



Manual para el **USO DE DRONES Y FOTOGRAMETRÍA DIGITAL**

PARA LA CARACTERIZACIÓN
Y MONITOREO DE
ECOSISTEMAS COSTEROS

• **Rodolfo Rioja Nieto** • **Erick Barrera Falcón**
• **Carlos Cruz Vázquez** • **Roberto Carlos Hernández Landa**
• **Ernesto Medrano Peña** • **Daniela Monserrat Rojas Cano**



ESCUELA
NACIONAL DE
ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD
MÉRIDA

Manual para el uso de drones y fotogrametría digital para la caracterización y monitoreo de ecosistemas costeros

Rodolfo Rioja Nieto, Erick Barrera Falcón, Carlos Cruz Vázquez,
Roberto Hernández Landa, Ernesto Medrano Peña y Daniela Rojas Cano.

PEI09523



Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Rioja Nieto, Rodolfo, 1975- , autor. | Barrera Falcón, Erick, autor. | Cruz-Vázquez, Carlos, autor. | Hernández-Landa, Roberto C., autor. | Medrano Peña, Ernesto, autor. | Rojas Cano, Daniela, autor.

Título: Manual para el uso de drones y fotogrametría digital para la caracterización y monitoreo de ecosistemas costeros / autores: Rodolfo Rioja Nieto, Erick Barrera Falcón, Carlos Cruz Vázquez, Roberto Hernández Landa, Ernesto Medrano Peña y Daniela Rojas Cano.

Descripción: Yucatán, México : Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida, 2025.

Identificadores: LIBRUNAM 2280669 (libro electrónico) | ISBN (libro electrónico).

Temas: Fotogrametría aérea -- Manuales. | Aviones sin piloto -- Aplicaciones científicas. | Ecología costera -- Monitoreo. | Arrecifes coralinos -- Monitoreo.

Clasificación: LCC TA593.35 (libro electrónico) | DDC 526.982--dc23

D. R.© 2025, Universidad Nacional Autónoma de México
Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida
Tablaje Catastral N°6998, Carretera Mérida Tetiz km 4.5,
Municipio de Ucú, Yucatán, México, C. P. 97357.

ArcMap y Agisoft Metashape son marcas registradas.
El uso de nombres descriptivos en general, nombres y marcas registradas, etc. en esta publicación no implica, aún en ausencia de una declaración específica, que éstos nombres están exentos de las leyes y regulaciones de protección y por lo tanto disponibles para su uso libre en general.

Primera edición: noviembre de 2025

Autores: Rodolfo Rioja Nieto, Erick Barrera Falcón, Carlos Cruz Vázquez,
Roberto Hernández Landa, Ernesto Medrano Peña y Daniela Rojas Cano.

ISBN: 978-607-587-950-5

Obra digital hecha en México.

Este manual se elaboró en el marco del proyecto PAPIME No. PE109523
“Elaboración de manual y videos tutoriales para el desarrollo de habilidades en la implementación de nuevas tecnologías espacialmente explícitas para la caracterización y monitoreo de ecosistemas costeros”.

CONTENIDO

Capítulo 1.		
Origen y aplicación de los drones	6	
1.1 El desarrollo de los drones	6	
1.2 Clasificación de drones	7	
1.3 Regulación para el uso de drones en México	9	
1.4 Fotogrametría	9	
1.5 Fotogrametría y drones	10	
1.6 Drones en aplicaciones ambientales	11	
Capítulo 2.		
Principios, elementos y técnicas de operación y pilotaje de drones de ala rotatoria	15	
2.1 Puntos de control	16	
2.2. Planeación de vuelo	17	
2.3. Ubicación de puntos de control	18	
2.4 Configuración inicial de parámetros	19	
2.5. Ejecución del vuelo	21	
Capítulo 3.		
Procesamiento de fotografías aéreas		23
3.1. Flujo de trabajo con imágenes multiespectrales		29
3.2. Trabajo con la nube de puntos		30
Capítulo 4.		
Uso de fotogrametría digital submarina en el estudio de arrecifes coralinos		34
4.1. Escalamiento de ortomosaicos submarinos		34
4.2. Construcción de bases de datos en un ambiente SIG		38
4.3. Edición y digitalización de vectores		41
Referencias		48
Anexo 1		52
Descripción del panel e íconos de Agisoft Metashape		52

CAPÍTULO 1

Origen y aplicación de los drones

Capítulo 1. Origen y aplicación de los drones

Los UAV (siglas en inglés de *Unmanned Aerial Vehicles*) son aeronaves sin piloto que fueron diseñadas principalmente para propósitos bélicos. Son también conocidos como drones, sistemas aéreos no tripulados (UAS) o aeronaves operadas remotamente (ROA); pero, para fines de este manual, los llamaremos indistintamente drones. En la última década, los drones se han incorporado cada vez más a actividades de la vida cotidiana y hoy se utilizan en diversas aplicaciones como la evaluación de riesgos, la toma de fotografía y video y la entrega de paquetería, entre otras. Su amplia utilización se relaciona de especial manera con su relativo bajo costo, facilidad de uso y adquisición. Además, su incorporación en las actividades productivas también se asocia al desarrollo y accesibilidad de la capacidad de procesamiento de las imágenes que nos permiten adquirir. Estas imágenes se procesan principalmente con algoritmos aplicados en fotogrametría como estructura a partir de movimiento (SfM, por sus siglas en inglés), que en la actualidad son fáciles de ejecutar en computadoras de media-alta gama con programas comerciales y de libre acceso, como Pix4D, Metashape y OpenDroneMap. En este manual se abordarán técnicas para la colecta de imágenes a través de drones y mediante buceo SCUBA con cámaras subacuáticas, la importancia de utilizar puntos de control, así como los flujos de trabajo para procesar las imágenes y generar productos espacialmente explícitos, útiles en la caracterización y el monitoreo de manglares y arrecifes coralinos. Estos flujos de trabajo se complementan con videos tutoriales que reforzarán el aprendizaje de los procesos descritos.

1.1 El desarrollo de los drones

Los drones pueden utilizarse para diversas aplicaciones, incluyendo las militares, científicas y comerciales. Existen de diferentes tamaños, formas y capacidades, y pueden ser operados de manera remota o de forma autónoma (Cuerpo-Rejado *et al.*, 2016).

Los drones han fascinado a la humanidad durante siglos y tienen raíces históricas profundas, remontándose a las antiguas civilizaciones de Grecia y China. En Grecia, alrededor del año 425 a. C., Arquitas de Tarento, conocido como el Leonardo da Vinci del mundo antiguo, creó la primera máquina voladora autónoma conocida: Peristera (Paloma), la cual se asemejaba a un pájaro mecánico, hecho de madera, que volaba y que logró un vuelo de aproximadamente 200 metros de altura. Este invento demostró los principios de la aerodinámica y de autonomía (Valavanis, Vachtsevanos y Antsaklis, 2014). En China, alrededor de la misma época, se documentó la idea de una aeronave de vuelo vertical, el trompo chino, que utilizaba plumas y un palo giratorio para crear elevación antes de su liberación en vuelo libre (Valavanis y Vachtsevanos, 2015).

Durante el Renacimiento, Leonardo da Vinci contribuyó de manera significativa al campo aeronáutico con el diseño del tornillo aéreo o giroscopio aéreo, una aeronave destinada a flotar, y un pájaro mecánico que emulaba el batido de alas mediante un mecanismo doble (Félix, 2015). Estos avances resaltan la persistente curiosidad y el ingenio humano en el desarrollo de

tecnologías para conquistar los cielos, sentando las bases para la aviación y los modernos vehículos no tripulados (Valavanis y Vachtsevanos, 2015); desde entonces, el desarrollo de los drones ha progresado. El primer vuelo no tripulado en globo aerostático se llevó a cabo en 1783, en Francia (Félix, 2015). La operación remota requería un control mediante ondas de radio y esto fue demostrado como viable por primera vez entre 1895 y 1898 por Nikola Tesla (Seifer, 1996).

En los tiempos modernos, los drones se desarrollaron poco después de la aviación tripulada, en la Primera Guerra Mundial (1916) (Cuerno-Rejado *et al.*, 2016). En particular, la industria privada ha jugado un papel crucial en el avance de esta tecnología. En 1934, Reginald Denny fundó los Reginald Denny Hobby Shops, donde comenzó a comercializar aviones controlados por radio. Estos modelos iniciales evolucionaron para convertirse en los precursores de los drones de propósito específico, que eventualmente dieron origen al primer dron de reconocimiento utilizado durante la Guerra Fría, el SD-1 (también conocido como MQM-57). Lo anterior marcó un hito en la historia de la aviación no tripulada (Dalamagkidis, 2015), donde el SD-1 podía llevar una cámara y regresar de manera segura a su base de operaciones (Zaloga y Palmer, 2008). Más tarde, el derribo de los aviones espía U-2 sobre la Unión Soviética y Cuba catalizó un mayor desarrollo de los drones (Zaloga y Palmer, 2008).

Los drones de pequeño tamaño han captado un interés significativo, especialmente porque muchos los consideran puntos de entrada ideales al mercado civil. A pesar de que sus tamaños reducidos limitan las capacidades de carga, tiempo de vuelo y prestaciones, en la actualidad existe un gran número en operación o en desarrollo activo (Dalamagkidis, 2015), y quizá los desarrollados por la empresa Da Jiang Innovations (DJI) sean los más populares.

1.2 Clasificación de drones

Para diferenciar los sistemas existentes, se han propuesto distintos esquemas de clasificación, basándose en su tamaño, plataforma, características operacionales y capacidades.

La clasificación basada en plataforma tiene tres categorías:

- a) Drones de ala fija. Vehículo aéreo no tripulado que cuenta con alas como medio de sustentación y, de manera general, una hélice como medio de propulsión. Estos drones necesitan un área amplia para su despegue y aterrizaje y normalmente se emplean para fotografía aérea, vigilancia y otras aplicaciones que requieren la captura de imágenes en grandes áreas. Su diseño les permite alcanzar mayores velocidades y rangos de distancia. Los drones de ala fija son más estables durante el vuelo (Ali Haydar Göktogan, 2015).
- b) Drones de ala rotatoria. Conocidos también como *rotorcraft*, son vehículos que utilizan rotores para generar sustentación y propulsión. Este tipo de drones pueden mantenerse estáticos en el aire y despegar y aterrizar verticalmente, lo cual los hace muy prácticos para su uso en espacios reducidos (p. ej., embarcaciones). Son altamente maniobrables y se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo búsqueda y rescate, monitoreo ambiental, transporte aéreo y vigilancia. Se utilizan de manera frecuente para vuelo a baja altitud y pueden ser controlados mediante diversos métodos, incluyendo control remoto, control autónomo e inteligencia artificial (Ali Haydar Göktogan, 2015). Quizá sean los más populares para realizar trabajos de fotogrametría digital aérea.

c) Dron híbrido. Combina características de drones de ala rotatoria y ala fija. Puede despegar y aterrizar verticalmente, y durante el vuelo utiliza alas para su sustentación, por lo cual proporciona la ventaja de despegue y aterrizaje en espacios reducidos y una alta autonomía (Blyenburgh, 2006; Valavanis y Vachtsevanos, 2015).

También, se pueden clasificar con base en su Peso Máximo al Despegue (MTOW, por sus siglas en inglés) y por el riesgo de causar daños debido a una falla e impacto en tierra (Dalamagkidis, Valavanis y Piegl, 2012). La cla-

sificación se muestra en la Tabla 1. El concepto de Riesgo de Impacto en Tierra (T_{GI} , por sus siglas en inglés) se refiere de forma específica al tiempo mínimo entre accidentes de impacto en tierra. El T_{GI} es un indicador estadístico que ayuda a las organizaciones a monitorear los intervalos en los que ocurren accidentes que involucran el impacto de un vehículo contra el suelo. Cuanto más largo es el T_{GI} , mejor, ya que indica una menor frecuencia de tales accidentes y se relaciona de manera potencial con la efectividad de las medidas y los protocolos de seguridad establecidos (Valavanis y Vachtsevanos, 2015).

Tabla 1. Clasificación basada en MTOW. T_{GI} es el tiempo mínimo de respuesta ante incidentes de impacto.

Categoría	Número	T_{GI}	Nombre	Notas
Micro	0	10^2	Menor a 1 kg	Los drones micro no están regulados por asociación alguna y no representan una amenaza significativa para la vida humana o la propiedad.
Mini	1	10^3	Hasta un 1 kg	Los drones mini corresponden aproximadamente a modelos de aviones R/C y no están regulados por las autoridades de aviación.
Pequeño	2	10^4	Hasta 13.5 kg	Los drones pequeños pueden clasificarse como ultraligeros por la Administración Federal de Aviación (FAR, por sus siglas en inglés). Están regulados por las autoridades de aviación.
Ligero	3	10^5	Hasta 242 kg	Pueden clasificarse como ultraligeros o aeronaves normales. Están regulados por las autoridades de aviación.
Normal	4	10^6	Hasta 4 332 kg	Están regulados por las autoridades de aviación.
Grande	5	10^7	Arriba de 4 332 kg	Los drones grandes corresponden mejor a la categoría de transporte y están regulados por las autoridades de aviación.

1.3 Regulación para el uso de drones en México

Desde 2013, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha regulado el uso de drones en el país, con la publicación de circulares obligatorias que dieron origen a la NOM-107-SCT3-2019. Esta norma establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano con los requisitos mínimos de seguridad. De acuerdo con esta norma, los propietarios civiles de drones deben cumplir con ciertas reglas dependiendo del tipo de dron, las cuales, de manera general, son las siguientes:

- 1) Registro en el sitio de internet de la Agencia Federal de Aviación Civil (los RPAS de menos de 250 gramos no requieren registro).
- 2) Altura máxima de operación de 122 metros respecto del nivel del suelo.
- 3) Operar a línea de vista máxima de 457 metros.
- 4) No operar en zonas prohibidas, restringidas o peligrosas (PIA).
- 5) Operar al menos a 9.2 km de distancia de los aeropuertos y aeródromos.
- 6) Operar al menos a 900 metros de distancia de helipuertos.
- 7) No operar sobre personas a menos que participen directamente en la operación de los drones o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome; también deben mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con las personas no

relacionadas con la operación de al menos 10 metros.

- 8) Si es de uso comercial, requiere póliza de responsabilidad civil.
- 9) Si es de más de 2 kg, requiere licencia de piloto RPAS.
- 10) Salvo que se cuente con una autorización para operaciones especiales, el piloto del dron no debe operar desde vehículos en movimiento, a menos que el vehículo se esté moviendo sobre el agua y esto sea indispensable para su adecuada operación.
- 11) No transportar mercancías peligrosas.
- 12) No podrán operar en México drones con registro extranjero u operados por extranjeros, a menos que exista un acuerdo bilateral entre la autoridad aeronáutica y la autoridad de Aviación Civil del país de registro.

Por otro lado, de acuerdo con esta norma, los drones se clasifican en micro (2 kg o menos), pequeño (de 2.1 kg hasta 25 kg) y grande (25 kg o más).

Para aplicaciones relacionadas con la conservación y el estudio de los ecosistemas costero-marinos, normalmente se utilizarán drones con un peso menor a 2 kg.

1.4 Fotogrametría

Si bien puede ser muy divertido utilizar drones para la obtención de imágenes, en realidad ha sido la adopción en la fotogrametría digital lo que les ha otorgado a estas plataformas su gran utilidad en el estudio de los ecosistemas costeros.

La fotogrametría es una técnica dentro de la geodesia y teledetección que permite medir y obtener datos cuantitativos de objetos de la superficie terrestre a través de fotografías históricas o fotografías actuales (Linder, 2009). Utilizando el principio de la visión estereoscópica, que imita la percepción espacial humana (Wulandari, 2022), es posible obtener coordenadas tridimensionales a partir de la intersección de puntos proyectados desde múltiples fotos tomadas desde distintos ángulos. El proceso involucra reconstruir los parámetros geométricos de las fotos para calcular las coordenadas de puntos representados en al menos dos imágenes. Esto facilita la reconstrucción de características geométricas del objeto y permite la creación de objetos digitales y el cálculo de dimensiones, áreas y volúmenes (Linder, 2009).

Dentro de sus aplicaciones se distingue entre fotogrametría terrestre y aérea, dependiendo del origen de las imágenes. Además, según el método de captura, se clasifica en fotografía analógica y fotogrametría digital (FD). En este caso, nos enfocaremos en la fotogrametría digital, que emplea fotografías obtenidas con cámaras digitales (Aber, Ries y Marzloff, 2010).

La FD aprovecha la visión estereoscópica para obtener volúmenes (modelos 3D) y coordenadas precisas de objetos en tres dimensiones. Para lograr esto, es esencial realizar al menos dos tomas de un mismo objeto desde distintas posiciones, lo que permite calcular su posición tridimensional. Este proceso se realiza generalmente en tres etapas fundamentales: la aplicación del algoritmo SfM, la creación de modelos 3D y la ortorectificación de imágenes (Aber, Ries y Marzloff, 2010).

Durante la primera etapa, se realiza la extracción de características en las imágenes, identificando puntos únicos en cada una, llamados

puntos clave (*keypoints*), mediante algoritmos de visión artificial como el de transformaciones de características invariantes de escala (SIFT, por sus siglas en inglés) o puntos clave binarios invariantes escalables robustos (BRISK, por sus siglas en inglés). Posteriormente, en la etapa de emparejamiento de puntos, estas características se buscan en imágenes adyacentes para construir una matriz fundamental. Esta matriz es luego refinada en el ajuste de bloque, donde se consideran los errores ópticos de la cámara y las posiciones de captura, incluyendo una etiqueta geográfica para escalar de manera adecuada el modelo.

En los pasos subsecuentes se construye una nube de puntos y se estima la profundidad usando algoritmos de visión estereoscópica, creando un modelo tridimensional donde cada imagen tiene una correspondencia de profundidad. La fusión de estas imágenes resulta en la mencionada nube de puntos. A partir de aquí se genera un modelo de elevación digital mediante la triangulación en la nube de puntos sobre una malla, donde cada píxel almacena una posición tridimensional (x, y, z), como describen Mijakovska y Popovski (2017).

Finalmente, se crea un ortomosaico donde cada imagen se corrige en términos de distorsión por altura usando el modelo de elevación digital y se unen todas las imágenes para formar una imagen integral que representa toda la escena en color verdadero, la cual generalmente está asociada a un sistema de coordenadas y , por lo tanto, es posible obtener mediciones precisas en X, Y y Z .

1.5 Fotogrametría y drones

Los primeros ensayos con plataformas de drones para fotogrametría y percepción remota (PaRS, por sus siglas en inglés) se remontan a 1979, cuando Przybilla y Wester-Ebbinghaus rea-

lizaron una prueba con un dron de ala fija controlado por radio, equipado con una cámara óptica (Przybilla y Wester-Ebbinghaus, 1979). Después, en 1980, llevaron a cabo otra prueba con helicópteros de radiocontrol que transportaban una cámara Rolleiflex de formato medio (Wester-Ebbinghaus, 1980). Estos experimentos pioneros sentaron las bases para futuros desarrollos en este campo.

La tecnología de Sistemas Aéreos No Tripulados para aplicaciones de Fotogrametría es madura en la actualidad y abarca varias disciplinas, como la aeronáutica y la visión por computadora. La mayoría de los proyectos comerciales PaRS utilizan microdrones con cámaras estándar, apoyados por *software* para la navegación de vuelo y el procesamiento de datos. Los drones se utilizan en aplicaciones a gran y pequeña escala, con precios que varían de manera considerable según la complejidad del sistema, desde cientos de dólares hasta varios millones (Eisenbeiss, 2009). Algunos sistemas pueden costar tanto o más que un sistema aéreo tripulado convencional (Grubestic, Nelson y Wei, 2024).

La integración de los drones en fotogrametría ha sido impulsada en gran medida por el descenso de su costo, lo que ha estimulado el crecimiento del mercado comercial con fabricantes líderes como DJI y Parrot, ofreciendo, por unos pocos cientos de dólares, drones de nivel de entrada bien equipados (Grubestic, Nelson y Wei, 2024). Estos drones tienen tiempos de vuelo de aproximadamente 40 minutos y rangos de comunicación y control de hasta una milla o más. El bajo costo de estos equipos de entrada ha resultado en un aumento sostenido del número de drones y operadores registrados. Las cifras oficiales de la Administración Federal de Aviación en Estados Unidos reflejaron 650 000 registros al final de 2022 y más de 850 000 al término de 2023 (Grubestic, Nelson y Wei, 2024).

1.6 Drones en aplicaciones ambientales

Los drones han transformado radicalmente el campo de la percepción remota, también han proporcionado herramientas eficientes y efectivas para la investigación y gestión en una variedad de escenarios y disciplinas (Quamar *et al.*, 2023). Su aplicación en la agricultura de precisión permite monitorear y optimizar el uso de recursos como agua y fertilizantes, mientras que en el desarrollo de ciudades inteligentes resilientes contribuyen a mejorar la planificación urbana y la gestión de servicios públicos. En la cadena de suministro, los drones facilitan la supervisión de las operaciones logísticas, aumentando la eficiencia y la respuesta ante incidentes (Quamar *et al.*, 2023).

Un aspecto importante para el uso de drones en la agricultura y, en general, para determinar el estado de la vegetación, ha sido la incorporación de cámaras multispectrales. Este tipo de cámaras, principalmente construidas por AgEagle (antes Micasense) y Parrot, obtienen imágenes en distintos intervalos del espectro electromagnético, como azul, rojo, verde, infrarrojo cercano y borde del infrarrojo, que se utilizan para calcular distintos índices relacionados con la condición de la vegetación (p. ej., contenido de humedad, concentración de clorofila).

En sectores críticos como la industria petrolera y gasífera, la forestal y la militar, los drones permiten realizar inspecciones y revisiones constantes que garantizan la seguridad y la eficiencia operativa, lo que minimiza los riesgos para el personal. Su capacidad para acceder a zonas remotas o de difícil ingreso es particularmente valiosa para estudios ambientales, como la vigilancia de zonas costeras, donde proporcionan imágenes detalladas que son esenciales para evaluar la salud ecológica ante los efectos del calentamiento global (Parsons *et al.*, 2018).



Figura 1. Uso de drones y cámaras espectrales en el estudio de la cobertura vegetal (imagen generada mediante IA).

La integración de cámaras de alta resolución y otro tipo de sensores especializados en los drones ha mejorado de manera significativa la calidad y precisión de la fotogrametría, lo que se traduce en mapas y modelos tridimensionales de alta fidelidad. Esta capacidad es indispensable para el monitoreo continuo de cambios ecosistémicos, calidad del agua y erosión costera, y ofrece datos espacialmente explícitos que apoyan la toma de decisiones en la gestión costera y su conservación (Ventura *et al.*, 2018; Brunier *et al.*, 2022).

Una de las grandes ventajas de las imágenes obtenidas por drones, en comparación con las satelitales, radica en que es fácil y de bajo costo obtener imágenes de una misma zona con alta frecuencia temporal. Esto permite evaluar cambios en los ecosistemas a una alta resolución temporal y espacial. Además, las imágenes obtenidas por drones en general no necesitan

ser corregidas atmosféricamente, ni son afectadas por la nubosidad. Su desventaja principal es que, en comparación con las satelitales, solo se pueden estudiar áreas pequeñas, donde el tamaño de los archivos de las imágenes obtenidas (sobre todo de cámaras multiespectrales) es mucho más grande, lo que hace necesaria la utilización de equipos de cómputo con altas capacidades.

Algunos pioneros en evaluar la utilidad de los drones para el estudio de ecosistemas costeros fueron Delacourt *et al.* (2009), quienes desarrollaron un helicóptero fotogramétrico no tripulado (DRELIO). Este sistema, al usar imágenes estereoscópicas y puntos de referencia, facilitó la creación de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y una imagen ortorectificada, con lo que demostró ser más flexible y económico en comparación con otros sistemas. En el mismo año, Pereira *et al.* (2009) exploraron el uso de vehí-

culos aéreos no tripulados de ala fija en operaciones de videovigilancia y control costero, y mostraron su aplicabilidad en la detección de riesgos costeros y estudios de erosión, entre otros. En 2011, Voutsdoukas *et al.* (2011) utilizaron drones de tamaño pequeño para adquirir imágenes de alta calidad de bancos de arena y zonas de oleaje. Posteriormente, Chikhradze *et al.* (2015) aplicaron fotogrametría digital de corto alcance con un dron Swinglet CAM en las playas de Aguçadoura y Ramalha, Portugal, para generar ortofotos y modelos digitales de elevación 3D, que ayudaron en la gestión del estado geoecológico de la zona. En el estudio de arrecifes coralinos, Casella *et al.* (2016) fueron pioneros al utilizar un dron comercial DJI para generar ortomosaicos y modelos digitales de elevación, estudiando la complejidad estructural de zonas someras.

En el ámbito de la fotogrametría subacuática, Bythell, Pan y Lee (2001) reconocen la importancia de recopilar imágenes superpuestas desde múltiples ángulos para capturar por completo las estructuras de las colonias de coral. Burns *et al.* (2015) mostraron la importancia de la fotogrametría subacuática para monitorear las perturbaciones y sus impactos en los ecosistemas marinos. Posteriormente, Lange y Perry (2020) mostraron cómo los modelos 3D de alta resolución son accesibles utilizando cámaras más económicas y compactas junto con ordenadores portátiles estándar. En México, Hernán-

dez-Landa, Barrera-Falcon y Rioja-Nieto (2020) implementaron la fotogrametría digital subacuática y algoritmos SfM para evaluar la cobertura de coral vivo y la distribución de tamaños de las colonias de corales del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel, usando cámaras Canon G-12 y el *software* Pix4Dmapper para construir ortomosaicos. Además, reconocieron la eficacia de esta tecnología como un método rápido para levantamientos extensivos sin requerir personal especializado en identificación de especies, adicional a ello, proporciona no solo datos sobre cobertura coralina, sino también información demográfica precisa sobre el tamaño de las colonias y las relaciones espaciales dentro de la comunidad bentónica. Barrera-Falcon *et al.* (2021) compararon métricas ecológicas obtenidas mediante fotogrametría digital subacuática en los mismos arrecifes y encontraron estimaciones de mayor abundancia de colonias y riqueza de especies, aunque con menor cobertura de coral en comparación con los métodos tradicionales de muestreo. Aston *et al.* (2022) continuaron con el desarrollo de estas técnicas, empleando el *software* Agisoft Metashape para procesar imágenes de colonias de coral en la Gran Barrera de Coral y en el Mar del Coral, con lo que evidenciaron el avance y la creciente accesibilidad de esta tecnología en la investigación ecológica marina. La fotogrametría subacuática digital (UWP) está en constante desarrollo y es cada vez más utilizada en el estudio de arrecifes coralinos.

CAPÍTULO 2

Principios, elementos y técnicas
de operación y pilotaje
de drones de ala rotatoria

Capítulo 2. Principios, elementos y técnicas de operación y pilotaje de drones de ala rotatoria

Como se mencionó, la fotogrametría imita la visión estereoscópica que naturalmente ocurre en nuestros cerebros para detectar el tamaño de los objetos, la distancia que hay entre ellos y su posición espacial.

El tipo de dron más popular para trabajos de fotogrametría aérea es el de ala rotatoria o multirrotor. Estos drones pueden desplazarse en cualquier dirección (norte, sur, este, oeste), abajo y arriba, y girar en su eje de izquierda a derecha y viceversa, lo cual los hace sumamente versátiles para diversas tareas. En ambientes complejos (p. ej., bosques de manglar) facilitan la captura de datos sin dañar el entorno debido a su gran maniobrabilidad.

Su estabilidad en vuelo permite tener mayor control sobre el aterrizaje y despegue, lo que incrementa la seguridad del usuario y las personas alrededor. En configuraciones de mayor tamaño poseen la capacidad de transportar

cargas útiles más pesadas, lo cual permite su adaptación en diversas tareas especializadas.

Los drones más conocidos son los que poseen cuatro hélices o cuadricópteros, aunque existen variedades con mayor número de hélices, como los hexacópteros, con seis, y los octocópteros de ocho rotores. Por su tamaño, estos últimos son más utilizados en cuestiones de agricultura de precisión, donde son capaces de transportar sensores y equipos de mayor peso (Fig. 2).

La integración de drones con tecnologías avanzadas, como sensores ópticos, cámaras multiespectrales y sensores con rayos láser para medir distancias (LiDAR, por sus siglas en inglés), ha ampliado de manera significativa el rango de aplicaciones. La variedad y cantidad de sensores que pueden ser instalados en un dron está en constante aumento, lo que permite que estos dispositivos se adapten a necesidades específicas de diversas disciplinas.



Figura 2. Ejemplos de drones de ala rotatoria.

La recopilación de datos dependerá de los objetivos establecidos al principio del proyecto, ya que determinarán qué tipo de sensor será el más adecuado a emplear. Una fotografía en RGB (como las que se toman con el teléfono celular) puede ayudarnos a conocer el área de estudio aprovechando la luz solar para poder observar lo que se encuentre en el entorno. Sin embargo, en condiciones de baja luminosidad, una cámara termal podría resultarnos más útil, pues nos permitirá apreciar información que no dependa de la luz natural. Por otro lado, si lo que se quiere es tener la información completa en intervalos del espectro electromagnético (p. ej., para hacer una segmentación basada en características espectrales), se puede utilizar una cámara multiespectral. Además de considerar el uso del sensor a partir de los objetivos de trabajo, también es necesario evaluar su costo y sus características.

En este manual utilizaremos imágenes obtenidas con cámaras RGB, cuyo costo es menor que el de las cámaras multiespectrales o termales.

2.1 Puntos de control

Antes de considerar la realización de un vuelo para fines fotogramétricos, debemos garantizar que la relación entre las imágenes obtenidas y las coordenadas de los objetos en la superficie sean las correctas. Si bien podemos guiarnos con el sistema de navegación incluido en los equipos de vuelo, su exactitud puede no ser suficiente para el objetivo de estudio.

Para corregir estas imprecisiones, recurrimos a la medición de puntos de control en campo. Los puntos de control los definiremos como ubicaciones específicas sobre el terreno cuya posición se mide con un equipo de geoposicionamiento (normalmente especializado), obteniendo sus

coordenadas tridimensionales (X, Y, Z). Esto significa que, además de contar con la latitud y longitud, obtendríamos valores de elevación, lo que nos ayudaría en proyectos donde la topografía y el relieve son factores importantes.

La cantidad y la distribución de los puntos de control son factores fundamentales para incrementar la exactitud de los modelos obtenidos. Como regla general, debemos contar con al menos tres puntos de control distribuidos de manera estratégica a lo largo y ancho del área de estudio. Cuanto mayor sea el número de puntos, mejores serán los resultados obtenidos, ya que se reducirá el margen de error en las mediciones. En casos donde solo tengamos tres puntos, es recomendable distribuirlos en forma de triángulo y no siguiendo una línea; esta configuración permite una mejor representación de las características del terreno (Fig. 3). Utilizar una disposición lineal podría hacer que las áreas lejanas a los puntos de control sean más susceptibles al error de posición.

Podemos utilizar dos tipos de puntos de control, los señalizados (utilizando marcas) y los naturales o improvisados basados en las características reconocibles en el área de interés. En el primer tipo podremos utilizar señales previamente establecidas, como cuadrantes con colores contrastantes (típicamente blanco con

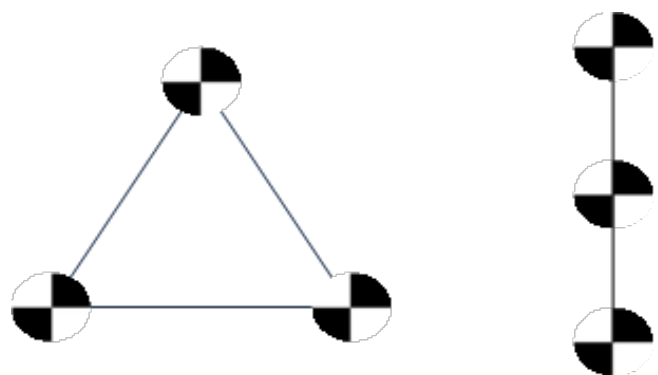


Figura 3. Ejemplo de colocación de puntos de control. Derecha, distribución recomendada. Izquierda, distribución no recomendada.

negro), formando una cruz o figuras circulares concéntricas con un punto central, y cada marca tendrá sus medidas conocidas (Fig. 4). En el segundo tipo, nos ayudaremos de objetos que puedan ser claramente identificados en las imágenes, como las esquinas de construcciones o cualquier objeto que pueda ser distintivo en el paisaje, como tapas de drenaje, rocas o pintura sobre la calle. Si bien estos últimos pueden ser más fáciles de identificar y no requieren preparación previa, la efectividad de su uso depende de su visibilidad en las imágenes adquiridas.

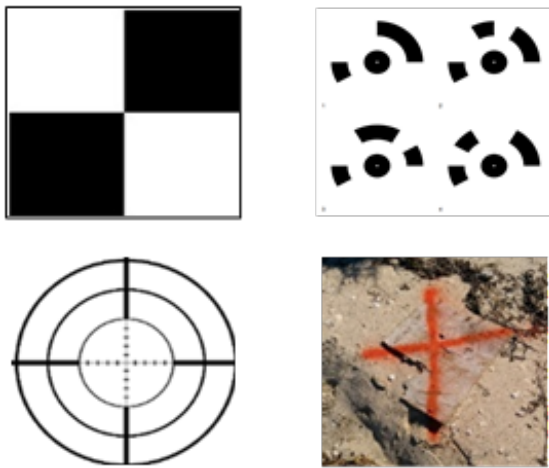


Figura 4. Ejemplos de diseño de puntos de control.

2.2. Planeación de vuelo

Para una correcta ejecución de un vuelo fotogramétrico, se requiere realizar —de manera sistemática y, en ocasiones, de manera simultánea— la obtención de puntos de control y la ejecución del vuelo, por lo que se debe precisar en qué orden se realizarán las actividades y qué se necesitará para cada una. Es importante determinar cuál de ellas tiene prioridad y si tiene impacto con una actividad posterior. Cabe mencionar que hay actividades que se llevan a cabo desde antes de salir a campo. A continuación, se detallará la secuencia con la que se recomienda realizar un vuelo fotogramétrico (Fig. 5).

Previo a la ejecución de un vuelo, se deberá contar con las marcas a utilizar para establecer los puntos de control (al menos tres, aunque esto dependerá del área a evaluar), baterías del dron y del control cargadas, tarjetas de memoria formateadas y asegurar que el *software* de vuelo esté actualizado. Los puntos de control normalmente se obtienen con un GPS diferencial, por lo que también debemos asegurarnos de que ese equipo esté actualizado, tenga baterías cargadas y funcione correctamente.



Figura 5. Flujo de trabajo para la ejecución de un vuelo fotogramétrico.



Un GPS diferencial es un sistema de posicionamiento altamente preciso que corrige el error de las coordenadas relacionado con las condiciones atmosféricas que afectan las ondas de radio emitidas por los satélites y que son utilizadas para triangular la posición de un punto.

La planeación de un vuelo fotogramétrico será un paso crucial para asegurar la calidad y la exactitud de los productos generados a partir de las imágenes de dron. Para llevar a cabo un vuelo exitoso, es importante considerar factores clave, entre los cuales se encuentran el tamaño del área de interés, la capacidad de la tarjeta de memoria y la autonomía de vuelo, determinada por la capacidad de las baterías del dron. Asimismo, hay que tener en cuenta los parámetros como la altura del vuelo y el porcentaje de traslape de las imágenes.

El tamaño del área de interés y la altura del vuelo determinarán la cantidad de imágenes y el tiempo de vuelo necesarios para completar la misión. Dependiendo de esto, se definirá el número de baterías y la capacidad de almacenamiento a utilizar.

La altura del vuelo está estrechamente ligada con la resolución de las imágenes, determinando el tamaño del píxel, comúnmente llamado distancia de muestreo en tierra (GSD, por sus siglas en inglés). La relación entre la altura y la resolución espacial de las imágenes es inversamente proporcional. A mayor altura, los píxeles representarán mayor área, lo que reduce el detalle visual en la imagen; a menor altura, el detalle del píxel aumenta. Asimismo, a mayor altura se requiere menor tiempo de vuelo para completar la misión y, por ende, menor uso de baterías.

El porcentaje de traslape se refiere a cuánto se superponen dos imágenes consecutivas tomadas durante el vuelo. Este parámetro tiene influencia directa con la tarjeta de memoria, ya que, al tener un mayor traslape, se necesita un mayor número de fotografías. Es fundamental tener un alto traslape tanto horizontal como vertical de las imágenes (no menos de 75 % pero se sugiere 80 %).

Para la programación del vuelo y la creación de la ruta que seguirá nuestro equipo, contamos con varias aplicaciones disponibles en el mercado, principalmente para dispositivos móviles. Las tiendas de aplicaciones para estos dispositivos ofrecen una variedad de opciones, como Pix4Dcapture, Dron Deploy, Drone Harmony, entre otras. Todas estas son compatibles con los sistemas operativos, tanto Android como iOS.

El ejemplo que utilizamos en este manual se basará en la aplicación Pix4Dcapture (actualmente descontinuado), la cual es una de las opciones más completas y amigables con el usuario.

2.3. Ubicación de puntos de control

Antes de iniciar el vuelo fotogramétrico, es necesario colocar las marcas que nos servirán de referencia en campo. La forma correcta de hacerlo requiere utilizar el polígono de vuelo, que distribuye las marcas de manera uniforme, como en el ejemplo que a continuación se muestra (Fig. 6).

Para identificar los sitios aptos para colocar los puntos de control, se realiza un reconocimiento del área de trabajo. Este puede hacerse recorriendo el sitio, de manera virtual, apoyados de las imágenes satelitales disponibles, alojadas en servicios de mapas como Google Earth o, en su

caso, con un vuelo de exploración. La exploración previa nos ayudará a identificar sitios que permitan la visualización de las marcas en las imágenes que sean captadas por el dron.

Una vez que las marcas (puntos de control) hayan sido colocadas, se medirá su posición con un GPS diferencial hasta alcanzar la máxima precisión (Fig. 7).



Figura 6. Ejemplo de colocación de los puntos de control, distribuidos dentro del área de estudio.



Figura 7. Ejemplo de medición de la posición de los puntos de control con la estación Rover del GPS diferencial.

2.4 Configuración inicial de parámetros

Al abrir la aplicación, en el menú inicial tendremos varias opciones de misión, de entre ellas, elegimos GRID (para mapas 2D). Esta opción es ideal para vuelos de mapeo con una ruta rectangular o cuadrada, lo cual asegura una cobertura homogénea del área de interés. Cuando se elige de manera automática, en la pantalla del dispositivo se muestra un mapa base y una serie de elementos visuales que permitirán realizar la configuración del vuelo (Fig. 8).



Figura 8. Pantalla de planificación del vuelo en la aplicación Pix4Dcapture.

En esta parte del proceso es posible modificar el recorrido y ajustarlo al área de interés. También se adecuan los siguientes parámetros:

a) Altura de vuelo

Del lado izquierdo de la pantalla se muestra la altura a la que se realizará el vuelo y se ajusta deslizando el valor hacia arriba o hacia abajo. En nuestro caso se ajustará a 70 m.

a) Ángulo de cámara

Para cambiar los parámetros de ángulo de cámara, traslape de imágenes y velocidad del dron, tocamos en la esquina superior derecha el ícono con forma de engrane en color verde y nos mostrará el siguiente menú (Fig. 9).

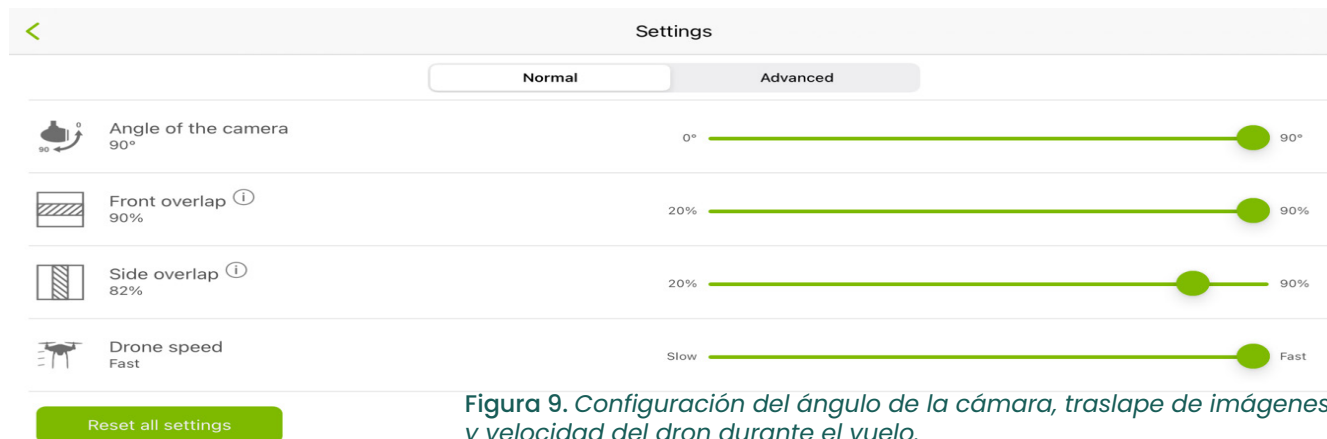


Figura 9. Configuración del ángulo de la cámara, traslape de imágenes y velocidad del dron durante el vuelo.

La primera barra controla el ángulo de la cámara. En la mayoría de los vuelos fotogramétricos necesitamos que la cámara mire totalmente hacia el nadir, es decir, en posición completamente vertical apuntando hacia el suelo, por lo que el ángulo utilizado será de 90°. Esta perspectiva permitirá que no haya distorsiones en las imágenes y que se dificulte el procesamiento.

En las siguientes dos opciones se tienen los ajustes de traslape de imágenes, tanto en dirección frontal como en el lateral. La primera representará el área compartida entre imágenes de la misma fila, mientras que la segunda corresponde a la información compartida con las líneas adjuntas en la ruta del vuelo del dron. Los valores mínimos recomendados para garantizar la conexión de las imágenes y el correcto procesamiento del modelo son > 75 % de valor frontal y lateral, respectivamente. **Es muy importante tener un alto traslape en las imágenes (sugerimos no menos de 80 %).**

La última barra determina el valor de la velocidad de vuelo del dron. En este parámetro debemos asegurarnos de que sea menor a la velocidad de captura de la cámara incluida con el equipo, ya que, si la velocidad del dron es mayor a la de captura, podríamos obtener imágenes de mala calidad que no permitirían reconocer puntos homólogos entre imágenes.

Se recomienda usar una velocidad moderada (12 m/s) si no se tiene conocimiento de los detalles de la cámara.

Después de configurar la altura y el porcentaje de traslape, ajustaremos el tamaño del polígono de interés. Antes de empezar la modificación, es necesario tener presente el área de interés; para ello, presionamos el botón de localización, el cual nos reubicará en el sitio actual (debemos tener en cuenta la ubicación del dispositivo móvil y el dron). Después, colocando ambos dedos sobre la pantalla, haremos acercamientos o alejamientos según el espacio que queramos visualizar.

Con la vista deseada en la pantalla, modificaremos el polígono del recorrido. Para agrandarlo o reducirlo, tomamos con el dedo sus vértices y arrastramos hasta conseguir el área de interés deseada. Para modificar la posición, tocamos el centro del polígono y lo arrastramos a la posición deseada. Para rotarlo, utilizaremos las flechas bidireccionales y ajustaremos hasta que la posición esperada sea la correcta. Al modificar el polígono, la ventana del tiempo de vuelo cambiará: cuán mayor sea el área cubierta, mayor será el tiempo requerido.

Debemos tener en cuenta el tiempo de autonomía de las baterías para asegurar que el plan de vuelo se complete de manera correcta.



2.5. Ejecución del vuelo

Una vez configurados los parámetros, iniciaremos la ejecución del vuelo. En la aplicación seleccionamos el botón de inicio (Start). Inmediatamente aparece una lista de verificación para indicar que se cumple con todos los elementos necesarios para realizar el vuelo de manera segura. Si se cumple de manera satisfactoria, en cada uno de los elementos se colocará una marca color verde en cada parámetro (Fig. 10).

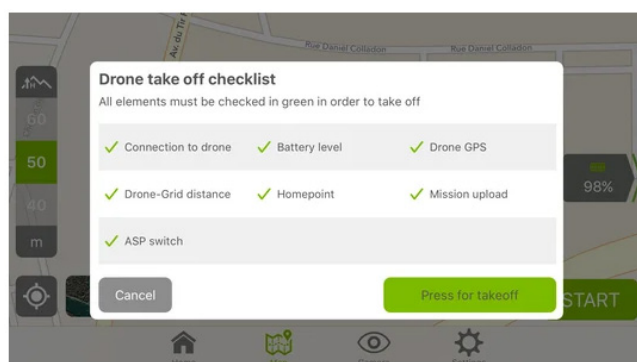


Figura 10. Verificación de parámetros previo al inicio del vuelo, en el programa Pix4Dcapture.

En caso de que un parámetro no pase la revisión, este se deberá corregir para poder iniciar la misión de vuelo. La seguridad es primordial en esta etapa, por ello es fundamental despejar el área de despegue del dron, respetando al menos un radio de dos metros donde no existan obstáculos o personas. Las hélices, al girar a una alta velocidad, se pueden convertir en elementos cortantes y causar lesiones. Asimismo, es importante asegurar que no haya cables eléctricos o ramas de árboles que puedan interferir en el despegue y aterrizaje.

Si la zona cumple con los elementos anteriores, procedemos a ejecutar el vuelo. En todo momento debe existir contacto visual con el dron. Verificamos el progreso de la misión en la pantalla del control, prestando atención a la

estabilidad del equipo y al estado de la batería. De igual manera, realizamos revisiones periódicas en la pantalla para asegurarnos de que se siga la ruta preestablecida. En la aplicación hay una opción para ver las imágenes tomadas en tiempo real, esta es útil para verificar las imágenes capturadas y determinar si cumplen con la calidad deseada o, en su caso, abortar la misión y volver a configurar parámetros de vuelo.

Al finalizar la misión de vuelo, el equipo se dirigirá al punto de despegue para proceder a aterrizar. Es recomendable planificar el final de la ruta cerca de nuestra posición para facilitar el monitoreo de aterrizaje. Cuidaremos que el descenso sea suave y controlado para evitar percances. Se recomienda llevar a cabo el aterrizaje de manera manual.

Es importante señalar que un solo vuelo de dron no siempre cubre el área de interés en su totalidad, por lo que, cada vez que se agote la batería o se llene la tarjeta de memoria, el dron deberá regresar al punto de inicio y aterrizar para reemplazar la batería o cambiar dicha tarjeta y reiniciar la misión, así como el proceso de despegue cuantas veces sea necesario.

El viento, la visibilidad, la nubosidad y la lluvia son factores adversos que pueden afectar la seguridad de operación de un dron, por lo que es recomendable verificar, previo al vuelo, si las condiciones permitirán realizar nuestras actividades.



El código QR que se muestra a continuación, nos dará acceso a un video demostrativo sobre la planeación y ejecución de un vuelo fotogramétrico.

CAPÍTULO 3

Procesamiento de fotografías aéreas

Capítulo 3. Procesamiento de fotografías aéreas

Existen dos programas principales en los que se utilizan imágenes digitales para la construcción de ortomosaicos y modelos digitales de elevación (MDE) mediante algoritmos SfM: Agisoft Metashape y Pix4D. A lo largo de este manual utilizaremos Agisoft Metashape, pero se debe considerar que los flujos de trabajo son muy similares en ambos programas.

La construcción de ortomosaicos consiste en tres pasos principales: 1) Extracción de características y alineación de imágenes; 2) Construcción de nube de puntos densa, y 3) Construcción de ortomosaicos y Modelo Digital de Elevación (MDE). En este capítulo abordaremos los pasos a seguir para obtener un ortomosaico y su correspondiente MDE.

En el Anexo 1 se encuentra una descripción detallada del panel y los íconos del programa Agisoft Metashape. Recomendamos revisarlos antes de seguir.

Lo primero que haremos será abrir el programa Agisoft Metashape. Posteriormente cargaremos una serie de imágenes obtenidas por drones a partir de una misión programada. Para cargar las imágenes, abriremos el menú Workflow (Flujo de trabajo) y seleccionaremos Add Photos (Agregar fotos). En las opciones del flujo de trabajo se presentan, en orden progresivo de arriba hacia abajo, los pasos a seguir para la construcción de ortomosaicos y MDS.

La interfaz gráfica del programa ofrece dos formas de agregar imágenes: a través del menú Workflow, seleccionando Add photos o mediante el ícono correspondiente en la barra de herramientas ubicada en el Workspace (Espacio de trabajo, Fig. 11).

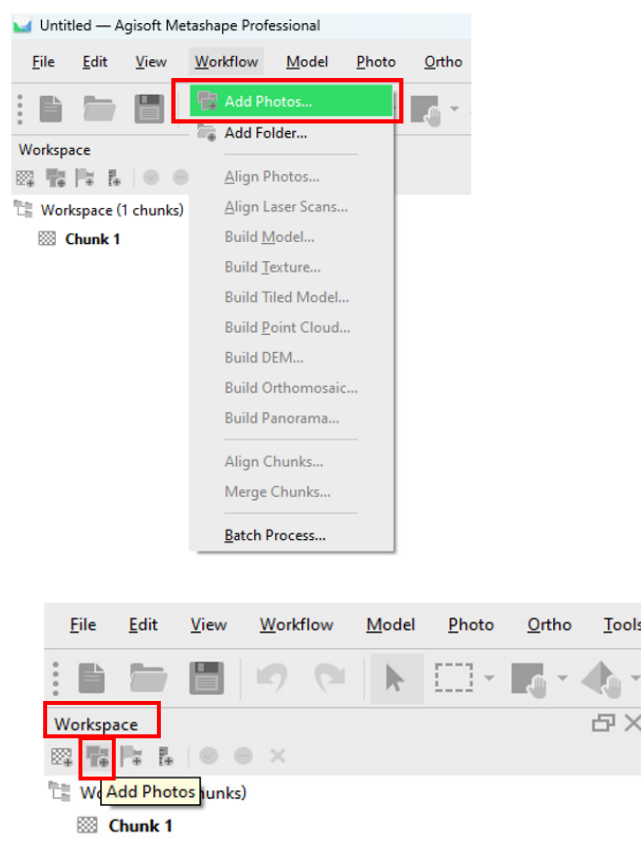


Figura 11. Carga de imágenes con agisoft metashape.

Al hacer clic en Add Photos, se abrirá una ventana de diálogo (Fig. 12), en donde agregaremos las imágenes correspondientes a la misión de vuelo o las imágenes aéreas que deseamos trabajar. Las seleccionamos y luego aceptamos.

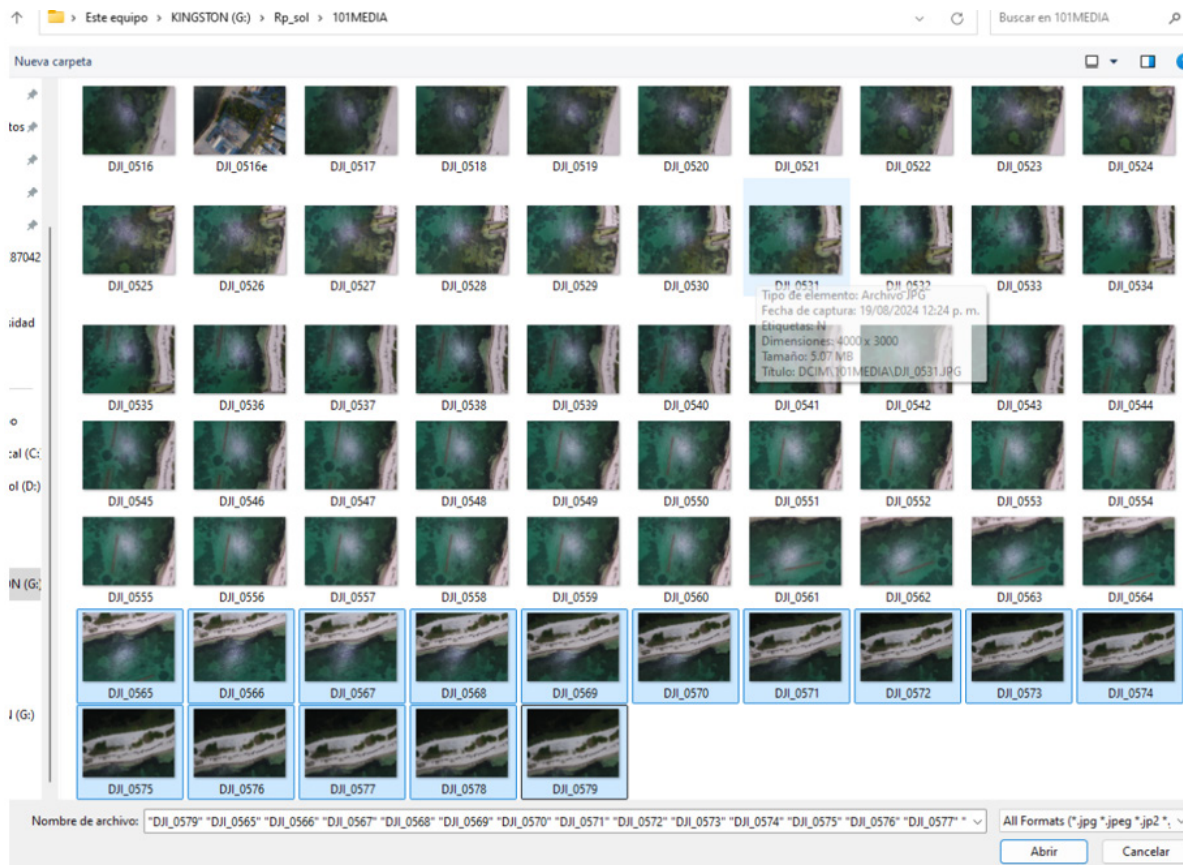


Figura 12. Selección de imágenes a cargar en Agisoft Metashape

Si las imágenes fueron capturadas con un dron equipado con una cámara multiespectral, es importante agregarlas todas, es decir, todos los canales del espectro que el sensor capture.

Las imágenes aparecerán en el espacio de trabajo agrupadas en un *chunk* (lote). Si trabajamos con imágenes de diferentes características o de distintas zonas, podemos organizarlas en varios lotes. Al principio, todas las imágenes mostrarán las siglas NA, lo que indica que no han sido alineadas (Fig. 13). Si hacemos clic en Reference (Referencia), podremos ver detalles sobre la geotiqueta asociados a cada imagen. Actualmente, la gran mayoría de los drones cuenta con un sistema de geoposicionamiento integrado (conocido como GPS), mediante el cual se asignan coordenadas geográficas de captura a cada imagen (Fig. 14).

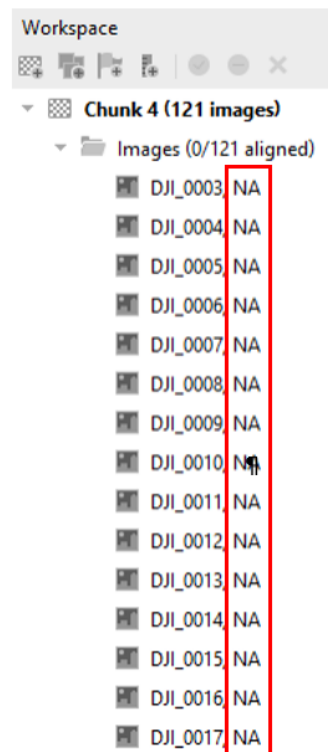


Figura 13. *Imágenes cargadas en un lote de trabajo, sin alineación.*

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Yaw (°)
DJI_0007	-86.802461	21.159631	56.549000	10.000000		342.000
DJI_0009	-86.802666	21.160215	56.549000	10.000000		342.000
DJI_0010	-86.802813	21.160633	56.549000	10.000000		342.100
DJI_0011	-86.802902	21.160884	56.549000	10.000000		342.100
DJI_0017	-86.803618	21.162921	56.549000	10.000000		342.200
DJI_0019	-86.803854	21.163593	56.549000	10.000000		342.200
DJI_0004	-86.802101	21.158612	56.449000	10.000000		341.600
DJI_0005	-86.802222	21.158955	56.449000	10.000000		341.700
DJI_0006	-86.802343	21.159294	56.449000	10.000000		341.900

Markers - Longitude Latitude Altitude (m) Accuracy (m) Error (m) Projections

Total Error

Control points

Check points

Scale Bars - Distance (m) Accuracy (m) Error (m)

Total Error

Control scale bars

Check scale bars

Photos Workspace Reference

Figura 14. Valores de geoetiqueta para cada imagen.

A continuación, procederemos a alinear las imágenes. Este proceso tiene varias opciones según la precisión deseada. La opción de alineación puede ajustarse en un rango de baja a muy alta precisión, lo recomendable es seleccionar alto. En conjuntos de imágenes grandes es útil activar las pestañas Generic Preselection (Preselección genérica) y Reference Preselection (Preselección de referencia), que reducen el tiempo de procesamiento (Fig. 15).

El tipo de alineación también puede configurarse. Si las imágenes contienen metadatos con información de geolocalización, se recomienda utilizar la opción Source (Fuente). Si no tienen esta información, la opción Estimated (Estimada) estima las posiciones en función de los puntos de enlace. Para imágenes consecutivas sin metadatos, se recomienda usar Sequential (Secuencial).

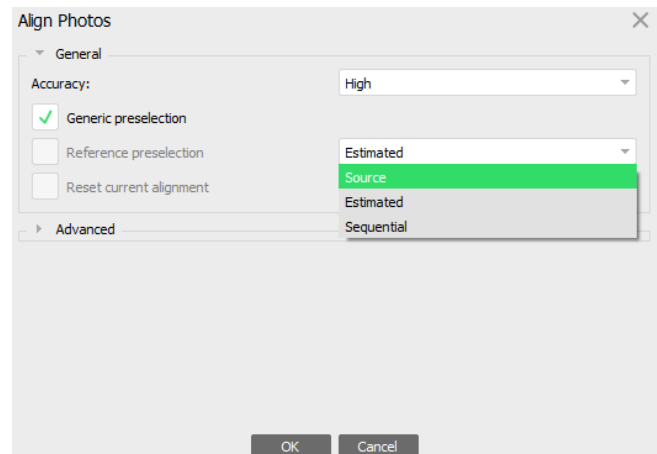


Figura 15. Menú ajuste para alineación de imágenes.

Una vez alineadas, las imágenes ya no mostrarán las siglas NA, y el programa indicará cuántas imágenes se han alineado (*aligned*) correctamente (Fig. 16).

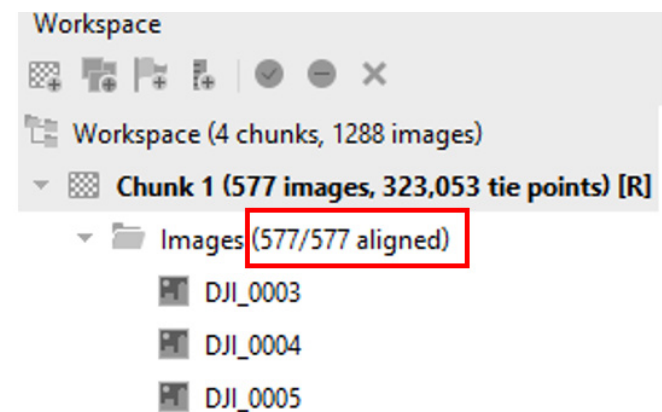


Figura 16. Alineación de imágenes.

Posterior a la alineación, procederemos a generar una nube de puntos. Cada punto en esta nube corresponde al menos a tres imágenes capturadas desde distintos ángulos. Si activamos el ícono de cámara, podremos ver las posiciones relativas de cada toma (Fig. 17, recuadro rojo).

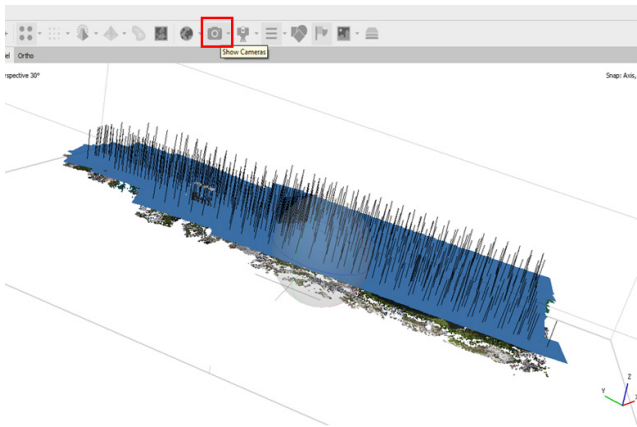


Figura 17. Vista, alineación de imágenes.

El modelo generado tendrá una referencia espacial basada en las posiciones de captura de las imágenes (latitud, longitud y altura). Dado que los drones normalmente no tienen un GPS diferencial, el error en la posición puede ser del orden de metros, por lo que, como se mencionó en el capítulo anterior, será necesario incluir puntos de control para corregir el modelo.

Para agregar los puntos de control, seleccionamos el ícono correspondiente en el menú Reference (Referencia, Fig. 18). Luego, cargamos la información de los puntos de control en un archivo delimitado por comas o similar. Es importante especificar correctamente las columnas para longitud, latitud, altitud y etiquetas de los puntos.

Se habilita la ventana que nos permitirá subir la información en formato delimitado por comas, archivo de hoja de cálculo, entre otros (Fig. 19).

Es fundamental seleccionar el sistema de coordenadas de referencia (CRS) correcto, es decir, que sea el mismo con el que se obtuvieron los puntos de control, y asegurarnos de que coincida con el del proyecto (Fig. 20). Algunos aspectos importantes para considerar cuando carguemos el archivo con la información de los puntos de control son el Delimiter (Delimitador),

Reference						
Import Reference						
Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Yaw (°)
✓ DJI_0235	-86.803570	21.170258	56.758000	10.000000	5.099054	169.700
✓ DJI_0171	-86.801550	21.169575	56.658000	10.000000	5.866350	168.800
✓ DJI_0172	-86.801480	21.169226	56.658000	10.000000	3.175613	168.700
✓ DJI_0174	-86.801346	21.168540	56.658000	10.000000	3.524925	168.600
✓ DJI_0209	-86.801995	21.167047	56.658000	10.000000	5.863504	168.800
✓ DJI_0213	-86.801736	21.165741	56.658000	10.000000	7.459039	169.100
✓ DJI_0214	-86.801667	21.165401	56.658000	10.000000	7.699450	169.400
✓ DJI_0234	-86.803635	21.170599	56.658000	10.000000	6.061544	169.700
✓ DJI_0238	-86.803362	21.169197	56.658000	10.000000	0.343992	169.700

Figura 18. Ícono para cargar archivo con puntos de control.

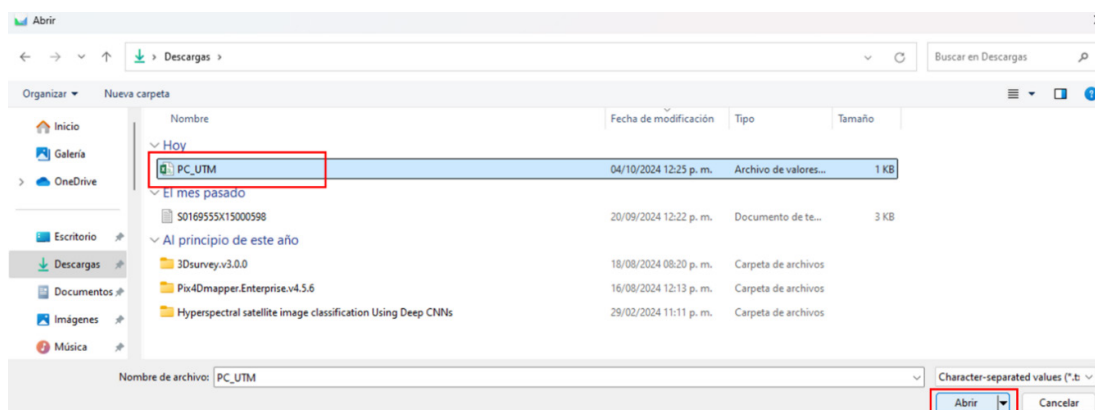


Figura 19. Elección de archivo.

que indica el caracter que separa los valores en cada fila de datos (por ejemplo, coma, punto y coma, tabulador), así como las columnas donde especificamos las que corresponden a longitud, latitud y altitud. Si la primera fila contiene los nombres de las columnas, se debe indicar que la lectura de los datos tiene que comenzar a partir de la segunda fila (Fig. 20).

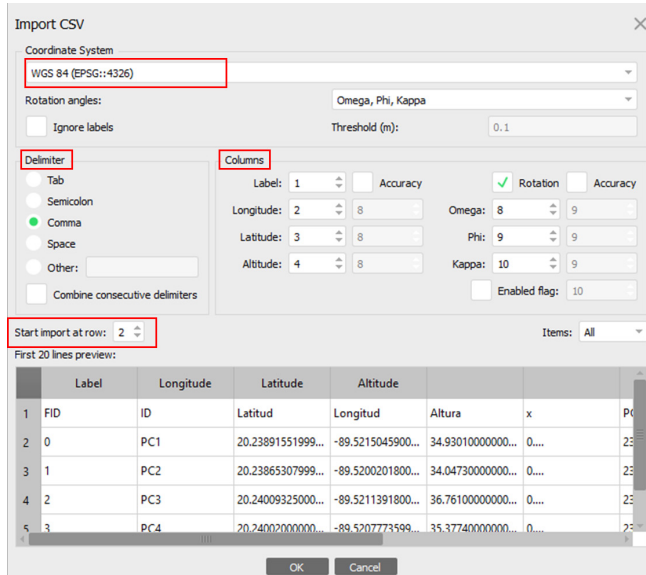


Figura 20. Parámetros de puntos de control.

Al hacer clic en OK, se desplegarán como Markers (Marcadores) en la ventana de referencia, y en la parte de marcadores, en el menú Referencia (Referencia, Fig. 21).

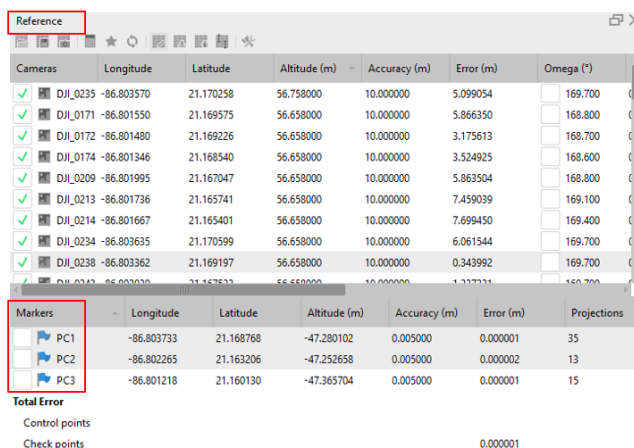


Figura 21. Vista de puntos de control en el menú Referencia.

Ahora se filtrarán los marcadores para ver qué fotos tienen puntos de enlace sobre los puntos de control. Para ello, hacemos clic derecho en el punto de control y seleccionamos Filter Photos by Markers (Filtrar imágenes por marcador, Fig. 22).

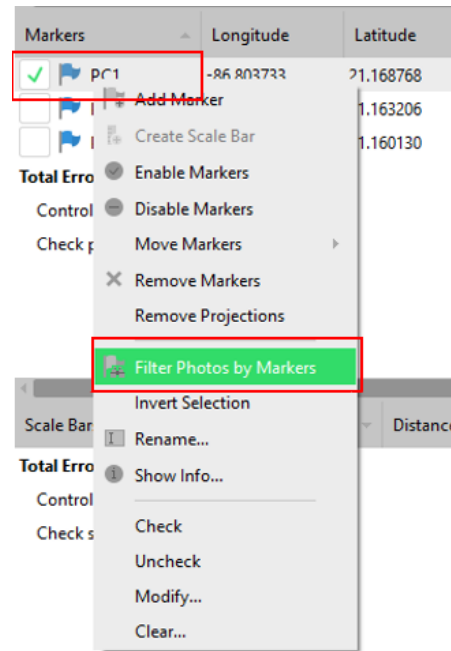


Figura 22. Filtrado de imágenes.

Si no aparece la pestaña de imágenes, la habilitamos en el menú View (Ver, Fig. 23).

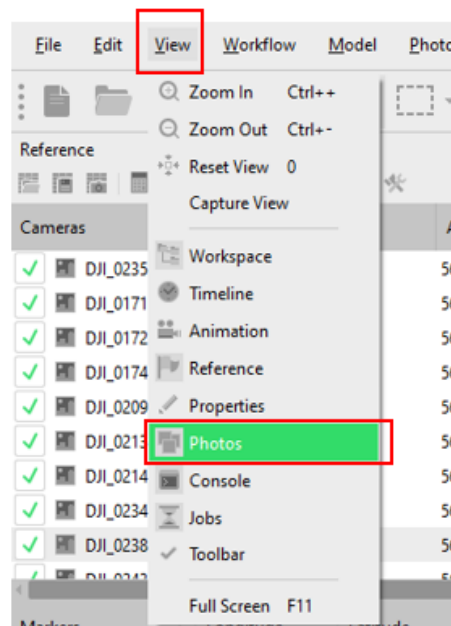


Figura 23. Habilitar pestaña Fotos.

Para ajustar las posiciones de los puntos de control, seleccionamos una de las imágenes filtradas. Este proceso nos permite ubicar cada punto de control en su posición correcta. Por ejemplo, el punto PC01 debería estar en el centro de la diana, pero aparece desplazado (Fig. 24), entonces lo corregimos haciendo clic izquierdo sobre el punto, mantenemos presionado el botón y arrastramos el punto hasta el centro exacto de la diana. Esta operación se repite para todos los puntos de control en cada una de las imágenes filtradas, asegurando así la exactitud de las referencias.



Figura 24.
Posición de los puntos de control.

Para hacer los ajustes teniendo en cuenta los cambios anteriores y disminuir el error, seleccionamos el ícono Optimizar en la pestaña Reference (Referencia, Fig. 25).

The screenshot shows the 'Reference' application window. At the top, there is a toolbar with several icons. A red box highlights the 'Optimize Cameras' button, which is represented by a star icon. Below the toolbar, the 'Cameras' table is displayed. The table has five columns: 'Cameras', 'Longitude', 'Latitude', 'Altitude (m)', and 'Accuracy (m)'. The 'Cameras' column contains a small camera icon and a text label for each entry. The other columns contain numerical data. The table lists ten camera entries, all with an accuracy of 10.000000.

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)
DJI_0235 -86.803570	21.170258	56.758000	10.000000	
DJI_0171 -86.801550	21.169575	56.658000	10.000000	
DJI_0172 -86.801480	21.169226	56.658000	10.000000	
DJI_0174 -86.801346	21.168540	56.658000	10.000000	
DJI_0209 -86.801995	21.167047	56.658000	10.000000	
DJI_0213 -86.801736	21.165741	56.658000	10.000000	
DJI_0214 -86.801667	21.165401	56.658000	10.000000	
DJI_0234 -86.803635	21.170599	56.658000	10.000000	
DJI_0238 -86.803362	21.169197	56.658000	10.000000	
DJI_0242 -86.803020	21.167533	56.658000	10.000000	

Figura 25. Ícono Optimizar modelo.

Para mejorar la precisión del modelo, después de seleccionar la opción Optimize Cameras (Optimizar cámaras) en la pestaña Reference (Referencia), se habilita una nueva ventana (Fig. 26), donde podremos elegir distintos parámetros. Cada uno de ellos representa una característica específica de la cámara o de la imagen que puede ser ajustada para mejorar la precisión del modelo final. Tales parámetros se describen a continuación:

- **Fit f :** ajusta la distancia focal de la cámara.
- **Fit c_x, c_y :** ajustan el centro principal de la imagen, es decir, el punto donde el eje óptico de la cámara interseca el plano de la imagen.
- **Fit k_1, k_2, k_3, k_4 :** modelan las distorsiones radiales de la lente.
- **Fit p_1, p_2, b_1, b_2 :** modelan las distorsiones tangenciales de la lente.
- **Adaptive camera model fitting:** permite al *software* seleccionar automáticamente el modelo de cámara más adecuado para cada imagen en función de las características específicas de esa imagen.
- **Estimate tie point covariance:** permite estimar la incertidumbre en la posición de los puntos de enlace (*tie points*) utilizados para alinear las imágenes.
- **Fit additional corrections:** permite ajustar otros parámetros adicionales, como la inclinación del sensor o las variaciones en la escala.

En el ejercicio dejamos las opciones por defecto y hacemos clic en OK. Normalmente no es necesario cambiar estos parámetros, a menos que no puedan alinearse la mayoría de las imágenes.

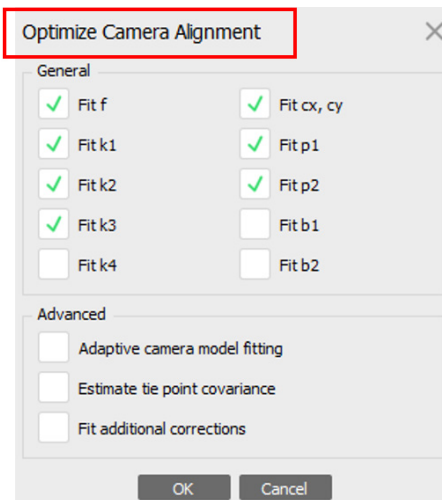


Figura 26.
Elección de
parámetros
para
optimizar
alineación de
imágenes.

Con los ajustes descritos, es posible obtener precisiones en el modelo del orden de milímetros.

3.1. Flujo de trabajo con imágenes multiespectrales

Cuando trabajamos con un conjunto de imágenes capturadas por una cámara multiespectral, es fundamental ajustar los valores de reflectancia; para ello, hacemos uso del panel de calibración que normalmente se incluye con el equipo. Para este ajuste, hacemos clic en el menú Tools (Herramientas) y en la opción Calibrate Reflectance (Calibrar reflectancia, Fig. 27).

En la nueva ventana seleccionamos Localizar panel y agregamos en el lado derecho, Panel Calibration, los valores correspondientes a ese panel de calibración. Estos son proporcionados por el proveedor del panel. El software iniciará automáticamente una búsqueda en el conjunto de imágenes para identificar aquellas que contienen el panel de calibración. Una vez identificadas, el sistema procederá a leer los valores de reflectancia para cada banda espectral. Cuando el proceso de búsqueda y lectura finalice, se habilitará la casilla Use Reflectance Panels (Usar panel de reflectancia, Fig. 28), la seleccionamos y presionamos OK.

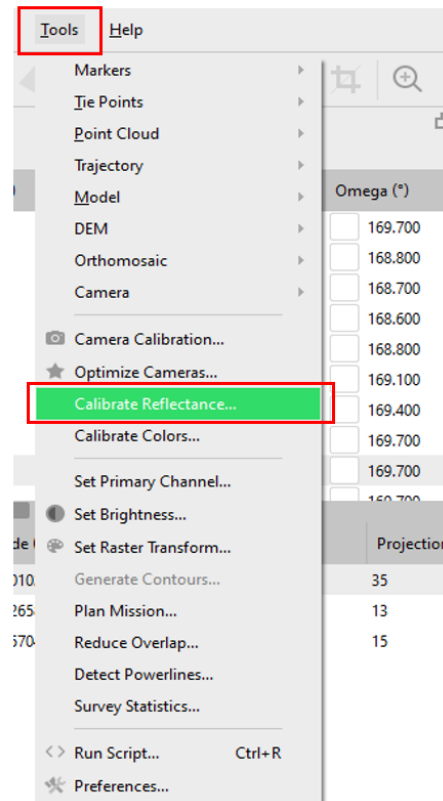


Figura 27.
Elección de
herramienta
para calibrar
reflectancia.

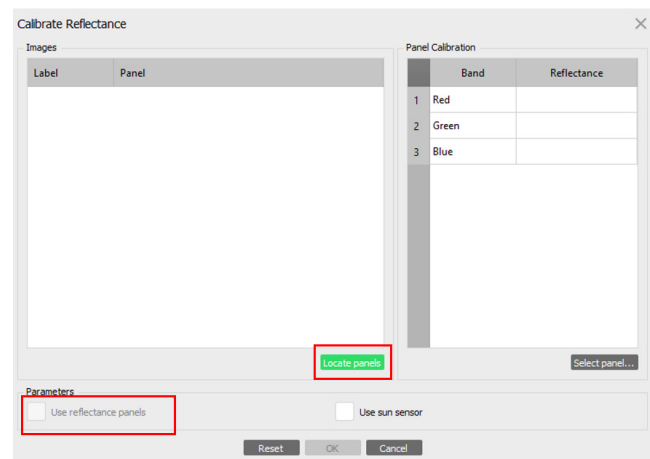


Figura 28. Detección de paneles de reflectancia.

Este procedimiento permite que el software aplique los valores de referencia del panel a todas las imágenes del conjunto, asegurando así una calibración precisa de la reflectancia en cada banda espectral.

3.2. Trabajo con la nube de puntos

Una vez que las imágenes están alineadas y optimizadas con puntos de control, será necesario limpiar la nube de puntos para incrementar la precisión al modelo en 3D. Para ello, accedemos a la vista del modelo de la nube de puntos de enlace haciendo doble clic izquierdo en el modelo Tie Points (Puntos de unión), en el Workspace (Espacio de trabajo, Fig. 29).

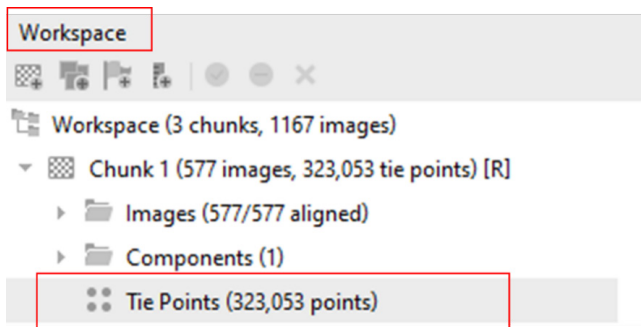


Figura 29. Vista de nube de enlace.

Para manipular el modelo, deberemos mantener presionado el botón izquierdo del ratón. Esto permitirá rotar el modelo en tres ejes (X, Y y Z), así podremos examinar la nube de puntos desde diversos ángulos. Al rotar el modelo, debemos observar cuidadosamente la nube de puntos para identificar aquellos puntos de enlace que estén fuera de posición, es decir, los que se encuentren muy por debajo y por encima de la nube principal (Fig. 30).

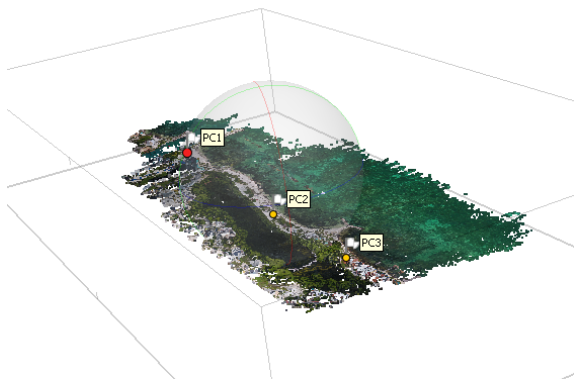


Figura 30. Vista puntos de enlace.

Una vez identificados estos puntos anómalos, procedemos a seleccionarlos y borrarlos. Estos suelen ser errores en la generación del modelo y su eliminación mejorará la calidad general del resultado.

Para eliminar los puntos, seleccionamos el ícono correspondiente en el menú. Tenemos varias opciones de selección disponibles: Rectangle (Rectangular), Circular y Free-Form (Forma-libre). Escogemos la opción que mejor se ajuste a nuestras necesidades. En este caso, seleccionaremos el modo rectangular (Fig. 31) y arrastraremos el cursor sobre los puntos que deseamos eliminar. Ya seleccionados, oprimimos el botón Suprimir en el teclado de la computadora.

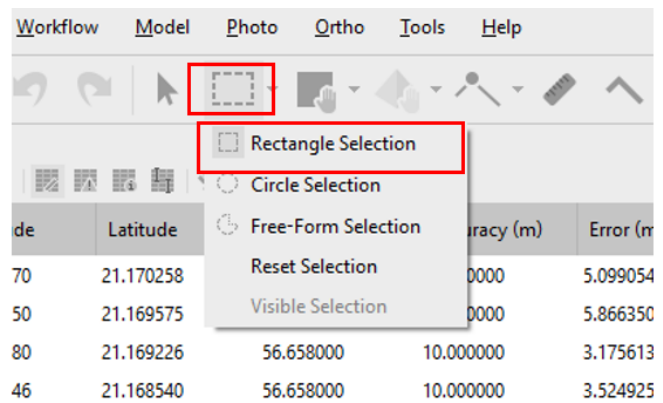


Figura 31. Elección de herramienta para seleccionar puntos de enlace.

Después de depurar la nube de puntos de enlace, procedemos a la creación de un modelo tridimensional, en el cual seleccionamos como base u origen el modelo de Depth Maps (Profundidad de mapas), esto permitirá generar la estructura tridimensional detallada. Al seleccionar el tipo de superficie, optamos por la opción 3D (Fig. 32). Para la calidad del modelo, se recomienda seleccionar alta, lo mismo en cuanto al conteo de caras. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a mayor resolución o número de caras, el proceso de cómputo será más intensivo y, por lo tanto, el tiempo de procesamiento también aumentará de manera considerable.

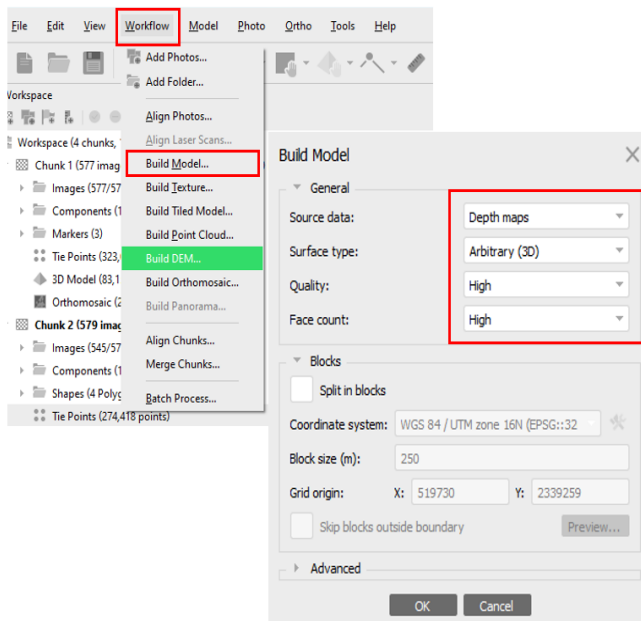


Figura 32. Parámetros construcción de modelo.

Al finalizar el proceso, obtendremos un modelo 3D detallado en el cual podremos continuar refinando la estructura. De nuevo, es posible seleccionar y eliminar puntos que se encuentren fuera del modelo o que estén demasiado altos o bajos en relación con la geometría principal. Este refinamiento sigue el mismo procedimiento utilizado previamente en la limpieza de la nube de puntos de enlace.

Es importante tener en cuenta que, dependiendo de la versión de Agisoft Metashape, la generación de la nube de puntos densa puede realizarse de manera directa o como parte del proceso de creación del modelo 3D.

Después de realizar el refinamiento, obtendremos un modelo 3D ajustado, con alturas corregidas, así como las coordenadas de latitud y longitud correctamente alineadas. A partir de este modelo, es posible derivar un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés).

Para generar el DEM, hacemos clic en la pestaña Workflow (Flujo de trabajo) y seleccionamos la opción Build DEM (Crear DEM). Existen varias opciones en este flujo de trabajo (puntos de enlace, nube de puntos profunda y modelo tridimensional); de preferencia, seleccionamos el modelo 3D (Fig. 33).

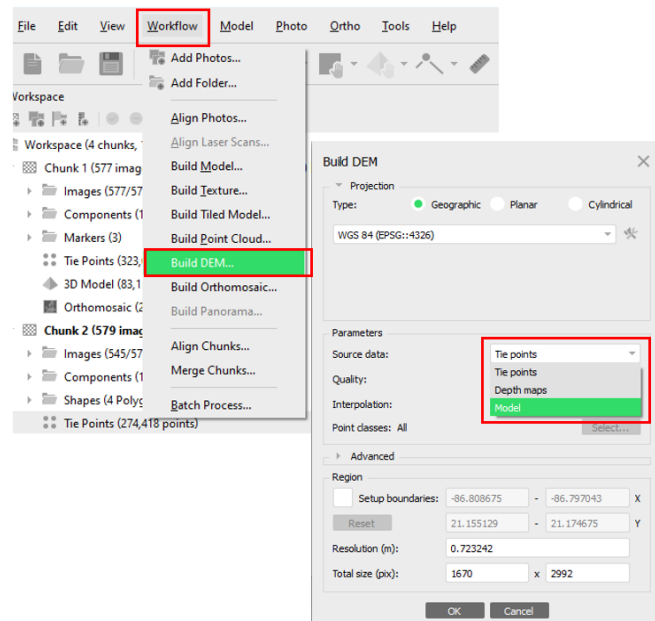
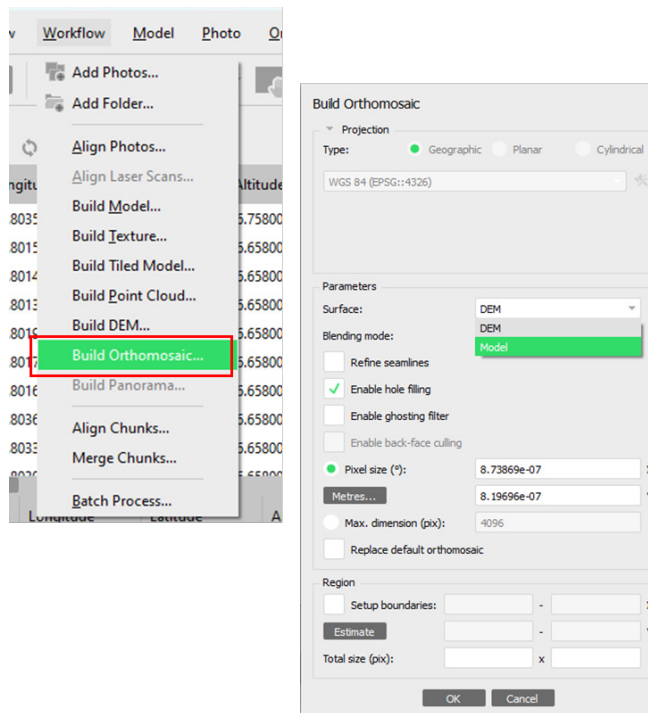


Figura 33. Creación del modelo digital de elevación.

Por último, construiremos el ortomosaico. Este proceso consiste en rectificar cada una de las imágenes individuales con un modelo de elevación o modelo tridimensional. Después de la corrección, se genera un mosaico de imágenes con corrección por alturas de toda la escena (ortomosaico).

Para este proceso, seleccionamos, en Workflow (Flujo de trabajo), Build Orthomosaic (Construir ortomosaico, Fig. 34). En parámetros, en el tipo de superficie tenemos varias opciones, entre estas podemos elegir nube de puntos de enlace, DEM y modelo 3D.



Nota: en ocasiones, no es posible realizar el proceso sin antes guardar el proyecto.

Después de esta serie de pasos, tendremos los siguientes productos finales: **ortomosaico, modelo digital de elevación y modelo tridimensional.**



En el siguiente QR podremos observar un video que demuestra el flujo de trabajo descrito en este capítulo.

Figura 34. Creación de ortomosaico.

CAPÍTULO 4

Uso de fotogrametría digital submarina
en el estudio de arrecifes coralinos

Capítulo 4. Uso de fotogrametría digital submarina en el estudio de arrecifes coralinos

La fotografía digital submarina es cada vez más utilizada en el monitoreo de arrecifes coralinos. En el video que se puede ver con el siguiente QR se describe el método para la obtención de imágenes mediante buceo SCUBA para la realización de fotogrametría digital submarina.



Al igual que en cualquier técnica de medición, la fotogrametría digital submarina es susceptible a fuentes de error inherentes al procedimiento de obtención de las imágenes. Para garantizar la mejor calidad de las imágenes obtenidas en campo, se recomienda evitar zonas con corrientes fuertes y tener una buena visibilidad en la columna de agua (al menos 20 metros). En la fase de laboratorio es fundamental hacer el procesamiento de las imágenes con una resolución media a máxima (dependiendo de la capacidad del equipo de cómputo con que se cuente) y generar y analizar el reporte de procesamiento, en donde se detallan los errores asociados a la alineación de las imágenes y asignación de escala. Se sugiere mantener errores del modelo en el orden de pocos centímetros.

4.1. Escalamiento de ortomosaicos submarinos

El procesamiento de imágenes obtenidas en entornos subacuáticos es igual al descrito en el capítulo anterior, con la diferencia de que no se contará con posiciones geográficas (ya que las

ondas de radio son absorbidas por la columna de agua). Por lo tanto, se deberá escalar el modelo y al final exportar los productos en un sistema de coordenadas local (arbitrario), con el objetivo de obtener mediciones precisas sobre tus ortomosaicos.

Después de alinear las imágenes y obtener la nube de puntos de enlace (*tie points*), como se describe en el capítulo 3, el escalamiento del modelo es crucial.

Para ello agregaremos escalas, donde será necesario identificar la ubicación precisa de las marcas o dianas en la nube de puntos de enlace. Estas marcas servirán como puntos de control. Como primer paso habilitaremos Show Images (Mostrar imágenes) en la ventana superior (Fig. 35).

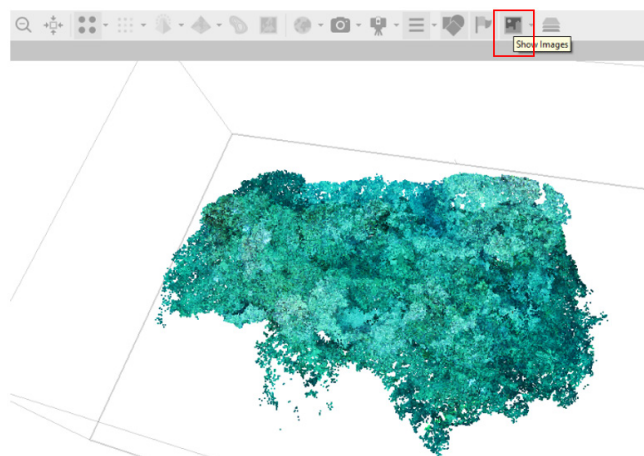


Figura 35. Ícono para habilitar imágenes en la nube de enlace.

Después de habilitar la opción de Mostrar imágenes, al hacer clic sobre la nube de puntos de enlace se mostrarán las imágenes que corresponden a

esa sección. Siguiendo este procedimiento nos enfocaremos en identificar las marcas o dianas para insertar marcadores (Fig. 36) mediante un acercamiento para posicionar en cada esquina de la diana un marcador (Fig. 37). Para insertarlo hacemos clic derecho y seleccionamos Add Marker (Agregar marcador, Fig. 38).

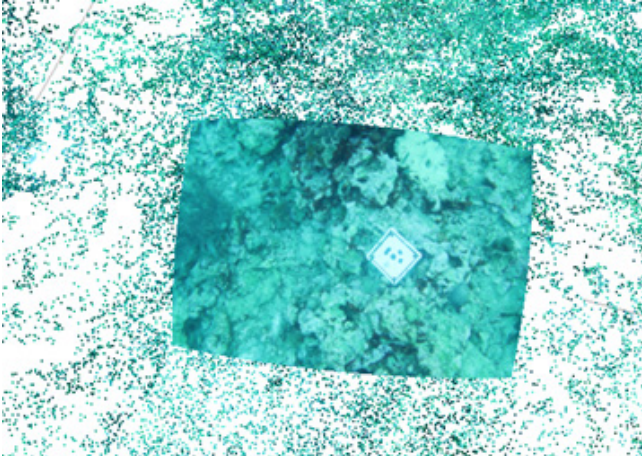


Figura 36. Ejemplo de imagen sobre nube de puntos de enlace.

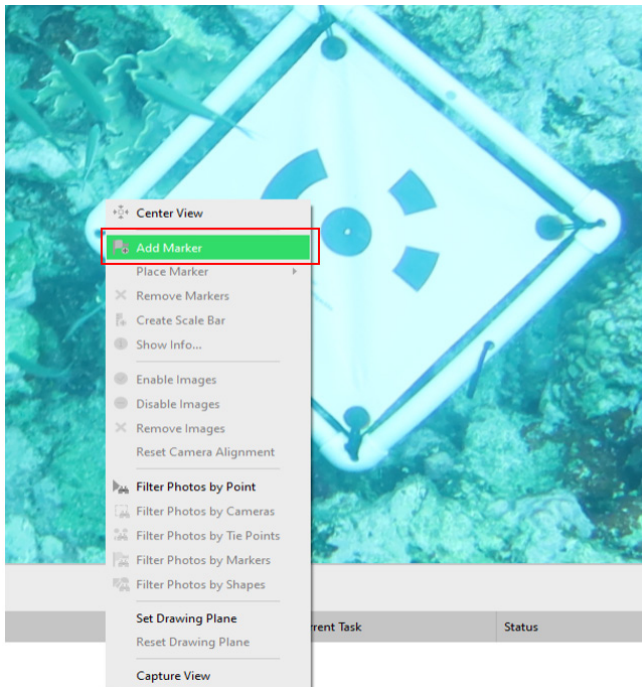


Figura 37. Agregar marcador.

Después de agregar los puntos o marcadores, es necesario ajustarlos en todas las imágenes.

Seleccionamos un marcador al hacer clic derecho y escogemos Filter Photos by Markers (Filtrar fotos por marcador, Fig. 38), lo cual debe de repetirse para todos los marcadores.

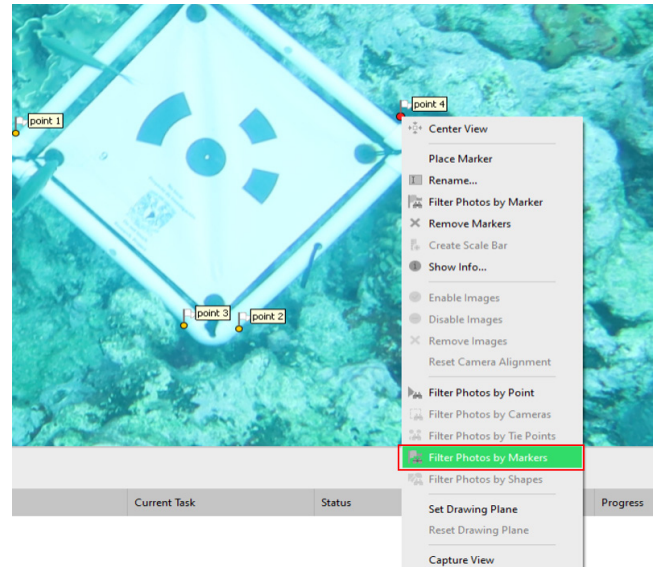


Figura 38. Filtrado de imágenes por marcador.

Después de lo anterior, se activa la pestaña Fotos (Fig. 39). Al hacer clic en ella y luego doble clic en cada imagen individual, se despliega la imagen y sobre esta el marcador o marcadores que el programa considera presentes en esa

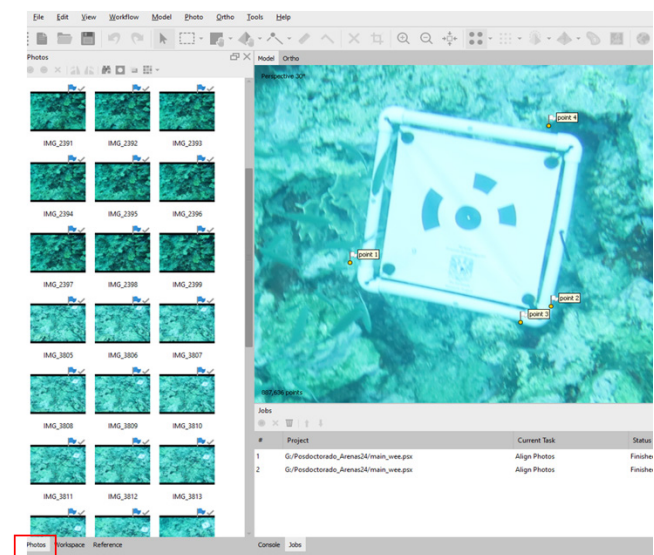


Figura 39. Vista de fotos con marcadores presentes en su escena.

escena. Es fundamental mencionar que esta detección es automática y, por lo tanto, susceptible de errores. La presencia de un marcador en la lista de una imagen indica que, según los cálculos del modelo, este debería aparecer en esa imagen. Sin embargo, esto no implica necesariamente que el marcador esté correctamente posicionado sobre la diana real, o incluso que la diana sea visible en la imagen.

Cuando tenemos un marcador presente, pero desplazado (su ubicación no coincide con la diana), debemos corregirlo manualmente. Para ello, hacemos clic derecho sobre el marcador, mantenemos presionado el botón izquierdo del ratón y arrastramos el marcador a la ubicación correcta.

Por otro lado, en ocasiones, Agisfot Metashape identifica erróneamente un marcador en una imagen donde la diana no existe. Esto puede deberse a similitudes visuales con otros elementos de la escena. Si esta es la situación, el marcador debe ser eliminado. Asimismo, tras ajustar la posición de los marcadores en otras imágenes, es posible que un marcador previamente eliminado vuelva a aparecer en una imagen donde no corresponda. En lugar de eliminarlo de manera repetida, se recomienda bloquear el marcador en esa imagen específica.

Para eliminar o bloquear un marcador en una imagen, hacemos clic derecho sobre el marcador. Aparecerá un menú con las opciones Eliminar y Bloquear. Seleccionamos la opción correspondiente según la situación (Fig. 40)

Al mover y eliminar los marcadores que no estaban bien ubicados, habrá banderines en las fotos. Estos cambiarán a color blanco cuando se eliminen, los verdes indicarán que se corrigieron y los de color azul no se habrán modificado, por ello, sus posiciones se consideran correctas (Fig. 41).

Este proceso se repite en todos los marcadores. Posterior a ello, introducimos los valores de profundidad previamente registrados durante el trabajo de campo, para lo cual nos dirigimos a la pestaña Reference (Referencia, Fig. 42).

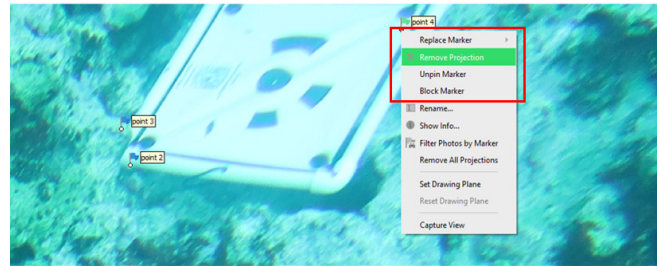


Figura 40. Eliminar marcador en una escena.

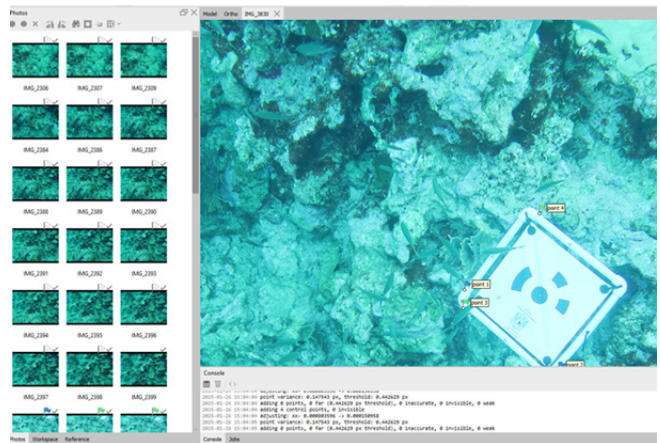


Figura 41. Vista de banderines sobre imágenes.

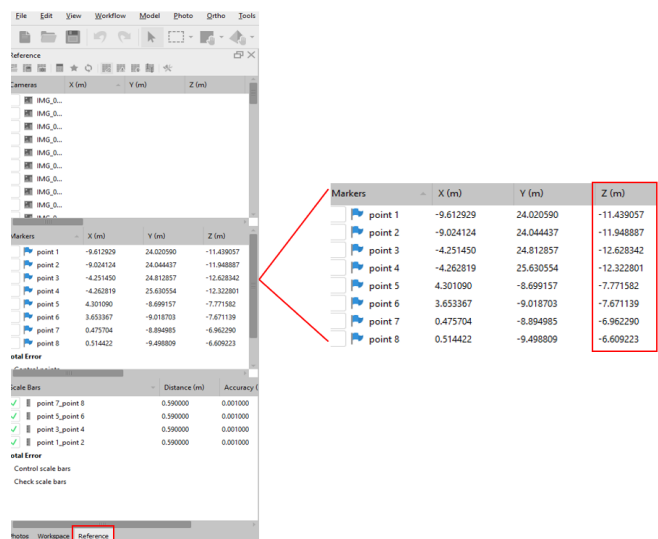


Figura 42. Marcadores y ajuste de profundidad.

En la columna de los valores del eje Z introducimos los valores recolectados en campo; para ello, basta con hacer doble clic y editar los valores que aparecen por defecto y que son precalculados por el programa.

Después de lo anterior agregaremos las escalas, para lo cual seleccionamos dos marcadores en la misma diana (nuestro punto de referencia), entre los cuales conocemos la distancia real entre ellos. En este ejercicio sabemos que las dianas miden 60 cm cada lado.

Agregamos una barra de escala en cada lado de las dianas seleccionando los marcadores correspondientes, hacemos clic derecho y seleccionamos Create Scale Bar (Agregar barra de escala, Fig. 43). Este proceso se realizará en todas las marcas de referencia considerando todos los marcadores en los cuales conozcamos la distancia entre ellos.

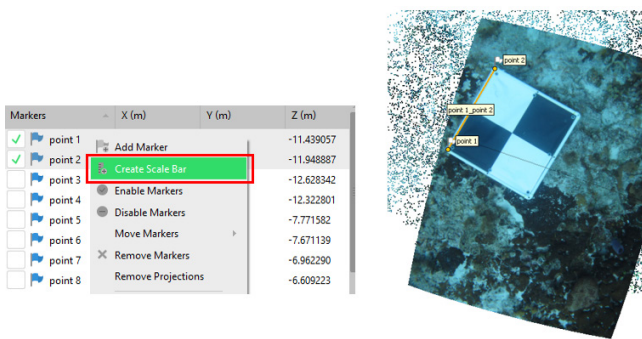


Figura 43. Agregar escala (se toman como referencia dos marcadores, en este ejercicio se crea del marcador 1 al marcador 2).

Después de agregar las escalas, introducimos el valor real de cada escala en el apartado Distancia; para ello, hacemos doble clic y se habilitará la pestaña para proceder a editar los valores (Fig. 44). Debemos tener en cuenta que se debe introducir en metros, por ello, en este caso, 60 cm es equivalente a 0.6 metros.

Scale Bars		Distance (m)	Accuracy
<input checked="" type="checkbox"/>	point 7_point 8	0.600000	0.001000
<input checked="" type="checkbox"/>	point 5_point 6	0.600000	0.001000
<input checked="" type="checkbox"/>	point 3_point 4	0.600000	0.001000
<input checked="" type="checkbox"/>	point 1_point 2	0.600000	0.001000

Figura 44. Edición valores de escala.

Después de asignar los valores a las escalas, procedemos a optimizar el modelo teniendo en cuenta los parámetros de la cámara, así como los marcadores y escalas (Fig. 45).

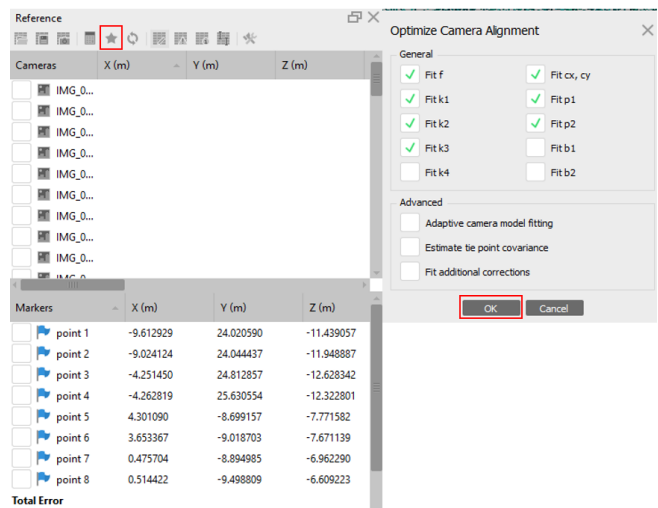


Figura 45. Optimización del modelo.

Posterior a este proceso se deberá habilitar la herramienta de medición y así poder medir distancias sobre la nube de puntos de enlace (Fig. 46), lo cual indica que el modelo está escalado.

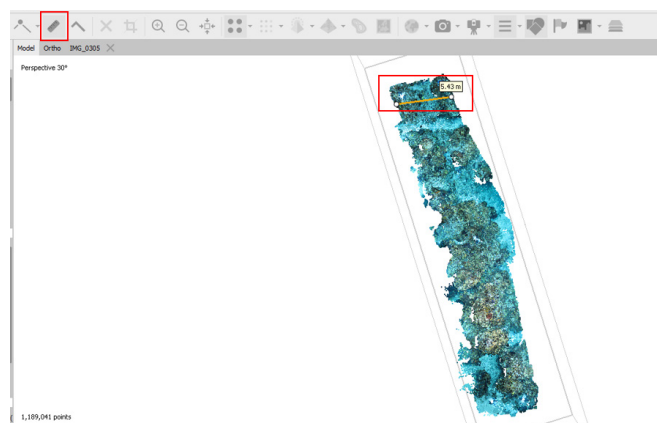


Figura 46. Selección de herramienta Medir distancia.

Para generar el modelo digital de elevación, el ortomosaico y otros productos derivados, se sigue el mismo flujo de trabajo indicado en el capítulo 3.

Sin embargo... dado que en este caso estamos trabajando con un sistema de coordenadas arbitrario, es crucial prestar atención a los parámetros de exportación. Específicamente, en la configuración del sistema de coordenadas se debe habilitar la opción Coordenadas locales (Fig. 47).

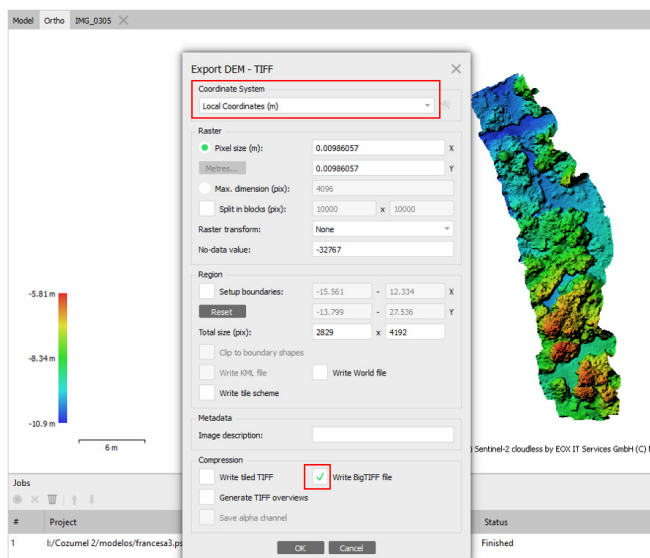


Figura 47. Exportar archivo.

Esto asegura que el producto resultante esté en unidades métricas y, por lo tanto, referenciado. Una vez exportado, el archivo se puede abrir en cualquier programa compatible con archivos georreferenciados. Si el programa indica que el archivo no tiene referencia espacial, se le puede asignar un sistema de coordenadas proyectado (el que sea más fácil utilizar), como UTM (Universal Transversal de Mercator). Esto evitará posibles problemas de interpretación al momento de hacer la digitalización (véase el siguiente capítulo).

A partir de este punto, todas las mediciones realizadas sobre el ortomosaico estarán en unida-

des métricas, solo se debe recordar que no son unidades georreferenciadas.

4.2. Construcción de bases de datos en un ambiente SIG

Si bien existen avances importantes en el análisis de los ortomosaicos para el reconocimiento de patrones mediante sistemas automatizados con inteligencia artificial, aún es necesario digitalizar manualmente las colonias para llevar a cabo su análisis. Esto lo hacemos en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Lo primero que debemos hacer en el ambiente SIG es construir nuestra base de datos o Geodatabase.

Geodatabase: Es un contenedor diseñado para almacenar y gestionar datos geoespaciales dentro del entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Desarrollada por Esri, esta estructura permite organizar diversos tipos de información geográfica, como elementos vectoriales (puntos, líneas, polígonos), datos ráster, tablas y sus relaciones. Además, permite almacenar geometría y atributos, facilita el establecimiento de reglas de integridad espacial, el manejo de grandes volúmenes de datos y soporta operaciones avanzadas de geoprocésamiento (ESRI, 2009).



En esta sección describiremos la manera de crear una base de datos en el programa ArcMap.

Lo primero que se tiene que hacer es iniciar el programa ArcMap para comenzar el proceso de gestión de datos espaciales.

Posteriormente, cargaremos una imagen de referencia que nos servirá como base para comenzar la digitalización. En este caso, utilizaremos un ortomosaico (archivo ráster). Para ello, hacemos clic en el ícono ubicado en la parte superior del menú (Fig. 48).



Figura 48. Ícono para agregar datos.

Si el ícono no aparece, accedemos mediante el menú File (Archivo) > Add Data (Fig. 49).

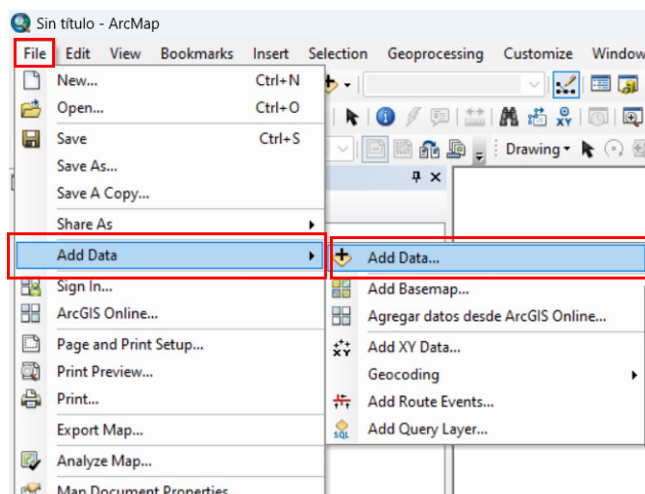


Figura 49. Ruta de ícono para agregar datos.

En la ventana de diálogo navegamos hasta el directorio o la base de datos espacial donde se encuentra almacenado el archivo ráster a utilizar. Seleccionamos el archivo y hacemos clic en Add (Agregar, Fig. 50).

Esto permitirá utilizarlo como referencia para iniciar la digitalización (construcción de un archivo vectorial) con nuevos elementos geoespaciales. En este caso estamos utilizando un archivo que tiene por nombre Chankaanab2.

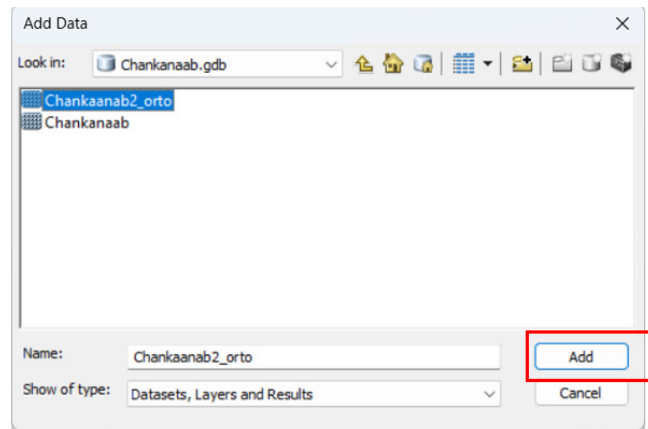


Figura 50. Selección de archivo ráster.

Es necesario revisar el sistema de coordenadas del archivo ráster, ya que el sistema de coordenadas del archivo vectorial que generaremos deberá coincidir con el del archivo ráster. Para verificar el sistema de coordenadas en el ráster, debemos hacer lo siguiente:

- 1) Hacer clic derecho sobre el archivo ráster y seleccionar Properties (Propiedades, Fig. 51).

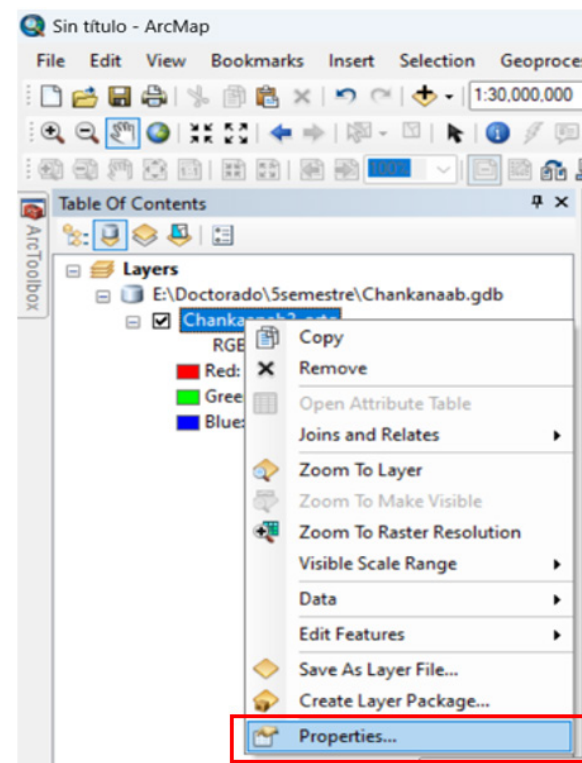


Figura 51. Habilitar ventana Propiedades en ráster.

- 2) En la nueva ventana de diálogo seleccionamos la pestaña Source (Origen) y desplazamos el cursor hasta encontrar la sección de Spatial Reference (Referencia espacial, Fig. 52).

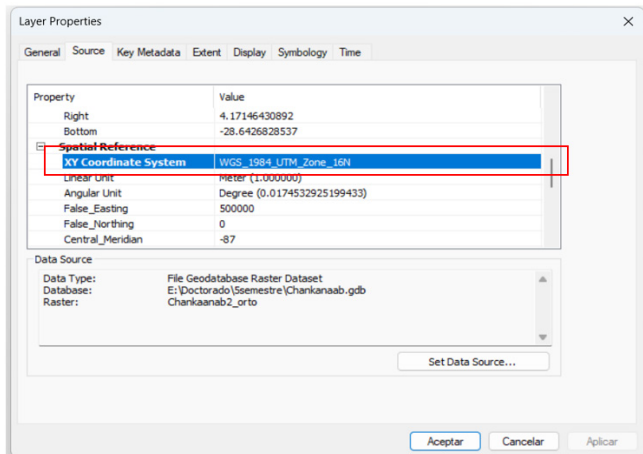


Figura 52. Vista de sistema de coordenadas.

Como podemos observar, el ráster está en coordenadas proyectadas, específicamente en el sistema UTM zona 16. Al estar tanto el archivo ráster como el vectorial en el mismo sistema de coordenadas, se podrán hacer, de manera automática, cálculos del área de los polígonos que se digitalicen, garantizando consistencia en los análisis geoespaciales.

El siguiente paso será la construcción de una base de datos espacial. Para esto, abriremos el Catalog (Catálogo) en la barra lateral de ArcMap (Fig. 53).

Si no aparece la pestaña, podemos habilitarla desde la barra Menú, seleccionando el ícono correspondiente. Navegaremos por el menú hasta encontrar la opción de habilitar la ventana Catalog (Catálogo, Fig. 54).

Una vez que hicimos clic en la función Catalog, ubicamos el directorio donde crearemos los nuevos archivos. En este caso, se creará un File Geodatabase, el cual se almacena como una carpeta en el sistema de archivos, el cual es más eficiente y no tiene límite de tamaño.

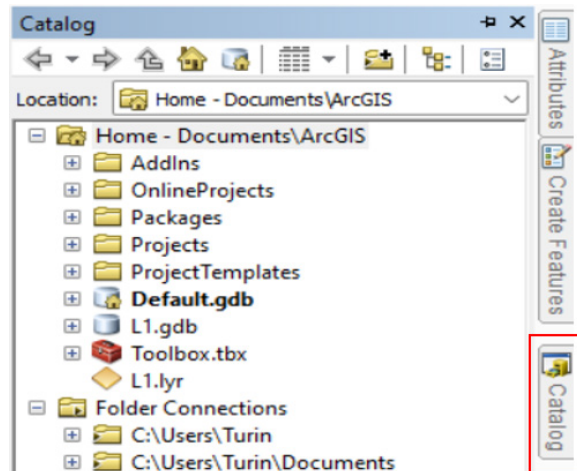


Figura 53. Ubicación de la pestaña Catálogo.

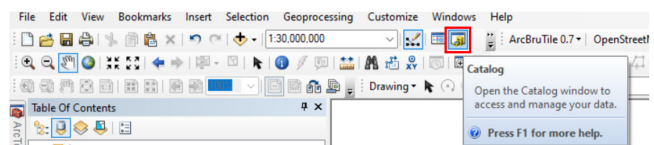


Figura 54. Acceso a Catálogo por ícono ubicado en la barra de herramientas superior.

Para crearla, hacemos clic derecho en el directorio deseado, seleccionamos New (Nuevo) y luego File Geodatabase (Archivo de Geodatabase, Fig. 55).

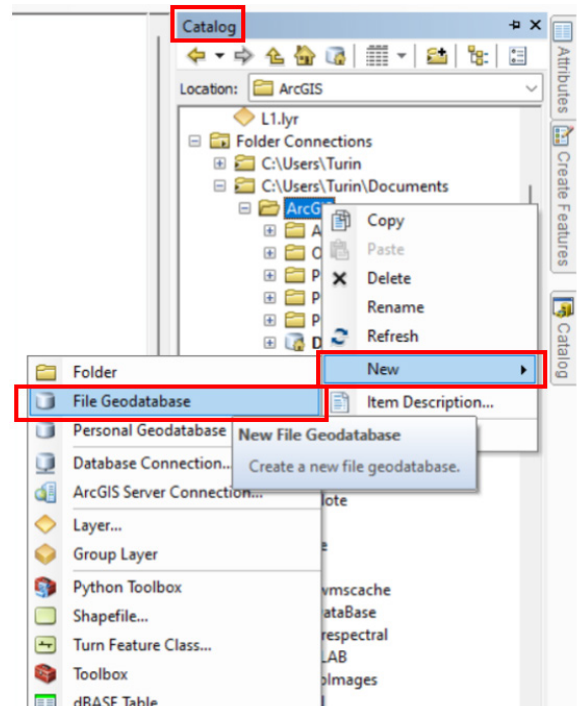


Figura 55. Creación de base de datos espacial.

Al crear el File Geodatabase (Archivo de Geodatabase), aparecerá en el directorio seleccionado y podremos cambiar el nombre simplemente haciendo clic en el nuevo archivo y presionando F2. Luego, podremos editar el nombre de la nueva base de datos y asignarle uno más adecuado para su identificación. Este paso asegura que la Geodatabase esté correctamente nombrada para su futura referencia y organización en el sistema (Fig. 56).

En la sección subsecuente se describirá la manera de agregar vectores en el archivo Geodatabase que creamos, utilizando un ortomosaico de un arrecife coralino como base.

En el siguiente QR podremos observar un video que demuestra el flujo de trabajo descrito en este capítulo.

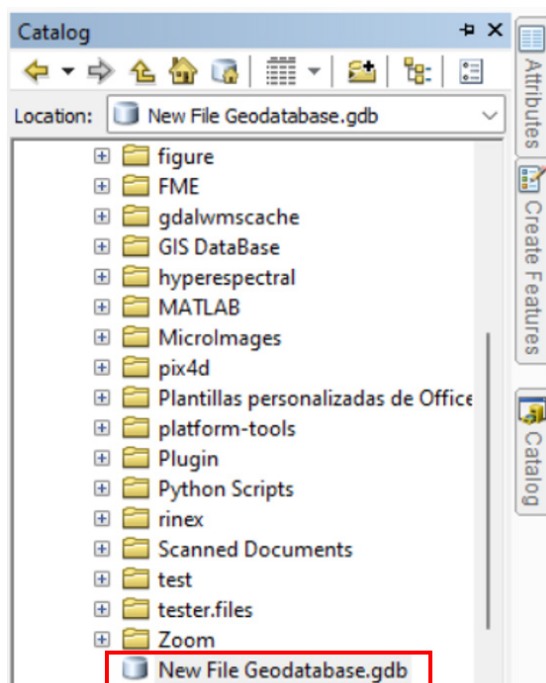


Figura 56. Base de datos espacial creada.

4.3. Edición y digitalización de vectores

Lo primero que haremos será crear el archivo vectorial en la Geodatabase. Para ello, deberemos ubicar el ícono Catalog y la base de datos que creamos. Seleccionamos la Geodatabase y hacemos clic derecho. Se desplegará una subventana, donde seleccionaremos New (Nuevo) y Feature Class (Características de clase, Fig. 57).

Automáticamente se abrirá una nueva subventana en donde definiremos el Name (Nombre) y el Alias. El nombre se asignará de acuerdo con el objeto espacial que queremos digitalizar. Por ejemplo, Corales, Esponjas, Mortalidad, Blanqueamiento, Enfermedad, etcétera. En el espacio designado para el Alias, podemos asig-

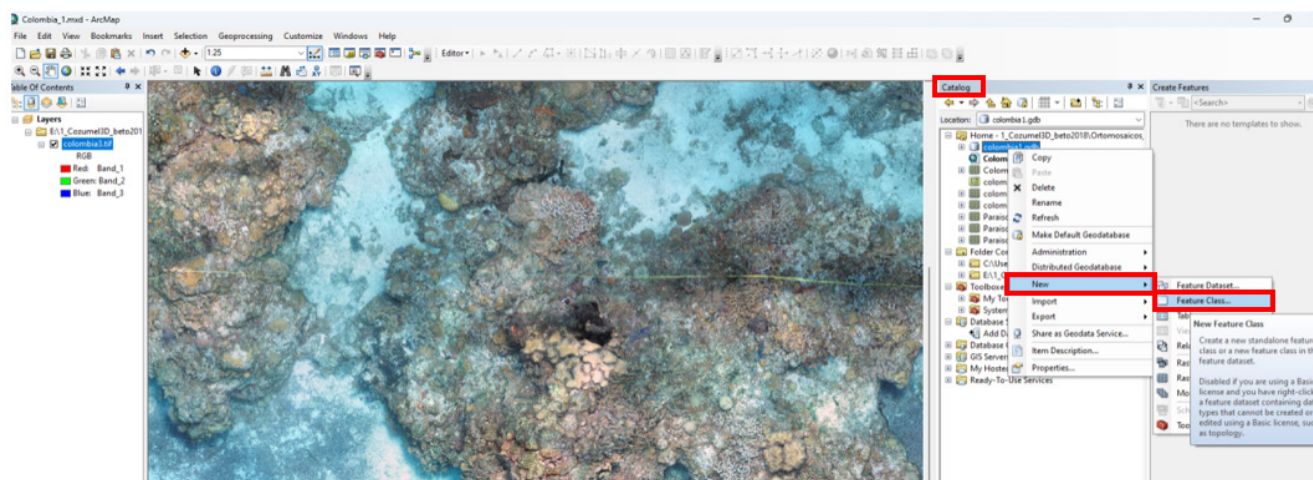


Figura 57. Creación de archivo vectorial

nar el mismo nombre que se ha dado al objeto espacial que se digitalizará, en este caso, Corales. Seleccionaremos el tipo de característica geométrica espacial que queramos representar. En este ejemplo, tiene que coincidir con lo que representaremos. Como lo que se buscamos son áreas que a la vez representen la cobertura de los corales, seleccionaremos la opción correspondiente a Polygon Features (Características de los polígonos, Fig. 58).

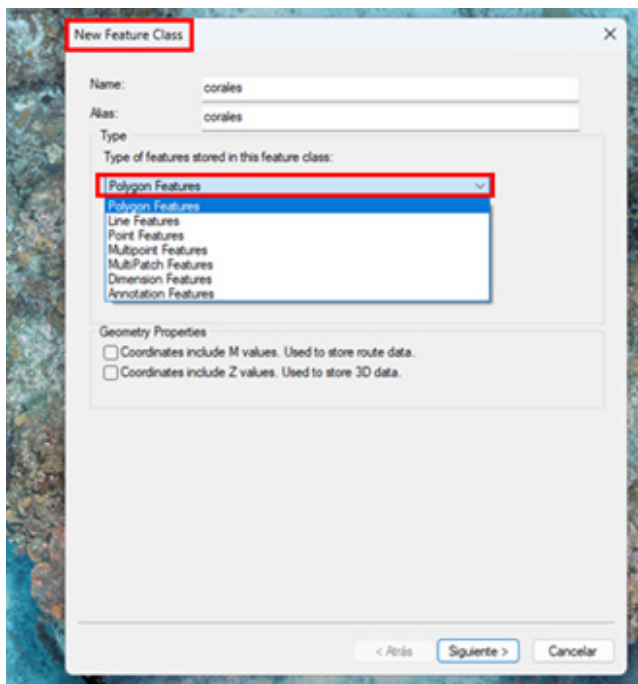


Figura 58. Elección de primitiva espacial

Avanzamos con un clic en Siguiente. Ahora, en un nuevo menú se nos pedirá asignar el sistema de coordenadas. Aunque podemos hacerlo de forma manual, se recomienda que se importe desde la capa base, que en este caso es el ortomosaico (es necesario tener ubicada la ruta donde este se encuentra guardado), tal como se describió en la sección anterior. Al finalizar este paso debemos crear, en la Geodatabase, una nueva característica que corresponde, en este caso, a corales1 (Fig. 59).

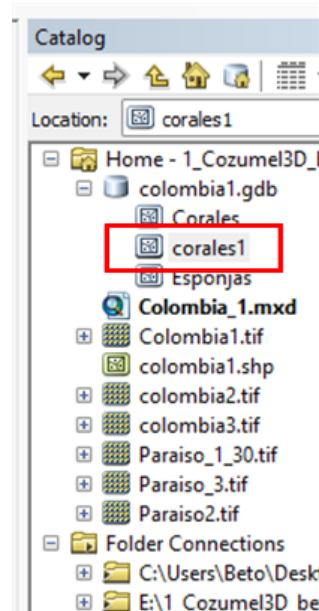


Figura 59. Archivo vectorial creado.

Este es un archivo vectorial que hasta ahora se encuentra “vacío o en blanco”. Por lo tanto, el siguiente paso será crear los objetos espaciales de interés dentro el vector.

Aquí los objetos a representar corresponden a las colonias de coral de las diferentes especies que identifiquemos en el ortomosaico. Para ello, lo que tenemos que hacer es definir *a priori* una escala sobre la cual revisaremos o “barreremos” por completo el ortomosaico.

En este caso, definimos una escala 1:5. Seleccionamos el ícono que representa una mano, con el cual podremos ir moviendo el ortomosaico en cualquier lado para identificar las colonias de coral (Fig. 60).

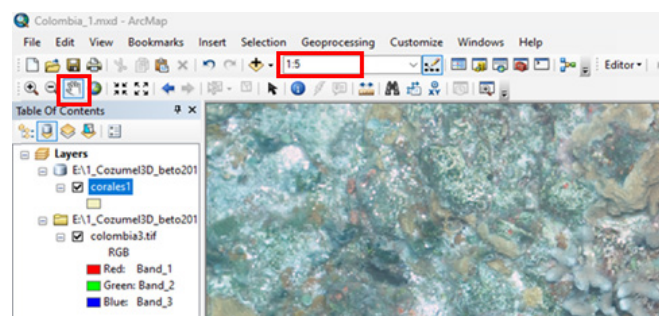


Figura 60. Elección de escala de trabajo.

Antes de comenzar la digitalización, es necesario definir campos (por ejemplo, los nombres de las especies de coral) en la tabla de atributos. Para realizarlo, hacemos clic derecho en el Shapefile (corales1) y seleccionamos Open Attribute Table (Abrir la tabla de atributos). Se abre la tabla de atributos que se creó por defecto, la cual, en este caso, contiene cuatro atributos (Fig. 61). Podemos agregar los que sean necesarios en función del análisis que queramos realizar con los datos.

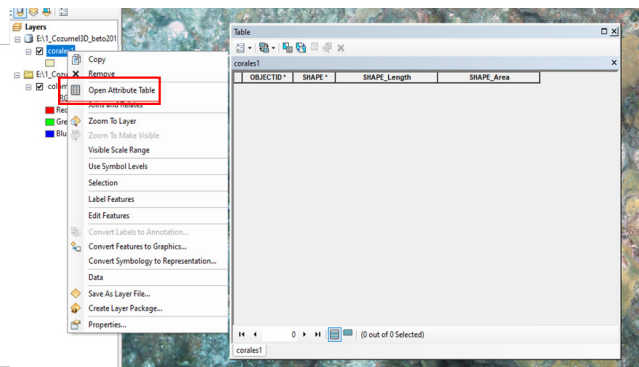


Figura 61. Vista tabla de atributos.

En este ejemplo vamos a agregar un nuevo campo, el cual será la columna que contendrá el nombre de las especies de las colonias que digitalizaremos. Le daremos el nombre abreviado Spp y definiremos cada tipo de dato, que pueden ser caracteres numéricos (enteros o decimales) o de texto (Fig. 62).

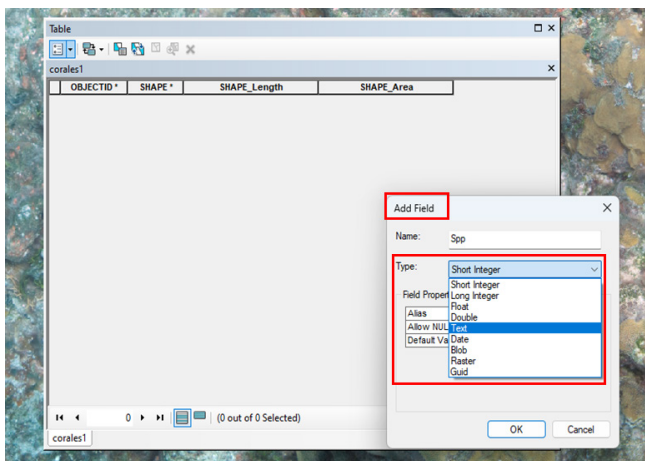


Figura 62. Elección tipo de dato para atributo Spp.

Para este ejemplo, se utilizan las guías de claves de corales del protocolo AGRRA, el cual posee una nomenclatura o abreviación de cuatro letras para las diferentes especies de corales hermatípicos del Caribe y el golfo de México. Por lo tanto, para asignar el tipo de dato a nuestra tabla de atributos, este deberá ser de texto y no numérico, de lo contrario, marcará error.

Se genera el nuevo campo, pero sigue aún vacío debido a que se ha creado la entidad (Spp), pero no hemos agregado información (Fig. 63).

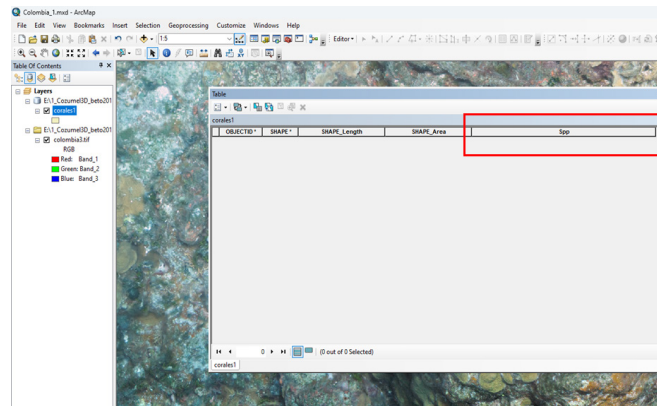


Figura 63. Atributo Spp creado.

Para comenzar con la digitalización e ir agregando información a nuestra columna Spp, iremos al ícono Editor y lo habilitaremos haciendo clic en Start Editing (Iniciar edición, Fig. 64).

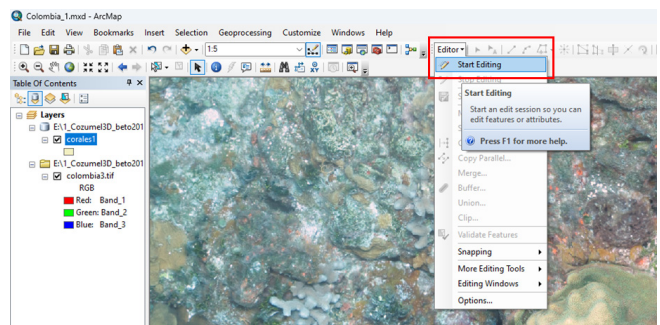


Figura 64. Comienzo de edición.

Una vez realizado lo anterior, se habilitará el siguiente grupo de íconos (Fig. 65).

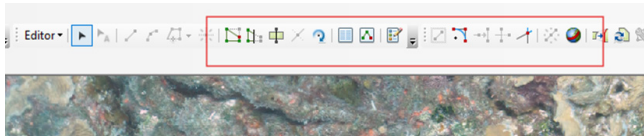


Figura 65. Íconos habilitados después de comenzar edición.

Seleccionamos el que nos interesa, que es Create Features (Crear características). Como podemos ver, se activan las características de Corales, y entonces podemos comenzar a digitalizar (Fig. 66).

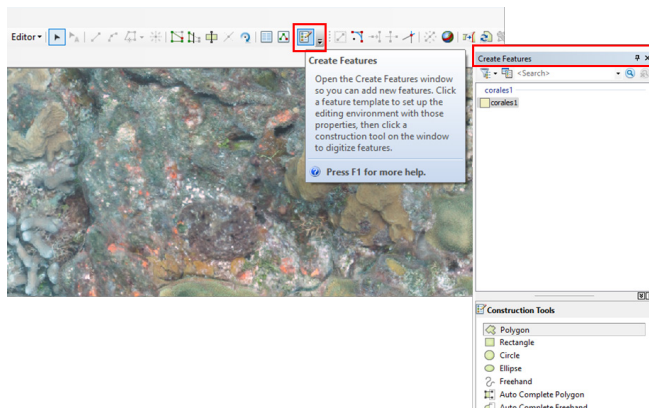


Figura 66. Comenzar edición.

En la ventana Construction Tools (Herramientas de construcción) seleccionamos Polígono y sobre el ortomosaico hacemos clic en el contorno o borde de la colonia hasta cubrir todo el contorno. Una vez que el polígono se considere completo, se da doble clic para cerrar el contorno y generar el polígono. Si por alguna razón nos equivocamos en delinear el borde, podemos iniciar de nuevo con un clic derecho y seleccionando la opción Borrar.

Al cerrar el polígono, automáticamente la ventana de atributos se abre y nos pedirá que le asignemos un valor al campo Spp, esto lo haremos de acuerdo con la nomenclatura de AGGRA o la clave de la especie de coral.

En este ejemplo, el código de la especie es PAST, que corresponde a una colonia de coral de la especie *Porites astreoides*.

Después de digitalizar esta colonia y asignar su código de especie, podemos “barrer” el ortomosaico, repitiendo el procedimiento con cada colonia de coral que encontremos (Fig. 67).

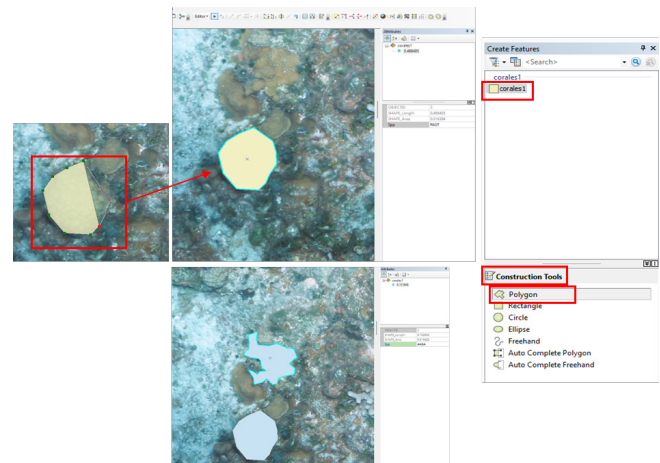


Figura 67. Barrido de ortomosaico en proceso de edición.

Como ayuda en el proceso de asignación de las especies, es posible generar una plantilla de las especies de corales que facilitará la asignación del código, lo que evitará llenar manualmente cada vez que digitalicemos una colonia de coral. Para ello, en la capa de Corales hacemos clic derecho y seleccionaremos Propiedades (Fig. 68).

Se abre la ventana de Propiedades de la capa, nos dirigimos a la pestaña Symbology (Simbología), seleccionamos Categories con Unique Values (Categorías con valores únicos) y en el campo Value Field (Valor del campo) seleccionamos Spp. Agregamos todos los valores y veremos que se van agregando las especies que hemos digitalizado. Podemos actualizar este proceso cada vez que encontremos una nueva especie (Fig. 68).

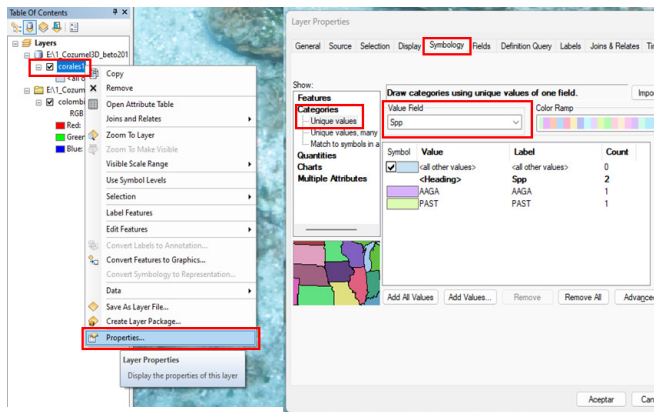


Figura 68. Asignación rampa de color por especie.

Una vez que hacemos clic en Aceptar, aparecen las especies que vamos registrando en la capa de los Corales y sobre el ortomosaico veremos de un color distintivo cada especie (Fig. 69).

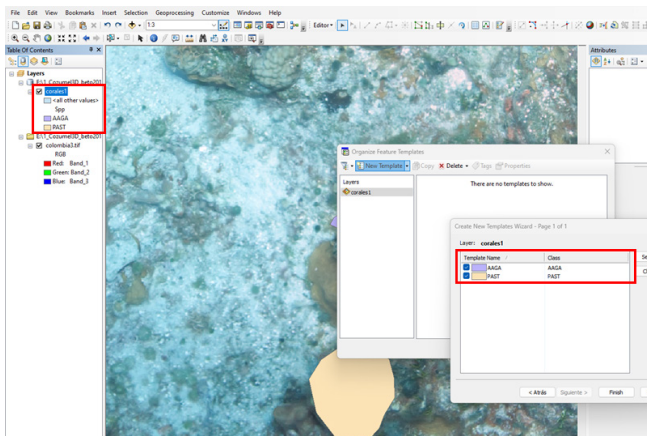


Figura 69. Creación de plantilla.

Además de crear un color para cada especie, en el apartado Crear características podemos generar otra plantilla (Create New Templates), que hereda las características dadas a las especies (color y código). Una vez que se acepta, hacemos clic en Terminar y observaremos que las categorías de las especies aparecerán en la ventana de trabajo de Create Features. Esto resulta útil, porque ya que se identificó una especie, la marcamos y seleccionamos la colonia para comenzar a digitalizar (Fig. 70).

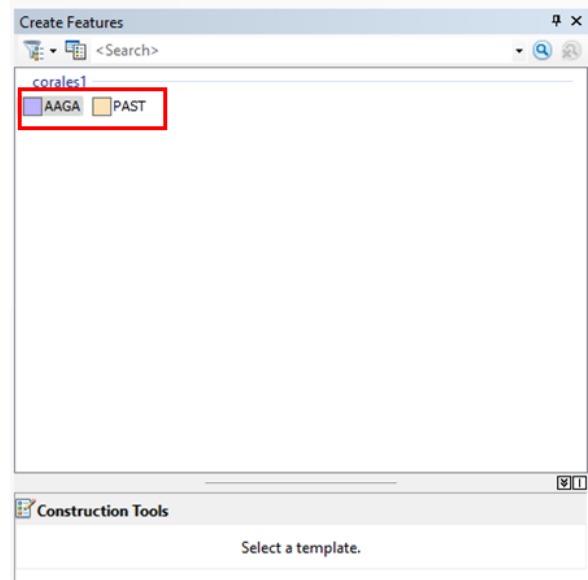


Figura 70. Ejemplo de especies en la plantilla.

Una vez que terminamos de digitalizar, cerramos el polígono y de forma automática aparecerá la característica de la colonia, en este caso, el nombre de la especie de la colonia sin necesidad de escribirlo manualmente (Fig. 71).

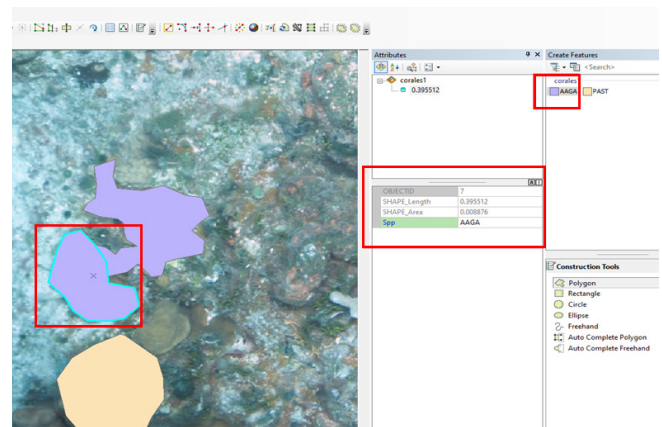


Figura 71. Asignación de atributos por plantilla.

Los cambios que hagamos en el Shapefile deben ser salvados o guardados con regularidad. Esto se hace en el menú Editor (Editor) seleccionando Save Edits (Guardar ediciones). Asimismo, cuando se termine de trabajar, se debe parar la edición seleccionando Stop Editing (Detener edición, Fig. 72).

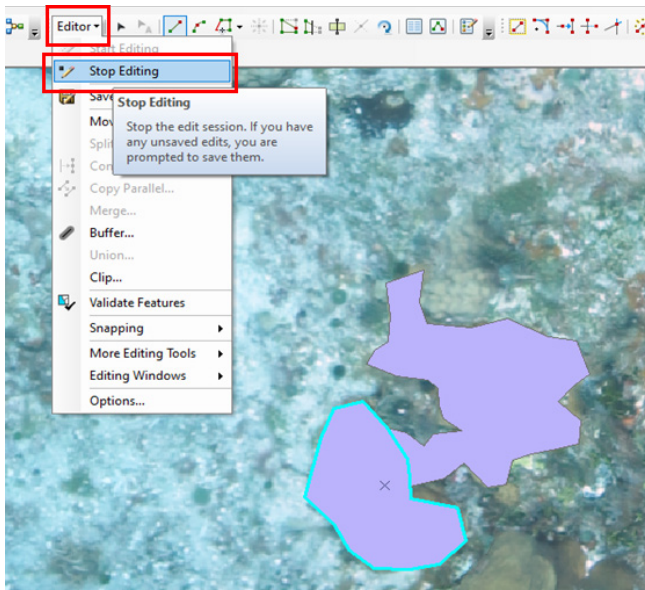


Figura 72. Parar proceso de edición.

Si abrimos la Tabla de atributos, veremos las características de las colonias que digitalizamos, por ejemplo, especie, longitud y el área (polígono). Estos datos nos servirán para el análisis posterior de las características de las comunidades coralinas.

En el siguiente QR podremos observar un video que demuestra el flujo de trabajo descrito en este capítulo.



REFERENCIAS

Referencias

- Aber, J. S., Ries, J. B. y Marzloff, I. (2010). Photogrammetry. En *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications* (pp. 23-39). <https://doi.org/10.1016/C2009-0-18493-3>
- Aston, E. A., Duce, S., Hoey, A. S. y Ferrari, R. (2022). A Protocol for Extracting Structural Metrics from 3D Reconstructions of Corals. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.854395>
- Barrera-Falcon, E., Rioja-Nieto, R., Hernández-Landa, R. C. y Torres-Irinea, E. (2021). Comparison of Standard Caribbean Coral Reef Monitoring Protocols and Underwater Digital Photogrammetry to Characterize Hard Coral Species Composition, Abundance and Cover. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.722569>
- Blyenburgh, P. van. (2006). *Avionics'06 Conference Amsterdam, The Netherlands*. Federating the International UAV Community.
- Brunier, G., Oiry, S., Gruet, Y., Dubois, S. F. y Barillé, L. (2022). Topographic Analysis of Intertidal Polychaete Reefs (*Sabellaria alveolata*) at a Very High Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 14(2), 307. <https://doi.org/10.3390/rs14020307>
- Burns, J., Delparte, D., Gates, R. y Takabayashi, M. (2015). Integrating Structure-From-Motion Photogrammetry with Geospatial Software as a Novel Technique for Quantifying 3D Ecological Characteristics of Coral Reefs. *PeerJ*, 3, e1077. <https://doi.org/10.7717/peerj.1077>
- Bythell, J., Pan, P. y Lee, J. (2001). Three-Dimensional Morphometric Measurements of Reef Corals Using Underwater Photogrammetry Techniques. *Coral Reefs*, 20, 193-199. <https://doi.org/10.1007/s003380100157>
- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Colin, P. S., Casella, M., Ferrari, M. y Firpo, M. (2016). Drones as Tools for Monitoring Beach Topography Changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Mar Lett*, 36, 151-163. <https://doi.org/10.1007/s00367-016-0435-9>
- Chikhradze, N., Henriques, R., Elashvili, M., Kirkitadze, G., Janelidze, Z., Bolashvili, N. y Lominadze, G. (2015). Close Range Photogrammetry in the Survey of the Coastal Area Geoecological Conditions (On the Example of Portugal). *Earth Sciences*, 4(5), 35. <https://doi.org/10.11648/j.earth.s.2015040501.17>
- Cuerno-Rejado, C., García-Hernández, L., Sánchez-Carmona, A., Carrio-Fernández, A., Sánchez-López, J. L. y Campoy-Cervera, P. (2016). Historical Evolution of the Unmanned Aerial Vehicles to the Present. *Dyna Ingeniería e Industria*. <http://doi.org/10.6036/7781>
- Dalamagkidis, K. (2015). Aviation History and Unmanned Flight. En K. P. Valavanis y G. J. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles* (pp. 57-81). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_93

- Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P. y Piegl, L. A. (2012). *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*. Springer.
- Delacourt, C., Allemand, P., Jaud, M., Grandjean, P., Deschamps, A., Ammann, J., Cuq, V. y Suanez, S. (2009). DRELIO: An Unmanned Helicopter for Imaging Coastal Areas. *Journal of Coastal Research*, 1489–1493. <http://www.jstor.org/stable/25738037>
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Tesis de doctorado, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. ETH Zürich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD_Theses/105.pdf
- Félix, J. D. L. (2015). *La aerodinámica y la voluntad de volar. Cultura, ciencia y tecnología*. ASDOPEN-UNMSM.
- Göktoğan, A. H. y Sukkarieh, S. (2015). Autonomous Remote Sensing of Invasive Species from Robotic Aircraft. En K. Valavanis y G. Vachtsevanos (Eds.), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_72
- Grubestic, T. H., Nelson, J. R. y Wei, R. (2024). UAV Operating Environments. En *UAVs for Spatial Modelling and Urban Informatics* (pp. 17–32). Springer International Publishing.
- Hernández-Landa, R. C., Barrera-Falcon, E. y Rioja-Nieto, R. (2020). Size-Frequency Distribution of Coral Assemblages in Insular Shallow Reefs of the Mexican Caribbean Using Underwater Photogrammetry. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.8957>
- Lange, I. D. y Perry, C. T. (2020). A Quick, Easy and Non-Invasive Method to Quantify Coral Growth Rates Using Photogrammetry and 3D Model Comparisons. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 714–726. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13388>
- Linder, W. (2009). *Digital Photogrammetry: A Practical Course*. Springer.
- Mijakovska, S. y Popovski, F. (2017). Basic Steps and Techniques Using in Obtaining the Structure From Motion. *Temel Journal*, 1, 59–62.
- Parsons, M., Bratanov, D., Gaston, K. J. y Gonzalez, F. (2018). UAVs, Hyperspectral Remote Sensing, and Machine Learning Revolutionizing Reef Monitoring. *Sensors*, 18(7), 2026. <https://doi.org/10.3390/s18072026>
- Pereira, E., Bencatel, R., Correia, J., Félix, L., Gonçalves, G., Morgado, J. y Sousa, J. (2009). Unmanned Air Vehicles for Coastal and Environmental Research. *Journal of Coastal Research*, 1557–1561. <http://www.jstor.org/stable/25738051>
- Przybilla, H. J. y Wester-Ebbinghaus, W. (1979). Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 47, 137–142.
- Quamar, M. M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M. y Ferik, S. E. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology. A Review. *Remote Sensing*, 15(20), 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>
- Seifer, M. J. (1996). *Wizard: The Life and Times of Nikola Tesla: Biography of a Genius*. Citadel Press.

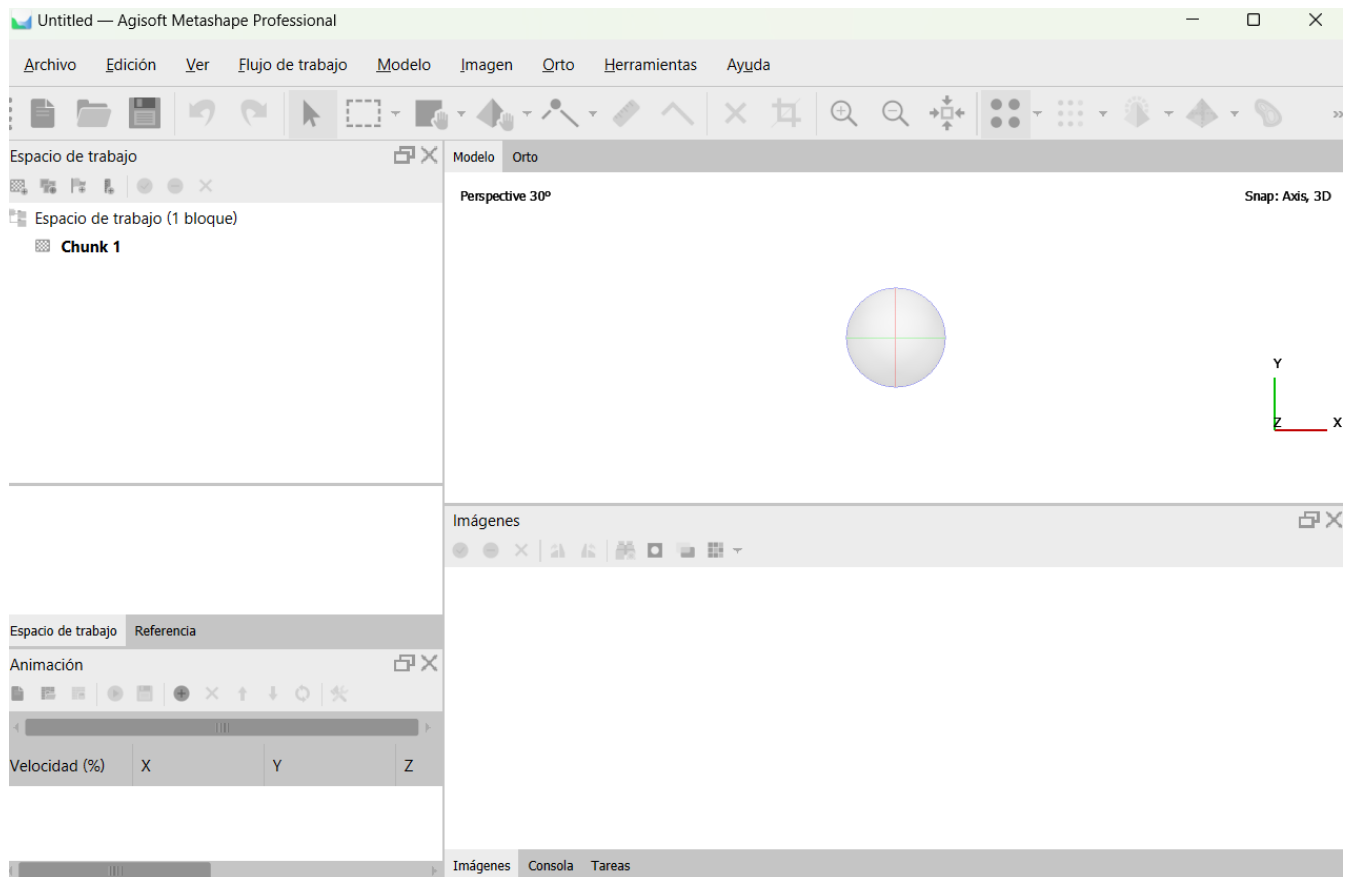
- Valavanis, K. P. y Vachtsevanos G. J. (2015). Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer Netherlands. DOI: [10.1007/978-90-481-9707-1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1)
- Valavanis, K., Vachtsevanos y Antsaklis, P. J. (2014). Technology and Autonomous Mechanisms in the Mediterranean: From Ancient Greece to Byzantium [Historical Perspectives]. *IEEE Control Systems Magazine*, 34, 110-119. DOI: [10.1109/MCS.2014.2359589](https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2359589)
- Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M. F., Belluscio, A. y Ardizzzone, G. (2018). Mapping and Classification of Ecologically Sensitive Marine Habitats Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery and Object-Based Image Analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/rs10091331>
- Vousdoukas, M. I., Pennucci, G., Holman, R. A. y Conley, D. C. (2011). A Semi Automatic Technique for Rapid Environmental Assessment in the Coastal Zone Using Small Unmanned Aerial Vehicles (SUAV). *Journal of Coastal Research*, 1755-1759. <http://www.jstor.org/stable/26482477>
- Wester-Ebbinghaus, W. (1980). Aerial Photography by Radio Controlled Model Helicopter. *The Photogrammetric Record*, 10(55), 85-92. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1980.tb00006.x>
- Wulandari, L. (2022). A Comprehensive Approach into Stereoscopic Vision. *Malang Neurology Journal*, 8, 53-57. DOI: [10.21776/ub.mnj.2022.008.01.11](https://doi.org/10.21776/ub.mnj.2022.008.01.11)
- Zaloga, S. J. y Palmer, I. (2008). *Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare, 1917-2007*. Osprey Publishing.

ANEXOS

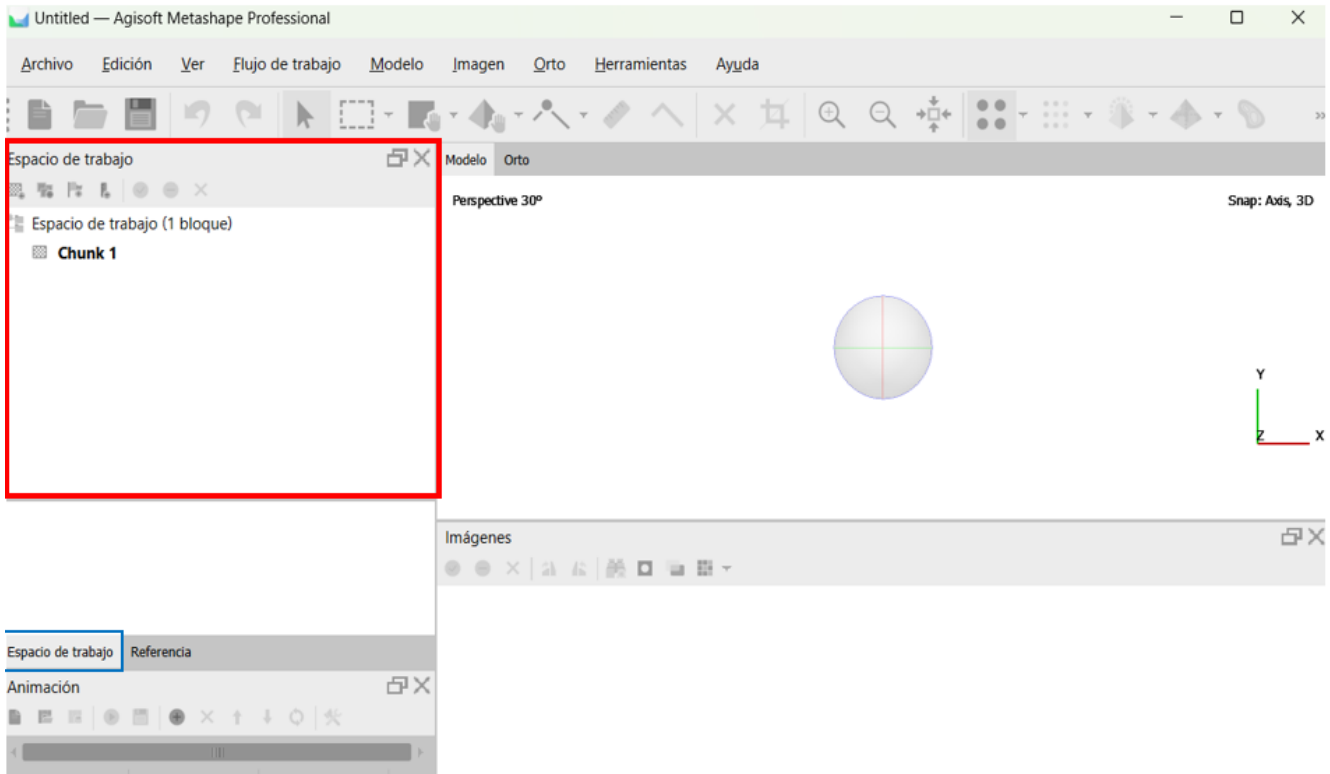
Anexo 1

Descripción del panel e íconos de Agisoft Metashape

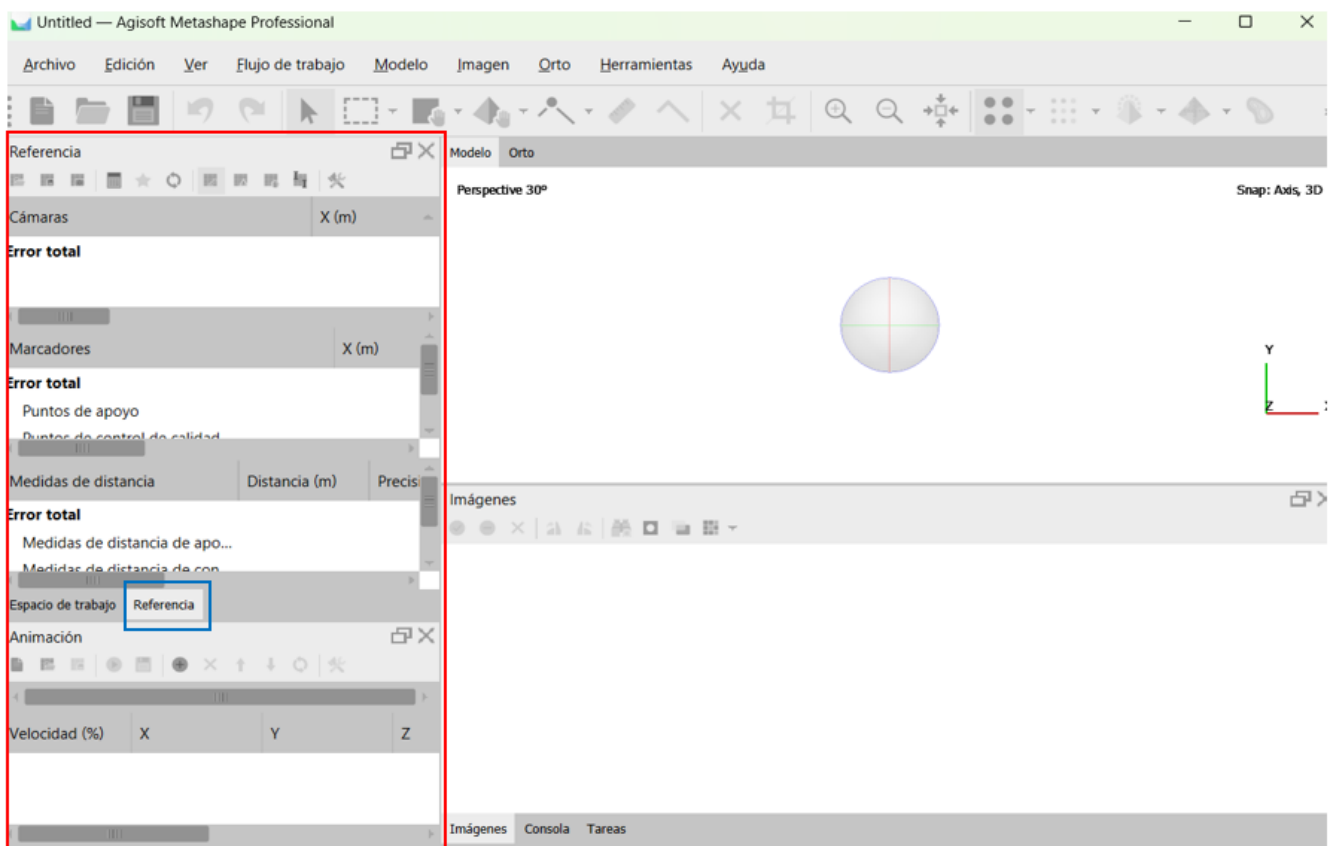
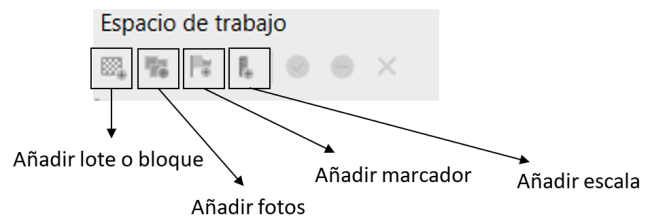
La interfaz de Metashape es parecida a la paquetería Office, por ello su ejecución (para realizar alguna actividad o proceso) se puede hacer por dos vías, ya sea utilizando íconos o buscando las herramientas directamente en el menú superior.



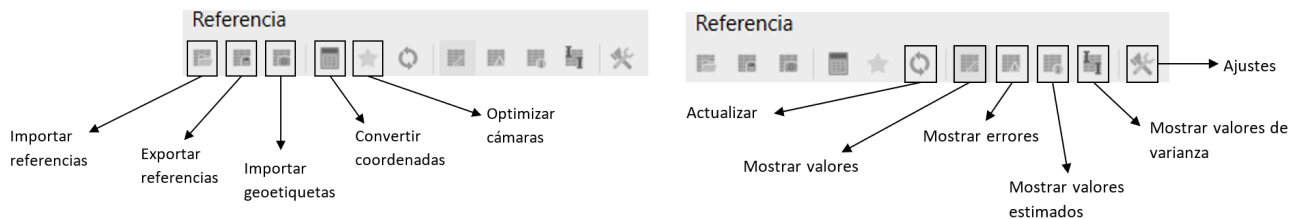
La interfaz se divide principalmente en dos apartados: espacio de trabajo y referencia. Para cambiar de un panel a otro basta con hacer clic en la pestaña correspondiente (recuadro azul).



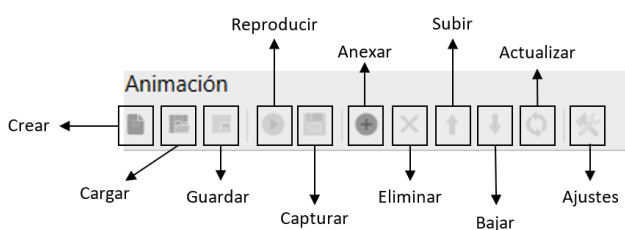
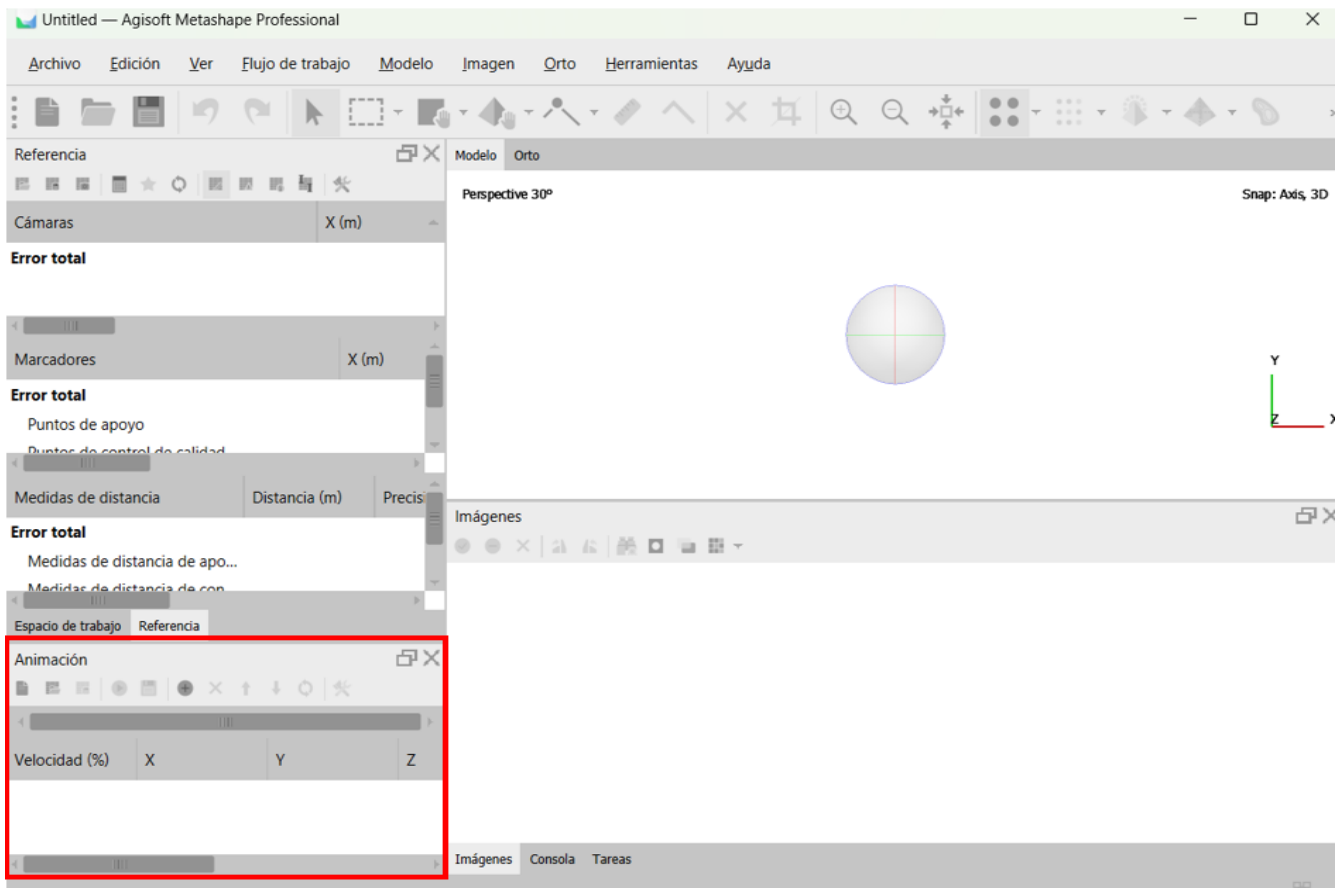
En este apartado se organizan los datos en *chunks* o bloques, y a cada conjunto de imágenes se le conoce como lote. En los íconos superiores podemos agregar imágenes o lotes.



En la pestaña ámaras se ordenarán todos las fotos o imágenes después de agregarlas y alinearlas; en marcadores aparecerán los puntos que se agregaron como marcadores, ya sea de posición o alineación. En Medidas de distancia aparecerán las escalas en caso de agregar en el proyecto. En este apartado se agregan los nuevos valores de distancia en las escalas o posición en los marcadores para una posterior optimización, la cual se aplica seleccionando los íconos superiores.



En la parte inferior hay un menú para exportar los modelos en video, para ello, nos auxiliamos de los íconos.



En el panel superior aparecen los siguientes íconos, los cuales sirven para manipular los proyectos.

