005). *Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres* (Vol. 1). [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/vila\\_b\\_ca/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf)
- Villalpando, F., Tuxpan, J., Ramos-Leal, J. A., & Carranco-Lozada, S. (2020). New Framework Based on Fusion Information from Multiple Landslide Data Sources and 3D Visualization. *Journal of Earth Science*, 31(1), 159–168. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1243-8>
- Wald, L. (1999). Some terms of reference in data fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), 1190–1193. <https://doi.org/10.1109/36.763269>
- Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X., & Cattet, M. (2010). Remote Sensing of Ecology, Biodiversity and Conservation: A Review from the Perspective of Remote Sensing Specialists. *Sensors*, 10(11), 9647–9667. <https://doi.org/10.3390/s101109647>
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Weill, A. (2014). *Encyclopedia of Remote Sensing* (E. G. Njoku (ed.)). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>