

# Manual para evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de RPAs en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba - Abiseo



Canada



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



FUNDACION  
**Amazonia**  
V I V A

# Manual para evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de RPAs en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo

Canada 



FUNDACIÓN  
*Amazonia*  
V I V A

# **Manual para evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de RPAs en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo**

Ximena Tagle Casapía  
Silvana Di Liberto Porles  
Lourdes Falen Horna  
Ander Dávila Díaz  
Evelyn Roque Calzada

Primera edición, Octubre de 2021

© Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP)  
Av. Abelardo Quiñones Km 2.5  
Iquitos - Perú  
[www.iiap.gob.pe](http://www.iiap.gob.pe)

ISBN PDF: 978-612-4372-37-7

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-12042

**Edición:** Ximena Tagle

**Diseño:** Lourdes Falen

**Fotografía:** Evelyn Roque / Silvana Di Liberto

**Revisión científica:** David Urquiza Muñoz (Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Facultad de Ciencias Forestales) y Manon Constanty (Carbon & Ops Manager PUR ProjeT)

Manual elaborado en el marco del convenio de financiamiento 002, “Fortalecimiento de capacidades de actores locales para el Desarrollo de Investigaciones colaborativas para la restauración de paisajes degradados en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo”.

# Contenido

- Contenido..... 3
- Presentación ..... 5
- Glosario ..... 6
- El Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo ..... 7
  - Modelo 1: Lindero ..... 8
  - Modelo 2: Agroforestal ..... 8
  - Modelo 3: Macizo ..... 9
  - Modelo 4: Agrosilvopastoril ..... 9
- Consideraciones para volar RPAs ..... 10
  - Consideraciones al planear la colecta de datos ..... 10
  - Consideraciones al planear la misión ..... 15
  - Consideraciones previas al vuelo ..... 19
  - Consideraciones durante el vuelo ..... 25
- Introducción al uso del RPA DJI Phantom 4 PRO ..... 27
  - Especificaciones técnicas ..... 27
  - Partes del RPA DJI Phantom 4 Pro: ..... 27
  - Ensamblaje..... 28
  - Calibración..... 31
- Colecta de datos ..... 32
  - Planeamiento de misiones ..... 32
  - Descarga de datos ..... 37
  - Verificación de datos colectados ..... 39
- Procesamiento de datos ..... 42

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Análisis de calidad de las imágenes.....                                        | 43 |
| Generación de ortomosaicos .....                                                | 47 |
| Edición de Nube de Puntos .....                                                 | 51 |
| Generación de Modelos de Altura de Copas (CHMs) .....                           | 57 |
| Estimaciones de Biomasa aérea .....                                             | 58 |
| Detección de áreas para restauración.....                                       | 64 |
| Perspectivas del uso de RPAs para la evaluación de plantaciones forestales..... | 66 |
| Costos .....                                                                    | 66 |
| Ventajas.....                                                                   | 68 |
| Limitaciones .....                                                              | 68 |
| Comparación de la fotogrametría con cámara RGB vs. Sensores LIDAR .....         | 68 |
| Conclusiones y Recomendaciones .....                                            | 72 |
| Anexos .....                                                                    | 73 |
| Referencias bibliográficas.....                                                 | 76 |

# Presentación

El Departamento de Recursos Naturales de Canadá (NRCan), en el marco de la Iniciativa INVESTIGACIÓN A PEQUEÑA ESCALA: RESTAURacción, que tiene como objetivo el desarrollar planes de implementación para la Restauración de Bosques y Paisajes (FLR) en paisajes degradados y post-incendios en el ámbito de los bosques modelos; ha firmado un convenio con la FUNDACION AMAZONIA VIVA para la ejecución del proyecto “FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES DE ACTORES LOCALES PARA EL DESARROLLO DE INVESTIGACIONES COLABORATIVAS PARA LA RESTAURACIÓN DE PAISAJES DEGRADADOS EN EL ÁMBITO DEL BOSQUE MODELO RÍO HUAYABAMABA – ABISEO”, el cual tiene una temporalidad de ejecución hasta el 31 de marzo del 2021.

Este proyecto contribuirá a la generación y fortalecimiento de capacidades en organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, para el desarrollo de investigaciones colaborativas con actores locales (comunidades, asociaciones, entre otros) directamente relacionados al uso y manejo del territorio en el ámbito de influencia del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo (BMRHA), el cual abarca ecosistemas frágiles como las yungas, páramos y áreas de bosques montanos en Los Andes y Amazonía Peruana; áreas que además hacen parte de la Reserva de Biosfera Gran Pajatén. El proyecto permitirá generar información básica y fortalecer el conocimiento local, generando condiciones para el desarrollo de investigaciones colaborativas, orientadas a la validación e implementación de acciones de restauración de paisajes y la mejora del nivel de respuesta en la prevención, control y monitoreo de quemas e incendios que afecten estas áreas.

Una de las herramientas que cada vez va ganando mayor protagonismo en el ámbito forestal, es el uso de sensores remotos; y con el avance tecnológico se fue introduciendo a esta rama el uso de RPAs (Remotely Piloted Aircraft Systems) para obtener fotografías de alta resolución, abriendo así una gama de posibilidades en la evaluación y monitoreo del recurso forestal con fines de investigación o manejo. Es por ello que se ha incorporado el uso de RPAs para la consecución de los objetivos del proyecto en cuanto a la investigación participativa y las acciones presentes y futuras de manejo y conservación en el ámbito del BMRHA. En ese sentido a continuación se presenta el Manual para evaluación de plantaciones forestales mediante el uso de RPAs, donde se enumeran acciones sugeridas para cada etapa de la evaluación (Planificación, evaluación en campo y procesamiento).

Gisella Gutiérrez  
Directora Ejecutiva FUNDAVI

# Glosario

CHM: Canopy Height Model.

DEM: Digital Elevation Model o Modelo de elevación digital.

DSM: Digital Surface Model o Modelo Digital de Superficie.

DTM: Digital Terrain Model o Modelo Digital del Terreno.

DGAC: Dirección General de Aeronáutica Civil.

Fotogrametría: Ciencia que estudia la medición de objetos de manera confiable mediante el uso y procesamiento de imágenes.

Gimbal: Plataforma motorizada que funciona como estabilizador de cámaras, smartphones u otros objetos.

GPS: Global Positioning System o Sistema De Posicionamiento Global.

IDW: Método Inverse Distance Weighting.

Mosaico: Conjunto de imágenes aéreas acopladas en una sola imagen.

Ortomosaico: Imagen fotogramétricamente ortorrectificada, organizada como mosaico a partir de una colección de imágenes, en las que la distorsión geométrica se ha corregido (se reduce la distorsión del relieve y de los objetos presentes).

RGB: combinación de bandas/sensores Red (Rojo), Green (Verde), y Blue (Azul).

RPAS: Remotely Piloted Aircraft System o Sistema de Aeronave pilotada a distancia, conjunto de elementos configurables integrado por una aeronave pilotada a distancia, sus estaciones de piloto remoto conexas, los necesarios enlaces de mando y control y cualquier otro elemento de sistema que pueda requerirse en cualquier punto durante la operación de vuelo (DGAC, 2015).

RPA: Remotely Piloted Aircraft o Aeronave pilotada a distancia, generalmente conocido como “drone”, es una aeronave pilotada por un “piloto remoto” quien monitorea la aeronave en todo momento y tiene responsabilidad directa de la conducción segura de la aeronave durante todo su vuelo (DGAC, 2015).

RTK: Real Time Kinematic o GPS en tiempo real, consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 ó 2 cm + 1ppm) (González, 2015).

# El Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo

El presente manual se ha enfocado en la evaluación de las plantaciones instaladas en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo, en la región San Martín en el marco del “Proyecto de reforestación y captura de carbono Jubilación Segura”. Jubilación Segura es un proyecto de reforestación agrupado iniciado por PUR Projet, una organización francesa especializada en el desarrollo de la silvicultura comunitaria y proyecto de reforestación con la gestión del carbono y 1) la Fundación Amazonía Viva (Juanjui, San Martín), 2) la Cooperativa Oro Verde (Lamas San Martín), 3) la Cooperativa Acopagro (Juanjui, San Martín), 4) la Cooperativa la Flor de Café (Rodríguez de Mendoza, Amazonas), 5) la Asociación Aprocoyce (Rodríguez de Mendoza, Amazonas).

El BMRHA se ubica en la zona centro – sur de la región San Martín, en la provincia de Mariscal Cáceres, capital Juanjuí, precisamente en la cuenca alta y media del Río Huayabamba. El Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo presenta ecosistemas frágiles como las yungas, páramos y áreas de bosques montanos en los Andes y Amazonía Peruana; áreas que además hacen parte de la Reserva de Biosfera Gran Pajatén. Se caracteriza por una fisiografía irregular desde zonas inundables, terrazas escalonadas y cumbres de poca elevación que da como resultado la presencia de condiciones climáticas heterogéneas que varían principalmente con la altitud en un rango de elevación entre los 350 y los 4000 m s. n. m. en época del año. En los sectores bajos y lomadas, el clima es seco y cálido, y en los sectores de colinas altas el clima es ligeramente húmedo y semicálido (Carpio *et al.*, 2017).

Desde el año 2008 se han instalado plantaciones forestales con el propósito de reforestar zonas degradadas y de baja productividad, desarrollando modelos agroforestales en cultivos de cacao / café, en asociación con agricultores. Los tipos de modelos instalados bajo el Proyecto Jubilación Segura son Lindero (Fig. 1), Agroforestal (Fig. 2), Macizo (Fig. 3) y Agrosilvopastoril (Fig. 4); y las especies empleadas en estos modelos se detallan a continuación:

- Especies de lento crecimiento como caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro nativo (*Cedrela odorata*), copaiba (*Copaifera officinalis*), huayruro (*Ormosia coccinea*), estoraque (*Myroxylum balsamun*), ishpingo (*Amburana cearencis*), moena (*Ocotea costulata*), tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) o shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*).

- Especies de mediano crecimiento como teca (*Tectona grandis*), sangre de grado (*Croton lechleri*), paliperro (*Vitex pseudolea*), laurel (*Cordia alliodora*) o marupa (*Simarouba amara*).
- Especies de rápido crecimiento como bolaina (*Guazuma crinita*), capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y pino chuncho (*Schizolobium amazonicum*).

## Modelo 1: Lindero

- Distanciamiento de siembra (Fig. 1): 3 x 3 m
- 120 árboles/ha
- 23.8 % de parcelas

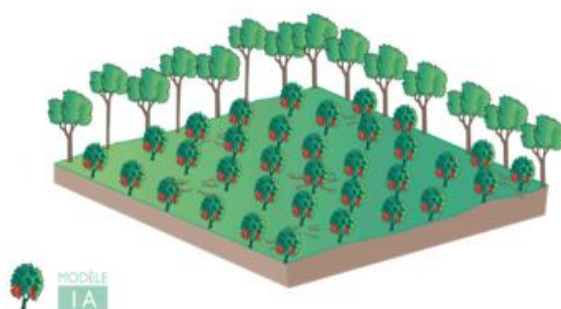


**Figura 1:** Tipo de modelo Lindero instalado bajo el Proyecto Jubilación Segura.

**Fuente:** PUR Projet (2017).

## Modelo 2: Agroforestal

- Distanciamiento de siembra (Fig. 2): 12 x 12 m
- 69 árboles/ha
- 14.7 % de las parcelas



**Figura 2:** Tipo de modelo Agroforestal instalado bajo el Proyecto Jubilación Segura.

**Fuente:** PUR Projet (2017).

## Modelo 3: Macizo

- Distanciamiento de siembra (Fig. 3): 3 x 3 m
- 1111 árboles/ha
- 61.2 % de las parcelas

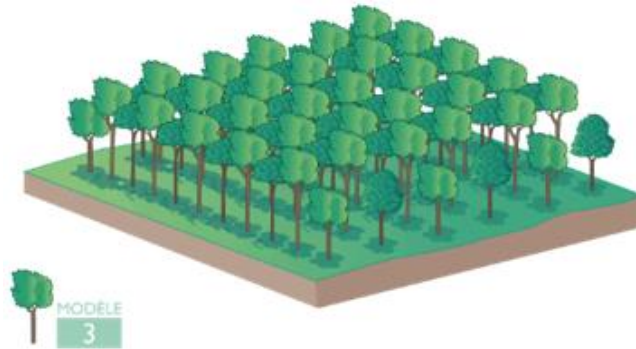


**Figura 3:** Tipo de modelo Macizo instalado bajo el Proyecto Jubilación Segura.

**Fuente:** PUR Projet (2017).

## Modelo 4: Agrosilvopastoril

- Distanciamiento de siembra (Fig. 4): 24 x 24 m
- 17 árboles/ha
- 0.2 % de las parcelas

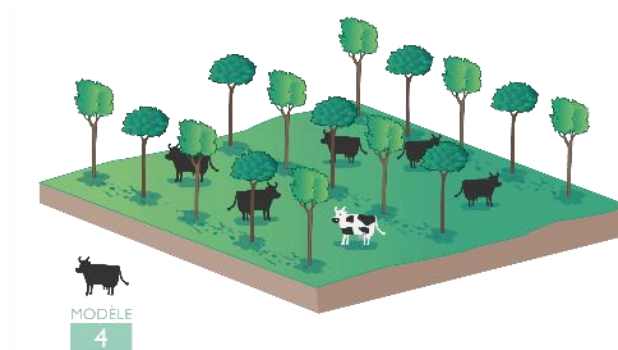


**Figura 4:** Tipo de modelo Agrosilvopastoril instalado bajo el Proyecto Jubilación Segura.

**Fuente:** PUR Projet (2017).

# Consideraciones para volar RPAs

Esta sección está basada en el Protocolo para Sobrevuelos con RPAs Phantom 4 Pro y Phantom 4 RTK (Tagle *et al.*, 2021) y en las experiencias recopiladas durante el desarrollo del proyecto “Fortalecimiento de capacidades de actores locales para el Desarrollo de Investigaciones colaborativas para la restauración de paisajes degradados en el ámbito del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo”.

## Consideraciones al planear la colecta de datos

### Materiales y equipos recomendados para trabajos de fotogrametría

Si bien en la actualidad es más sencillo adquirir un RPA, para generar un mosaico de las plantaciones evaluadas en donde se pueda tener dimensiones o áreas certeras, es importante tanto la captura de imágenes como el procesamiento posterior. Para ello, es necesario contar por lo menos con los siguientes materiales y equipos:

- **RPA** DJI Phantom 4 Pro.
- **Tablet** Sistema operativo Android (usar la app Ctrl+DJI) o Ipad de 7” con aplicaciones Pix4D capture y DJI GO 4 instalado (para el DJI Phantom 4 Pro).
- **Laptop** de 2,6 GHz, cuatro núcleos con 8 GB de RAM con software Agisoft Metashape versión Demo instalado.
- **PC** de 3,5 GHz, 14 núcleos con 128 Gb de RAM y NVIDIA Quadro, Unidad de procesamiento de gráficos (GPU) M4000 con software Pix4DMapper instalado (para más detalles sobre los requisitos mínimos del sistema, ver anexo 1).
- 4 **Targets** plastificados de control.
- Receptor **GPS**.
- **Binoculares**
- **Check Lists e Instructivo de vuelo** impresos, en cuaderno de notas o en la Tablet.



**Nota:** por más que uno realice sobrevuelos constantes, es importante contar con un check list de materiales y equipos para revisar **antes de ir al campo y para el mantenimiento de equipos** (ver anexo 2), así como siempre revisar el **instructivos de vuelo** (ver anexo 5) para evitar omitir detalles que pueden retrasar o perjudicar las actividades.

## Normatividad

Es importante estar al tanto de la legislación vigente para evitar sanciones o problemas por volar en zonas no permitidas. En este caso, es recomendable seguir los lineamientos de la Ley de Aeronáutica Civil del Perú – Ley N°27261 y su Reglamento, la Ley que regula el uso y las operaciones de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) - Ley N°30740, así como el Documento 10019 AN/507 de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) “Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems” (2015), para realizar trabajos con RPAs.

Es necesario que el **equipo esté registrado** en la DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil) y la persona a operar el RPAs cuente con una **licencia de piloto** de RPAs vigente. Asimismo, se debe evitar volar en zonas restringidas, zonas prohibidas o zonas peligrosas (DGAC, 2015).

La NTC-001-2015 “Requisitos para las Operaciones de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia”, establece que ninguna persona podrá operar un RPAS a menos de 4 km de un aeródromo, excepto para fines de prevención de impactos con aves o sobre vías de comunicación, incluyendo toda infraestructura vial (viaductos, carreteras, caminos, senderos, puentes), infraestructura de transmisión eléctrica y de telecomunicaciones (postes, torres, cables y antenas), cursos de agua navegables y ductos para transporte de hidrocarburos. Sin perjuicio de ello, los RPA podrán volar próximos a estas vías, manteniendo una separación horizontal mayor de 30 metros, del borde o extremo de las mismas.

Además, es necesario estar pendiente de los **NOTAMs (Notice to Airmen)**, información para aviadores publicada en medios de comunicación que contiene información relativa al establecimiento, condición o modificación de cualquier instalación aeronáutica, servicio, procedimiento o riesgo aeronáutico de carácter temporal y de corta duración cuyo conocimiento oportuno es indispensable para el personal afectado por las operaciones de vuelo (DGAC, 2015).



**Nota:** es necesario recalcar que antes de planificar sobrevuelos en determinada localidad, es importante verificar que se cuenten con los permisos requeridos para realizar trabajos en la zona, principalmente dialogar y recibir la aprobación de la comunidad/centro poblado, así como de instituciones del Estado como el SERNANP, SERFOR y Gobierno Regional.

### **Precisión geométrica (márgenes de error de ubicación en caso de generación de ortomosaicos)**

Según los objetivos del trabajo, en algunos casos, el producto a generar es un ortomosaico de la zona, el cual permitirá obtener medidas de distancias o áreas. Las técnicas de fotogrametría permiten la generación de un mosaico a partir de imágenes de RPAs (más información en el apartado “Procesamiento de datos”), el cual tendrá una precisión geométrica variable, según la calidad de los sistemas de navegación con que se disponga.

Existen RPAs con sistemas de navegación más preciso, como aquellos con RTKs (Real Time Kinematic) incorporados (Stott *et al.*, 2020), los cuales generalmente son más costosos. Un ejemplo es el caso del Phantom 4 RTK que puede costar hasta cinco veces más que el Phantom 4 Pro pero que permite obtener información georeferenciada más precisa sin necesidad de colocar Puntos de control terrestre.

La manera menos costosa de reducir errores geométricos es mediante el uso de Puntos de Control Terrestre o GCPs (Colomina y Molina, 2014). La ubicación de los GCPs (Ground Control Points, por sus siglas en inglés) es de importancia vital en la planificación de misiones ya que permitirá reducir los márgenes de error en la reconstrucción y ortorectificación del mosaico (Pix4D, 2018).



**Nota:** es importante seleccionar el equipo a adquirir de acuerdo a los objetivos del trabajo, considerando la precisión que el trabajo requiera; así como también la extensión y las características del área de trabajo.

Para registrar los GCPs se debe utilizar un receptor GPS (por ejemplo, submétrico), anotando los datos de ubicación y altitud.



**Nota:** es importante siempre tener por escrito el equipo con el que se trabaja, así como el error del mismo al momento de registrar cada punto.

Es necesario establecer los GCPs en áreas en donde la cámara del RPA pueda capturar el GCP fácilmente (Fig. 5). Es decir, no se recomienda colocar un GCP bajo un árbol o alguna estructura que tape de alguna manera al target, pues al estar trabajando con imágenes de una cámara fotográfica convencional, la cámara no va a penetrar objetos y sólo captará lo que se ve en la parte superior, por lo que, si hubiese un árbol muy cerca, aparecería la copa del mismo y no el target del GCP.



**Figura 5:** Imagen capturada con el RPA DJI Phantom 4 Pro en donde se observa al Target ubicado en un claro de una plantación de la provincia de Mariscal Cáceres.

La configuración, el número y la ubicación de los puntos de control terrestre influyen en la precisión del mosaico o modelo 3D. Para las plantaciones en el área de estudio, se recomienda usar entre 4 a 10 GCPs, dependiendo de la extensión de cada una (Pix4D, 2018). Los GCPs deben estar distribuidos espacialmente, de manera homogénea a lo largo del perímetro y que se ubiquen en el área a sobrevolar (Fig. 6). Cabe resaltar que, para obtener mayor precisión en el eje Z, es importante también colocar GCPs en el centro del área de estudio o en zonas con cambios en la pendiente (Jiménez *et al.*, 2017; Villanueva y Blanco, 2019).

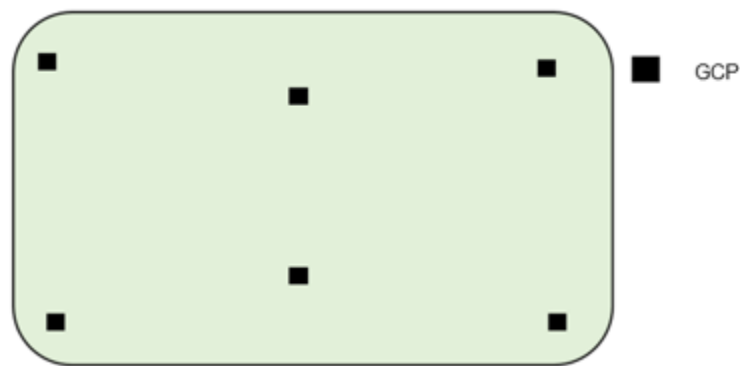


**Figura 6:** Ejemplo de distribución de GCPs.

**Fuente:** Adaptado de Tagle (2017).



**Nota:** el uso de GCPs en bosques densos no es recomendable, pues la vegetación no permitiría la visibilidad de los targets. En algunos casos se pueden colocar en claros, pero no siempre se encuentran claros en la zona a sobrevolar.

## Consideraciones al planear la misión

En el presente manual, se considera como misión a cada área de estudio sobrevolada en determinada fecha. Puede haber varios sobrevuelos en la misma zona, por lo que se considera que hubo varias misiones, las cuales posiblemente difieran en hora de vuelo. Las misiones se pueden realizar de manera manual (el piloto maniobra y decide dónde tomar las fotografías – no recomendable) o de manera programada.

En una misión programada, el planeamiento de la misma inicia con la definición de una región de interés, generalmente dibujada sobre un mapa base georeferenciado (por ejemplo, Google Earth®) para luego ingresar los parámetros de vuelo y, a partir de esta información, el software calcula automáticamente las líneas de vuelo (Neitzel y Klonowski, 2011; Nex y Remondino, 2013).

Se recomienda nombrar a cada misión basándose en el nombre de la zona y el número de misión a volar. Se puede seguir la estructura siguiente: “LUGAR-Número de parcela\_Número de misión”.

Detalles:

- Lugar: 3 letras mayúsculas.
- Número de parcela: 2 dígitos o más.
- Número de misión (consecutivos).



**Nota:** es importante mantener la estructura del nombrado de las misiones para que el trabajo en gabinete sea ordenado. Siempre se debe registrar toda la información de cada misión en el logbook (ver pág. 46), el cual sirve como historial, pero también para hacer las declaraciones a la DGAC.

A continuación, se mencionan los parámetros de vuelo requeridos para conducir una misión:

- El ángulo de inclinación de cámara:
  - 90°, cuando la cámara está enfocando hacia abajo (Fig. 7). Es ideal para generar ortomosaicos o hacer reconstrucciones 3D de la zona sobrevolada.



**Figura 7:** Imagen capturada con RPA DJI Phantom 4 Pro utilizando 90° de ángulo de cámara.

- 45°, cuando la cámara está en posición oblicua (Fig. 8). Es útil para grabar videos o tomar fotografías en donde se vea el panorama, las tomas pueden ayudar a generar una

reconstrucción 3D de zonas que no se visualizan cuando la cámara está directamente enfocando hacia abajo (90°).



**Figura 8:** Imagen capturada con RPA DJI Phantom 4 Pro utilizando 45° de ángulo de cámara.

- Tres tipos de altura de vuelo:
  - sobre el nivel del suelo (AGL)
  - sobre el nivel del dosel (ACL)
  - sobre el nivel del mar (ASL)

La mayor parte de software de planificación de misiones toman en consideración la altura de vuelo sobre el nivel del suelo (AGL), pero hay algunos que tienen opciones como nivel del mar (ASL) por lo que hay que verificar este valor con cautela. Algunas personas toman en cuenta la altura sobre el nivel del dosel del bosque debido a que es importante conocer la altura media y la altura máxima de los árboles de la zona a volar (sobre todo si hay diferencias en el relieve) para que no existan percances durante el vuelo (impacto del RPA con un árbol que no fue considerado al momento de decidir la altura de vuelo) o para decidir si la elevación es suficiente como para lograr capturar diferentes texturas y sea más fácil la generación del mosaico.

La **altura de vuelo es un factor importante para definir la resolución espacial** (nivel de detalle de las imágenes), mientras más alejado del objeto de estudio, la resolución espacial será menor (los objetos se verán más pequeños). Debido a que las cámaras de los RPAs permiten tomar fotografías con alto nivel de detalle, por más que se vuele alto, el valor de cada pixel será entre 1 a 5 cm, lo cual indica que las imágenes de cualquier RPA son de muy alta resolución espacial.



**Nota:** a diferencia de lo que se pudiera pensar sobre la generación de mosaicos que contengan vegetación compleja (como son los árboles), es preferible volar a más de 20 m del objeto de estudio para que la cámara registre mayor variación en cada imagen y sea más fácil encontrar puntos en común para unir todas las imágenes y tener el mosaico. Si se vuela muy cerca de las copas de los árboles, sólo se verán hojas y el software que se emplee para generar el mosaico tendrá dificultad en encontrar puntos que permitan unir a las imágenes, pues no se sabrá a qué árbol le corresponden las hojas de cada imagen.

- La superposición de las imágenes (traslape):

Depende de la complejidad del objeto de estudio, el traslape mínimo requerido para poder generar un ortomosaico es de 60%; sin embargo, debido a que no es sencillo (ni muy barato)

sobrevolar en zonas alejadas y con presencia de árboles, es recomendable asegurar la adquisición de la mayor cantidad de imágenes posible para que en caso que haya errores en algunas tomas (Fig. 9), se puedan descartar y aún se disponga de imágenes con traslape. Esto se logra teniendo una superposición entre imágenes de 80-90%.



**Figura 9:** Parte de un mosaico obtenido usando el software Pix4D mapper. La parte señalada en rojo presenta “agujeros” negros y zonas borrosas debido a la falta de imágenes con suficiente traslape para poder reconstruir el mosaico.



**Nota:** es preferible tener muchas imágenes que luego se pueden reducir al momento de procesar, a no tener suficientes para generar el mosaico y se deba de planear volver al campo a sobrevolar nuevamente, lo cual generaría mayores costos.

## Consideraciones previas al vuelo

### Condiciones ambientales

Si bien los RPAs brindan flexibilidad a la hora de la colecta de imágenes, es importante tener en cuenta que las condiciones ambientales como iluminación, nubosidad, viento, lluvias, entre otros,

pueden afectar a la calidad de las imágenes que se adquieran. Estos factores deben tenerse en cuenta para la creación de mosaicos y se debe prestar atención especialmente si se combinan datos de diferentes misiones para la generación de un solo mosaico (Tagle *et al.*, 2019). A continuación, se describe cada uno de los factores, así como los posibles resultados en los mosaicos:

- Luz solar: debido a que la cámara del RPA captura imágenes cuando hay presencia de radiación solar (luz solar), se recomienda estar informado sobre las horas de sol durante el año en el área de estudio, principalmente si uno se encuentra en latitudes altas. En los trópicos las horas del amanecer y atardecer son casi constantes; sin embargo, el ángulo de elevación solar varía durante el día. El ángulo de elevación solar influye en la aparición de sombras en las imágenes, a menor ángulo solar, más sombras.



**Nota:** se recomienda volar cuando el ángulo solar es superior a 30° (generalmente entre las 8:00 a 15:00 horas).

- Condiciones de iluminación: la incidencia de luz solar en determinada área está influenciada por la presencia de nubes en la zona. Las nubes difunden (“filtran”) parte de la radiación solar, por lo que su presencia o ausencia influirá en la tonalidad de las imágenes capturadas. Un cielo cubierto completamente por nubes permitirá la obtención de mosaicos más homogéneos pues la luz solar no vendrá de una sola ubicación y las imágenes estarán con un tono similar. Con un cielo despejado, en algunos casos se pueden obtener imágenes saturadas. Adicionalmente, la presencia de una sola nube tipo cúmulo puede crear sombras en una limitada parte del área a sobrevolar y esto se aparecerá en el mosaico como una sombra o área más oscura.

La condición de iluminación se debe registrar para cada misión conducida (Fig. 10) indicando, por lo menos, si el cielo ha estado despejado (soleado - S), con presencia de algunas nubes

(parcialmente nublado – PN) o completamente nublado (N). Un **modelo de cómo registrar los datos de las misiones** se puede observar en el **Anexo 2**.



**Figura 10:** Condiciones de iluminación.

**Fuente:** Adaptado de Tagle (2017).

- Viento: si bien el RPA DJI Phantom 4 Pro resiste vientos hasta de 10 m/s, obtener imágenes mientras hay vientos fuertes ocasiona que la vegetación se encuentre en diferentes posiciones, por lo que será difícil obtener un mosaico completo y algunos objetos sean parcialmente visibles (Fig. 11). Adicionalmente, la presencia de vientos en general, afecta el desempeño de la batería del equipo, por lo que, a mayor fuerza del viento, menor tiempo de vuelo.

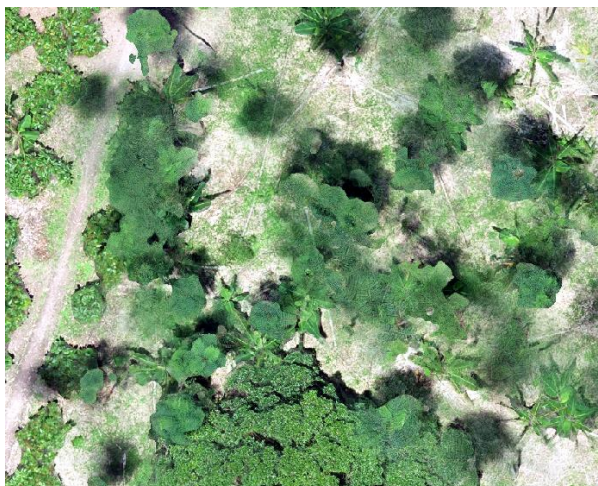


**Figura 11:** Parte de un mosaico con copas parcialmente visibles por efecto del viento.

- Precipitación: aunque el RPA DJI Phantom 4 Pro es resistente al agua, las imágenes capturadas durante eventos de lluvia pueden contener gotas de agua, lo cual, al generar un mosaico, puede reflejarse en algunas áreas borrosas o todo el mosaico puede ser borroso (Fig. 11).



**Figura 12:** Mosaico borroso debido a imágenes con presencia de gotas de agua.

**Fuente:** Tagle *et al.* (2019).

- Humedad: se recomienda evitar volar en zonas donde el porcentaje de humedad supere el 80%, o inmediatamente después de la lluvia, pues se podría afectar al barómetro y el lente de la cámara estaría empañado, por lo que las imágenes capturadas estarían borrosas y no servirían.

- Temperatura: el rango recomendable para sobrevolar el RPA DJI Phantom 4 Pro es entre 0° y 40 °C, pero se recomienda una temperatura ideal de +- 23 °C evitando que la batería del RPA se sobrecaliente. De la misma manera, evitar exponer a la tablet al sol directo durante la misión, pues también tenderá a calentarse.

## Seguridad y salud ocupacional

Es necesario cumplir con ciertos requisitos para garantizar la seguridad del piloto y del entorno, como se detalla a continuación:

- El piloto debe contar con una licencia acreditada por la DGAC, estar en buen estado de salud, realizar un análisis de riesgo y verificar que el equipo esté en condiciones óptimas de vuelo; por ningún motivo se debe volar si el equipo presenta fallas.
- Cuando se vuele en zonas boscosas es importante tener un copiloto y un asistente de vuelo que estén pendientes del RPA desde diferentes ubicaciones para no perderlo de vista (el uso de binoculares es recomendable) (DGAC, 2015 y Sharma, 2019).
- Evitar obstáculos cuando se sobrevuele en zonas con muchas personas alrededor; por lo menos mantener 1 m de distancia. Al notar presencia de aves u otros animales cerca, que puedan ser afectados o puedan afectar al equipo, es mejor pausar la misión.
- Se recomienda no volar en zonas con grandes estructuras de acero y electrónicas ya que causan interferencia magnética y pueden hacer perder el control del RPA (Vallhonrat, 2017). Por experiencia propia, al encender el RPA en algunas zonas boscosas, este efecto de inducción electromagnética también ha ocurrido.
- Se recomienda que por lo menos el piloto cuente con arnés de soporte para el control remoto, debido a que, a largo plazo, el peso de éste afecta a las muñecas. También es recomendable usar materiales para protegerse del sol como gorros, lentes con protección UV, camisas manga larga, bloqueador, entre otros.



**Nota:** Al notar presencia de aves u otros animales cerca, que puedan ser afectados o afectar al equipo, es mejor pausar o cancelar la misión, dependiendo de la complejidad caso.



**Nota:** antes de realizar cualquier salida de campo es necesario revisar si se cuenta con todos los equipos y materiales necesarios para utilizar el RPA correctamente por ello es importante, el **Check List antes de ir al campo y mantenimiento de equipos** (Anexo 2). Además se debe repasar antes del inicio de cualquier misión el **Instructivo de Vuelo** (Anexo 5), el cual se recomienda sea colocado en el tablero de despegue para tenerlo siempre de referencia (Fig. 13).



## Consideraciones durante el vuelo

Durante el vuelo es posible que se presenten situaciones que es necesario tomar en cuenta para poder evitar posibles problemas. A continuación, se detallan algunos casos:

- Abortar misión si las condiciones climáticas se tornan desfavorables como es el caso de lluvias, tormentas eléctricas o viento muy fuerte. Utilizar el botón el retorno a casa o punto de origen

(Fig. 14), manteniendo pulsado el botón para iniciar el modo de regreso al punto de despegue del RPA DJI Phantom 4 Pro.

- Es necesario tener en cuenta que tanto el despegue como aterrizaje del RPA consumen batería, por lo que es importante fijar un límite de porcentaje de batería (recomendable el 30%) que permita asegurar el retorno del RPA al lugar de despegue. En caso el área a sobrevolar no se haya concluido, se puede cambiar de batería y continuar con los sobrevuelos. Para tener una idea de cuánta batería se consume en el aterrizaje, vuelo o despegue, se puede llevar un registro al respecto. En el **Anexo 2** se puede apreciar un modelo de cómo llevar **un registro del performance de cada batería** con la que se trabaje.

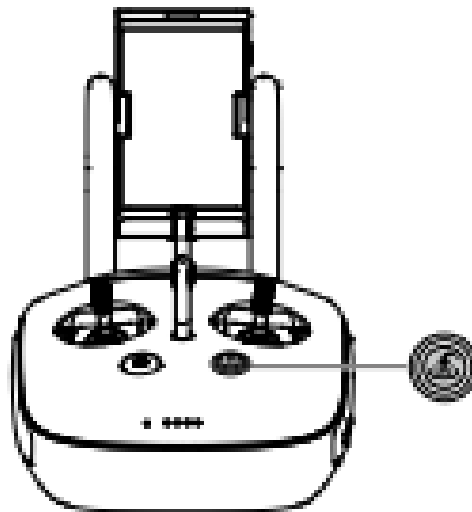


**Figura 14:** Botón de retorno a casa del control remoto del RPA DJI Phantom 4 Pro.

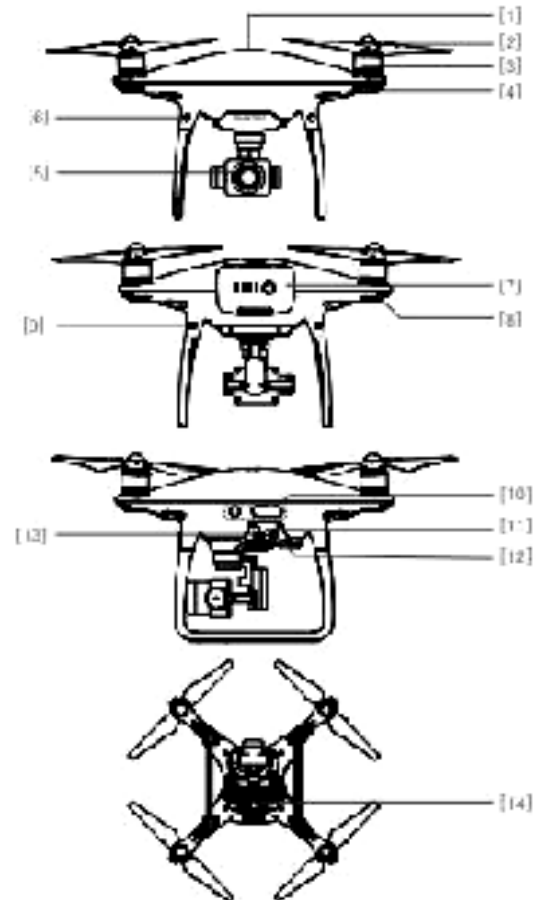
**Fuente:** Extraído de "Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario" DJI (2020).

# Introducción al uso del RPA DJI Phantom 4 PRO

## Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas han sido extraídas del Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario (DJI, 2020), para mayor detalle se recomienda revisar el manual de uso, disponible en: [https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4\\_pro/20200108/Phantom\\_4\\_Pro\\_Pro\\_Plus\\_Series\\_User\\_Manual\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20200108/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_EN.pdf)

- Peso: 1380 g
- Dimensión estructural: 350 mm
- Velocidad máxima (modo-P): 14 m/s
- Velocidad máxima vertical (modo-P): +5 m/s, -3 m/s
- Velocidad máxima (modo-S): 20 m/s
- Velocidad máxima vertical (modo-S): +6 m/s, -4 m/s
- Altitud máxima de vuelo: 6000 m MSL
- Resistencia máxima al viento: 10 m/s
- Duración de vuelo (máx): 30 minutos (considerando el despegue, aterrizaje y vuelo propiamente dicho).



## Partes del RPA DJI Phantom 4 Pro:

En la Fig. 15 se muestran las partes del PH4 Pro:

- [1] GPS e IMU
- [2] Hélices
- [3] Motores
- [4] Indicadores LED delanteros
- [5] Estabilizador y cámara
- [6] Sistema de visión frontal
- [7] Batería de Vuelo inteligente
- [8] Indicador de estado de la aeronave

- [9] Sistema de visión trasera
- [10] Sistema de detección por infrarrojos
- [11] Botón de vinculación e indicador de estado de vinculación/cámara
- [12] Puerto Micro USB
- [13] Ranura para tarjeta MicroSD de la cámara
- [14] Sistema de visión inferior

**Figura 15:** Diagrama del RPA DJI Phantom 4 Pro.

**Fuente:** Extraído de “Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario” DJI (2020).



**Nota:** en ocasiones el equipo pedirá actualización de firmware, pero esto no es indispensable para poder realizar el sobrevuelo. Es importante que antes de instalar una nueva versión, se revise en la web, comentarios sobre la versión del firmware a instalar, para evitar instalar una versión con errores.

## Ensamblaje

A continuación, se detallan los pasos para el ensamblaje del RPA DJI Phantom 4 Pro. Si bien este procedimiento se vuelve rutinario, se recomienda siempre contar con el instructivo de vuelo para el RPA DJI Phantom 4 Pro, el cual se puede tener a la mano si se coloca en el tablero de despegue (Ver Anexo 5). El tablero de despegue debe ser una superficie plana, para que brinde estabilidad al RPA.

1. Retirar cuidadosamente el seguro de la cámara (Fig. 16B) y el seguro del Gimbal (Fig. 16C). Seguir la dirección de la flecha (color rojo) para retirar los seguros como se indica en cada una de las figuras respectivamente.



**Figura 16:** Demostración de cómo retirar el seguro de la cámara (B) y seguro del gimbal (C).

2. Colocar las hélices y revisar que estén correctamente sujetas (Fig. 17). Las hélices de color negro se deberán colocar en los rotores que posean el mismo color; de igual manera con las hélices grises. Presionar las hélices hacia abajo y girar en la dirección de bloqueo hasta que se queden fijas. Una vez colocadas, es recomendable tirar suavemente de ellas para revisar de que no estén sueltas.



**Figura 17:** Demostración de ensamblaje de las hélices en el RPA.

3. En caso de que exista una batería insertada en el RPA DJI Phantom 4 Pro, retirar la batería presente (Fig. 18) para revisar el número asignado y revisar el estado de la carga presionando el botón de encendido (Fig. 19). Posteriormente, o en caso de que no haya habido alguna batería, colocar la batería de acuerdo a las Fig. 20A y 20B.



**Figura 18:** Instrucciones para retirar la batería del RPA DJI Phantom 4 Pro. Las flechas celestes indican los puntos donde se debe hacer presión para retirar la batería, y la flecha verde el sentido hacia dónde ese debe de mover.

**Fuente:** Extraído de “Phantom 4 Pro + Quick Start Guide” DJI (2017).

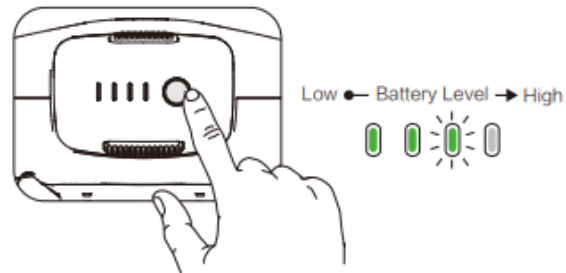


**Figura 19:** Revisión del nivel de batería del RPA DJI Phantom 4 Pro.

**Fuente:** Extraído de “Phantom 4 Pro + Quick Start Guide” DJI (2017).



**Figura 20:** Demostración de cómo colocar/retirar la batería en el RPA DJI Phantom 4 Pro.

## Calibración

La calibración de la brújula o IMU se debe realizar solo si la aplicación DJI GO 4 lo requiere o se visualiza un mensaje en la barra de estado que solicite realizarlo, también cada vez que el equipo es transportado en distancias muy largas. Para ello es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- No realizar la calibración si existe interferencia magnética como estructuras de metal o acero.
- No portar con objetos como celulares o brújulas durante la calibración.
- La aplicación DJI GO 4 le pedirá que realizar nuevamente la calibración si existió una fuerte interferencia magnética durante la calibración.

Los pasos para realizar la calibración de la brújula o IMU son los siguientes:

Elegir un área despejada y plana para realizar la calibración. Pulsar la barra de estado de la aeronave que se muestra en la app DJI GO 4 (Fig. 21) y seleccionar calibrar para seguir los pasos que se muestran en la pantalla (Fig. 22).

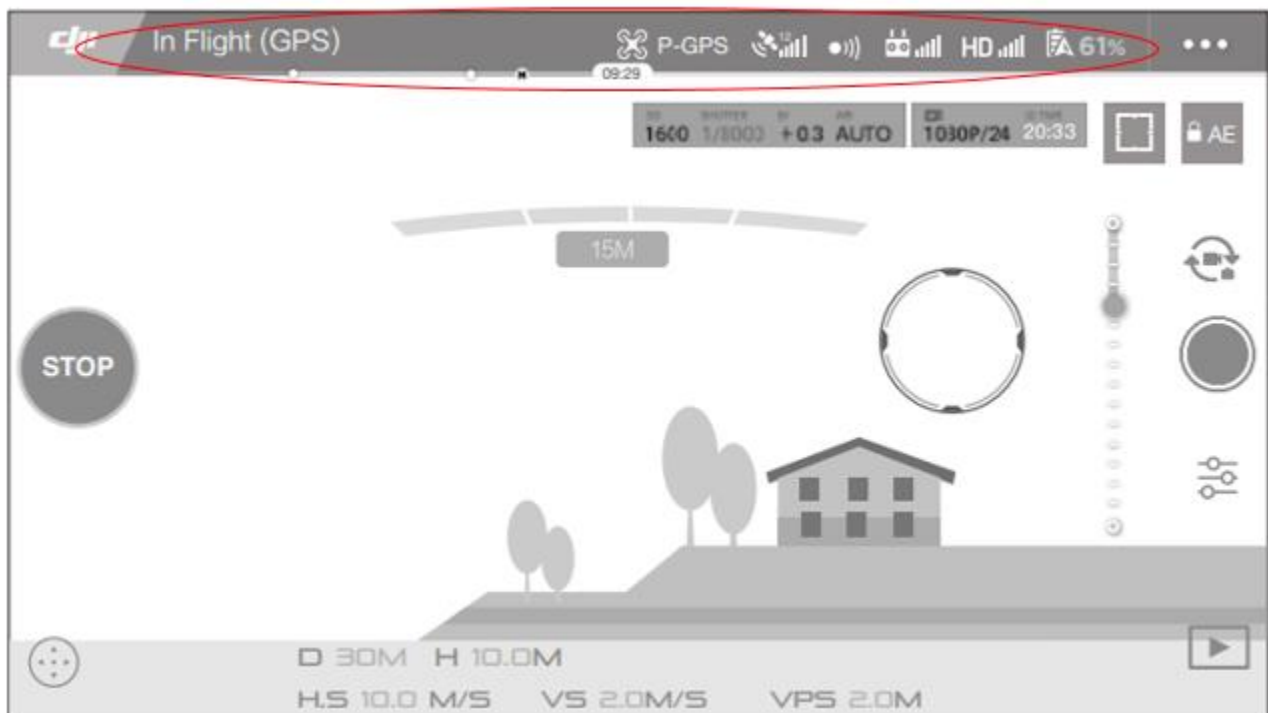


**Figura 21:** Barra de estado de la aplicación DJI GO 4.

**Fuente:** Extraído de "Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario" DJI (2020).

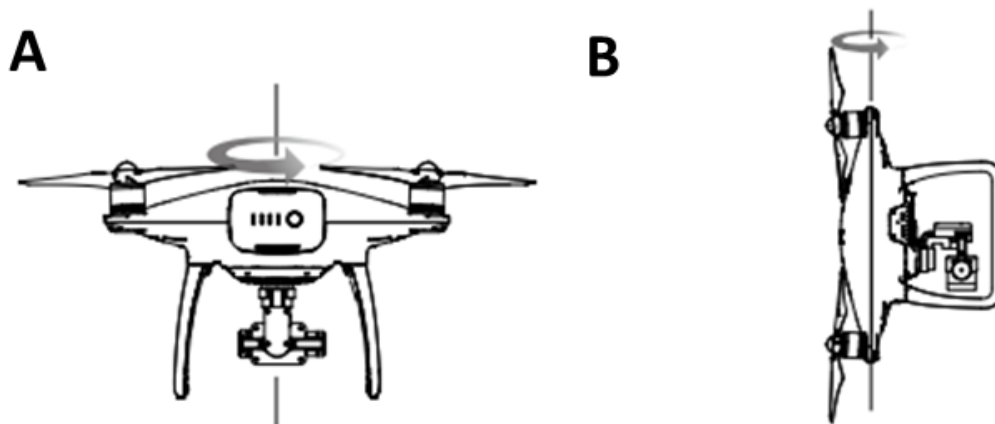


**Figura 22:** Pasos a seguir para realizar la calibración.

**Fuente:** Extraído de “Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario” DJI (2020).

## Colecta de datos

### Planeamiento de misiones

Existen diversas opciones para planear una misión, dependiendo del software, uno puede planear la misión en la PC o en el celular o tablet. Algunos permiten planear misiones en gabinete mediante la creación de un polígono en formato KMZ/KML o directamente trazando el polígono. Hay varios software libres como Mission Planner que se utiliza en PCs o las apps Tower y Pix4D Capture para tablets o celulares. También existen software comerciales como DroneDeploy, que tiene opciones de gratuitas y otras de pago. El presente manual se enfocará en el uso de la aplicación Pix4D Capture, como se detalla a continuación:

1. Convertir el polígono del área de estudio (shapefile/geopackage) a formato KML (en software como QGIS o ArcGIS) y colocar el nombre del archivo de acuerdo a la misión a sobrevolar, después el importar el archivo en la tablet que será usado para el sobrevuelo.
  
2. Copiar el archivo a la carpeta Pix4D de la Tablet (Fig. 23).

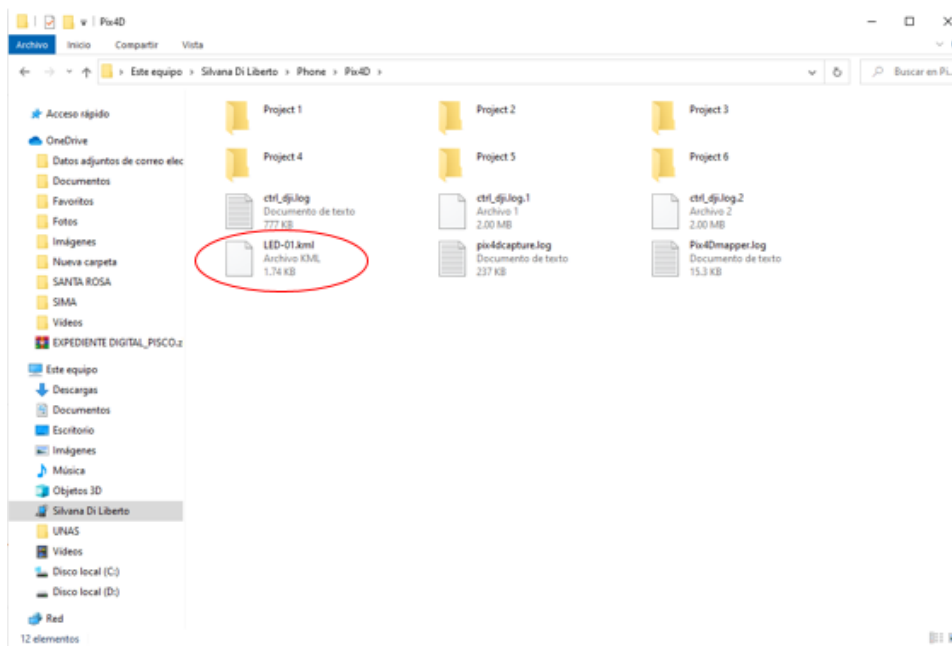


**Figura 23:** Archivo en formato KML dentro de la carpeta Pix4D.

3. Abrir la aplicación Pix4Dcapture y seleccionar la opción “Polygon mission” (para sobrevuelos con 90° de ángulo de cámara) (Fig. 24).

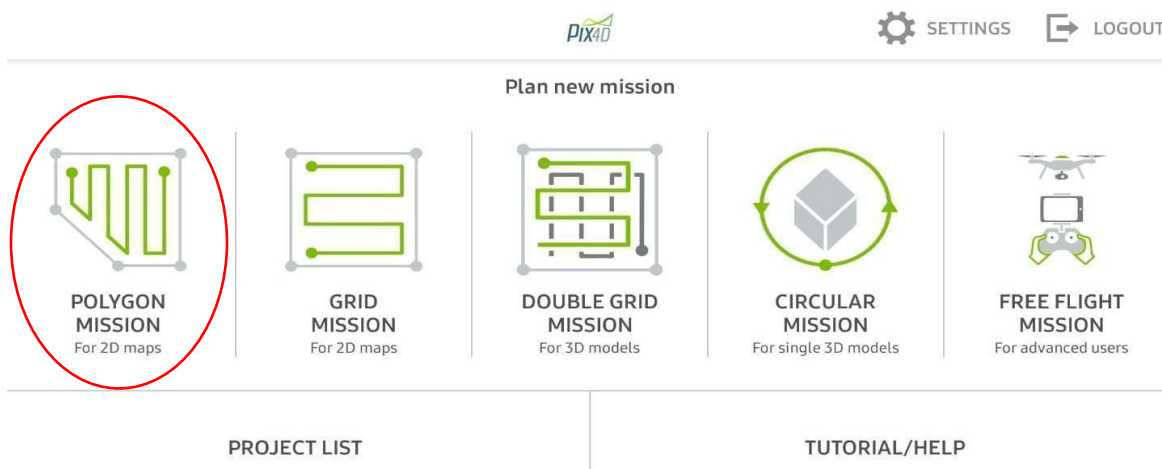


**Figura 24:** Tipos de misiones en Pix4D capture.

4. Seleccionar el ícono para ver los archivos (Fig. 25) y luego los 3 puntos que se encuentran en la parte superior derecha (Fig. 26). Dar clic en “Load KML” para elegir el archivo de la misión a sobrevolar (Fig. 27).

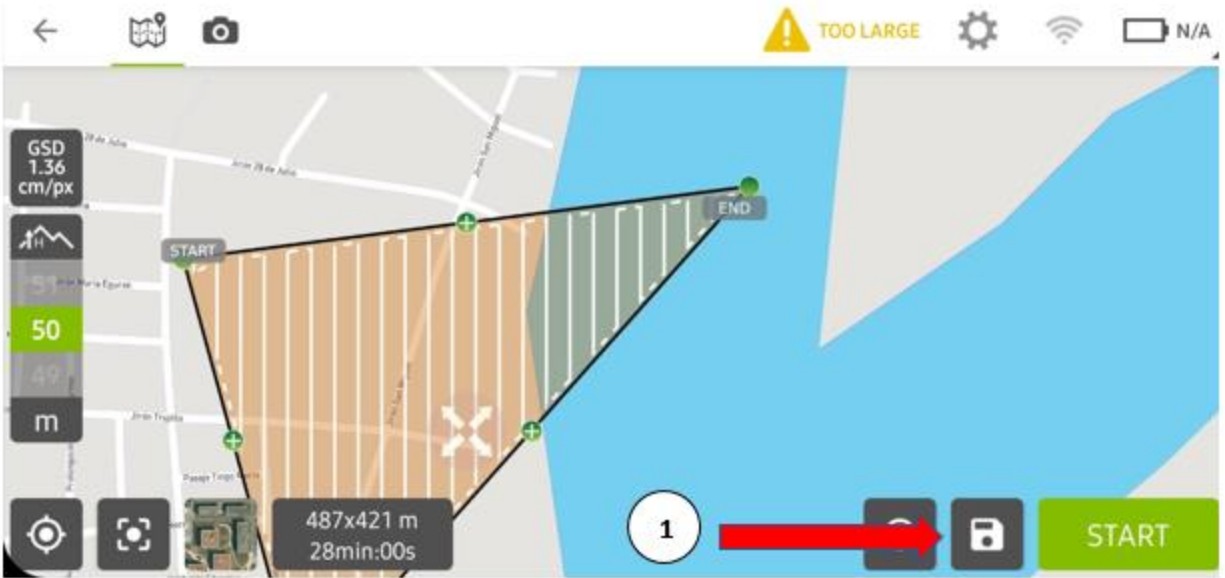


**Figura 25:** Ícono que permite visualizar los archivos en la app Pix4D capture.

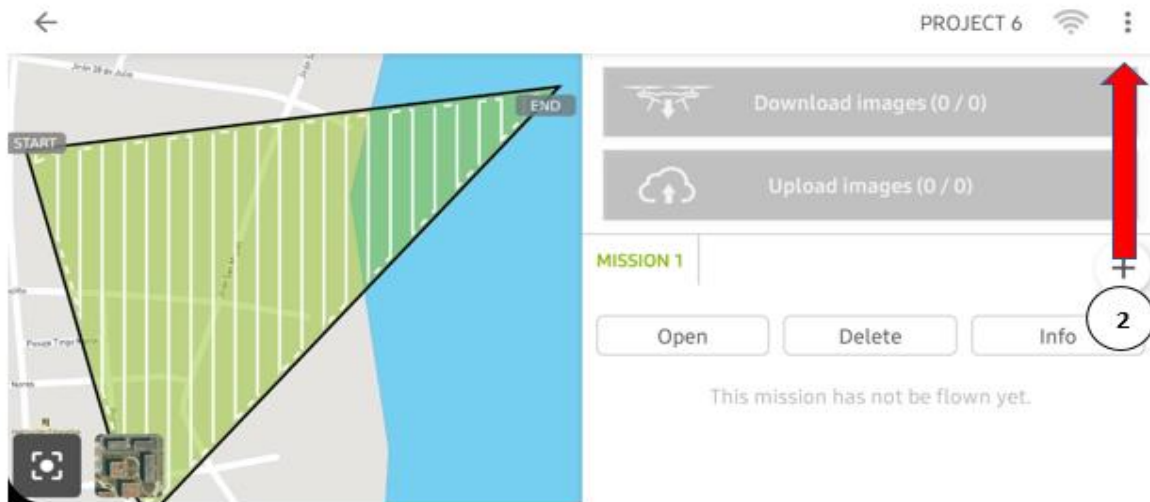


**Figura 26:** Ícono que muestra las opciones renombrar proyecto, eliminar proyecto o cargar el archivo en formato KML.

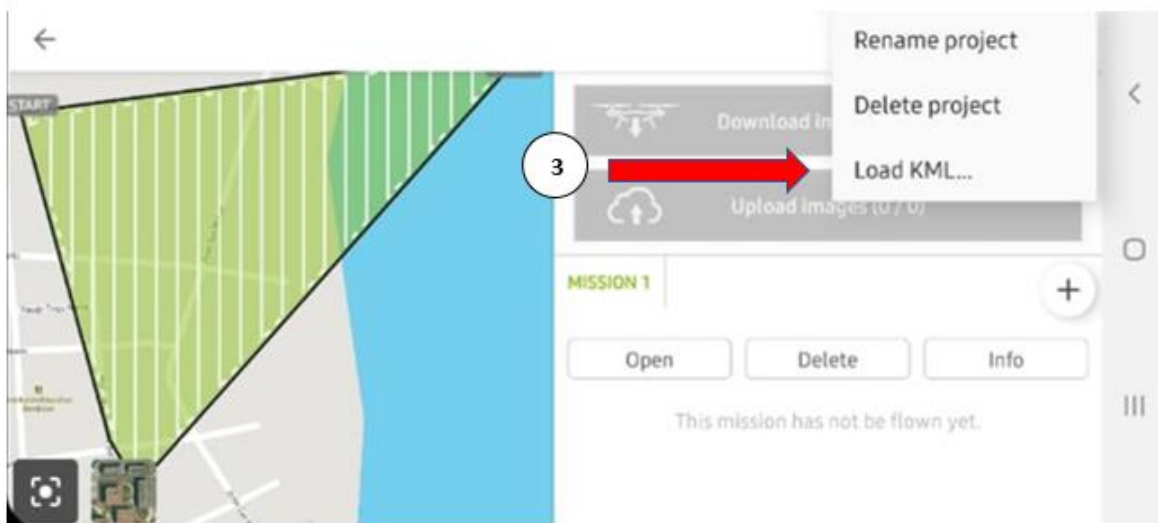


Figura 27: Cargar el archivo KML.

- Una vez seleccionado el archivo, seleccionar el ícono de localización para ubicar el polígono en el área de estudio. Luego ir a la configuración para realizar los cambios necesarios y modificar la altura de vuelo desde la estación base (Fig. 28).

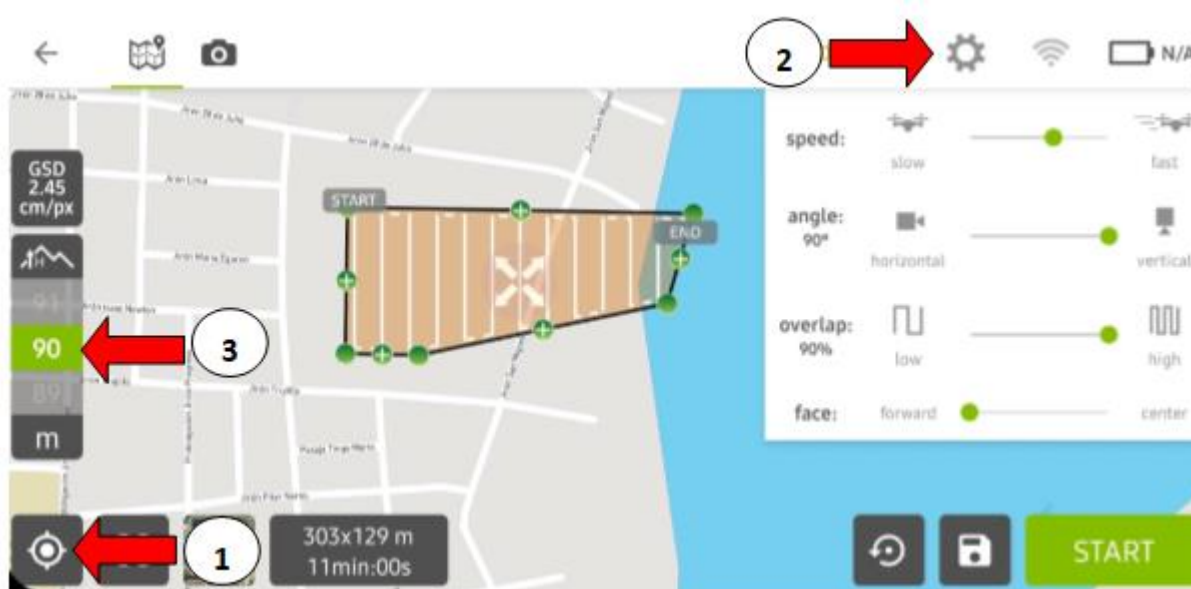


Figura 28: Localización manual del área de estudio y configuración de parámetros.



**Nota:** Utilizar una velocidad media de vuelo (entre 5 y 7 m/s) para que las imágenes no sean borrosas. Finalmente, de ser necesario, editar el polígono comprobando el tiempo que durará la misión y

dar clic en “Start” para iniciar la misión (Fig. 29).

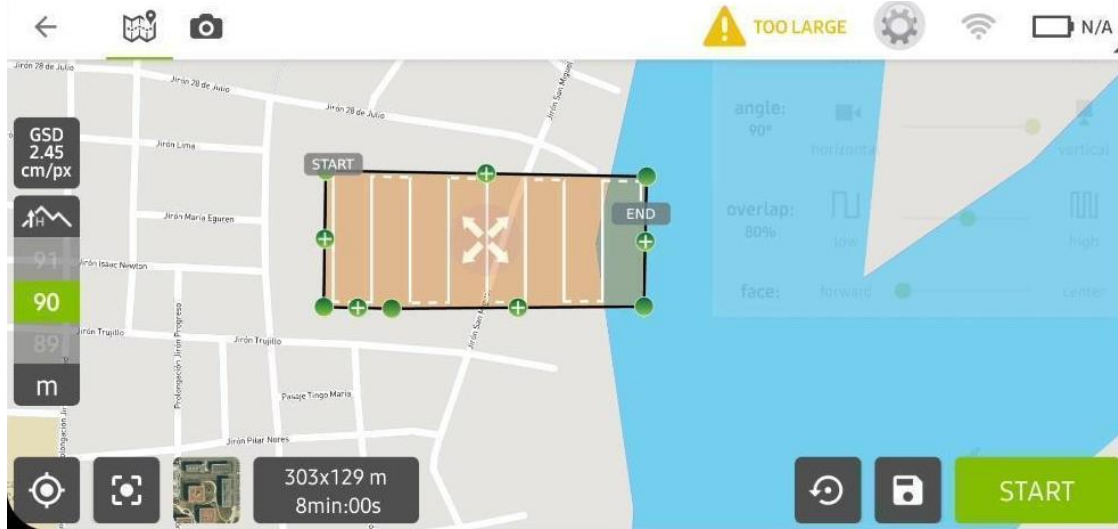


**Figura 29:** Ediciones finales del área a sobrevolar antes de comenzar.



**Nota:** la opción para cargar archivos KLM en Pix4D capture solo es posible en la aplicación para Android, esto no es posible en IOS.

## Descarga de datos

Existen dos maneras de descargar y revisar las imágenes obtenidas. La primera es utilizando el software Pix4dcapture, que, una vez terminada la misión, automáticamente envía las imágenes del RPA a la tablet/celular, y en cuanto haya internet, éstas son subidas a la nube. Este proceso se recomienda no ser realizado en campo, pues requiere tiempo y se consume la batería de los equipos. La segunda manera de descargar se detalla a continuación:

1. Para iniciar la descarga de datos se debe retirar la microSD del RPA (Fig. 30) y colocarla en un adaptador a SD para conectar a la laptop y copiar los datos. Es recomendable que se copien las imágenes a la laptop inmediatamente después de cada misión para evitar pérdida de información.



**Figura 30:** Retiro de la microSD del RPA para realizar la descarga de datos.

2. En este caso se observa una sola carpeta (SDXC) que nos llevará hasta la ubicación de los archivos almacenados (Fig. 31) como imágenes del despegue y aterrizaje, videos, imágenes de la misión y otras (Fig. 32).

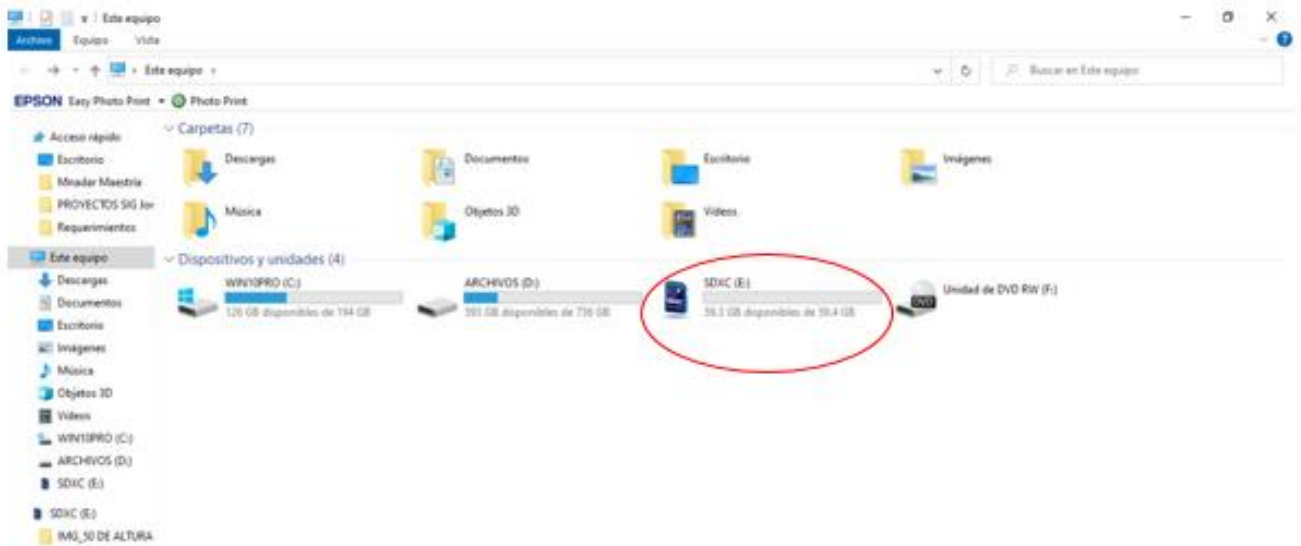


**Figura 31:** Carpeta que contiene archivos del vuelo realizado.

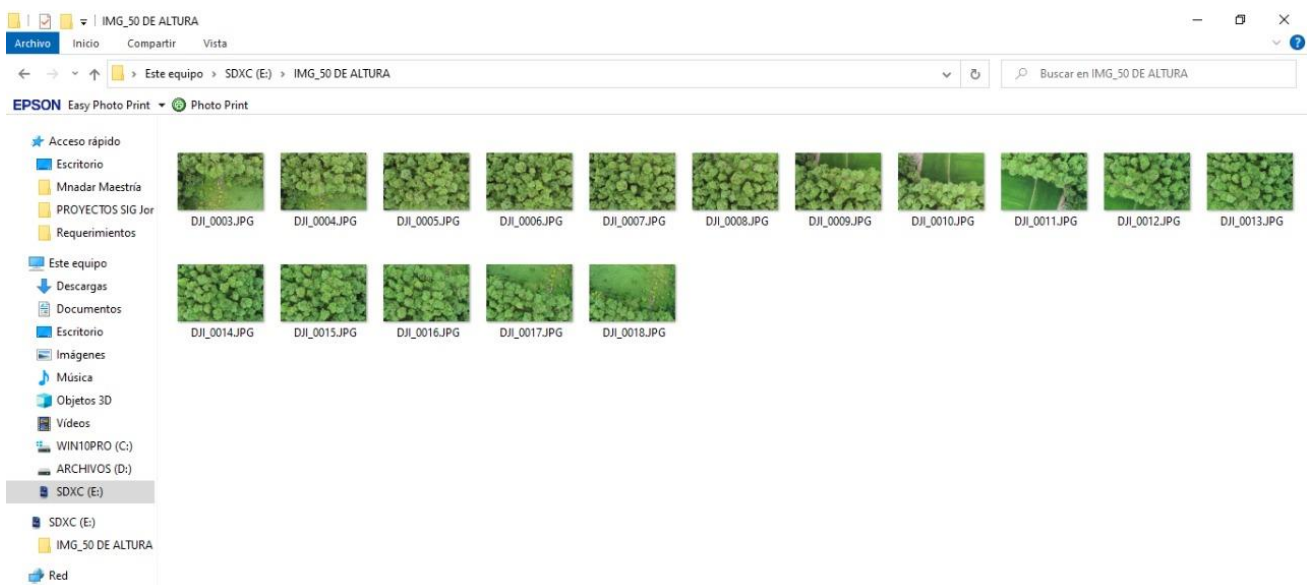


**Figura 32:** Imágenes capturadas durante el vuelo.

3. Es importante nombrar la misión a sobrevolar de la siguiente manera “Lugar-Número de parcela\_Número de misión\_Método”.

Detalles:

- Lugar: 3 letras mayúsculas.
  - Número de parcela: 2 dígitos o más.
  - Número de misión (o combinación de misiones)
  - Método: a) \_tr para generación del DSM y ortomosaico usando triangulación.  
b) \_idw para generación del DSM y ortomosaico usando la interpolación de distancia inversa ponderada.  
c) \_e para posterior edición del Mosaico
4. Seleccionar las imágenes de la misión y copiarlas a la carpeta de destino. Considerar la hora de inicio de cada misión para identificar las imágenes o videos que pertenecen a la misma.



**Nota:** utilizar una libreta de campo (logbook) donde se registre toda la información correspondiente a la misión a sobrevolar, así como los porcentajes de batería como se puede visualizar en el **Anexo 4**.

## Verificación de datos colectados

Esta verificación debe hacerse en campo con la finalidad de decidir si la misión ejecutada se realizó correctamente o si es necesario realizar una nueva misión para obtener mejores imágenes o sobrevolar alguna zona que no llegó a ser cubierta.

1. Para realizar la verificación de las imágenes capturadas, es necesario retirar la memoria microSD del RPA e insertarla en una laptop usando el adaptador SD. Con ello se comprueba

que el RPA haya capturado todas las imágenes del área establecida para la misión, verificando que estas no estén borrosas, se encuentren movidas por el viento o contengan vapor de agua lo cual generaría un producto de baja calidad (Fig. 33).

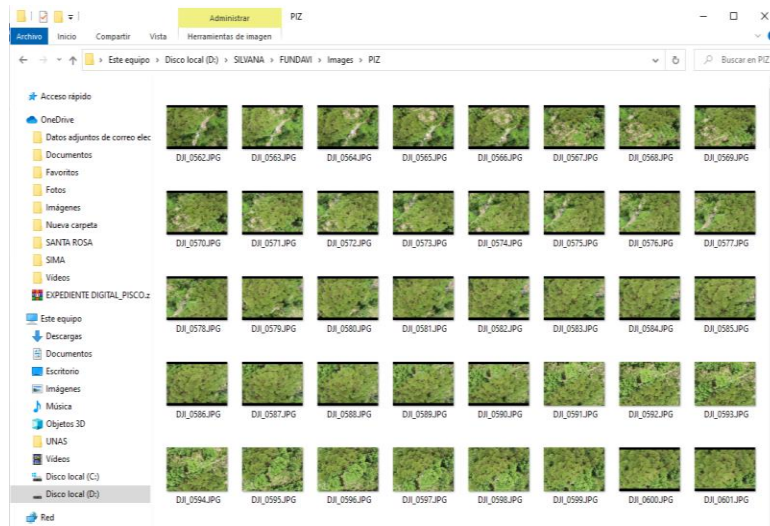


**Figura 33:** Verificación de las imágenes capturadas por el RPA DJI Phantom 4 PRO.

2. Es importante comprobar que las imágenes capturadas durante el vuelo se encuentren dentro del área planificada a volar. En el caso de haber realizado más de una misión, se debe verificar que exista traslape para la generación de un solo mosaico. Para esto se cargan las imágenes en Agisoft Metashape arrastrando las imágenes hacia el centro (Fig. 34).

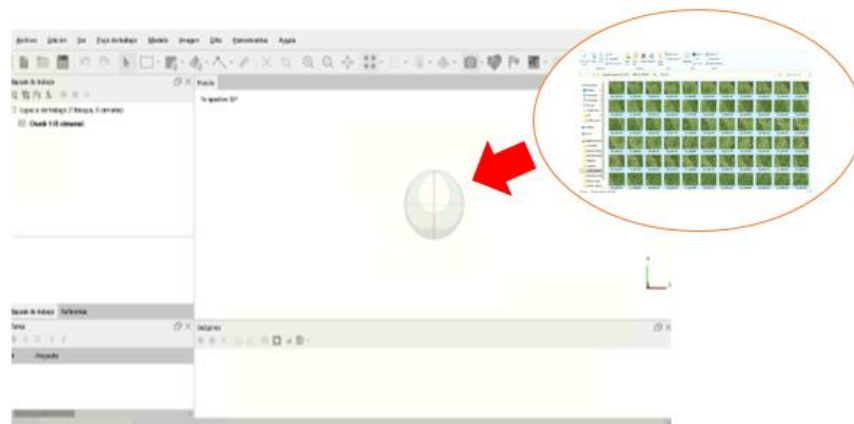


**Figura 34:** Procedimiento para cargar las imágenes de la misión en Agisoft Metashape.

3. A continuación, seleccionar “Archivo”, opción “Importar”, “Importar formas” (Fig. 35) y seleccionar el archivo shapefile de la misión a comprobar (Fig. 36).

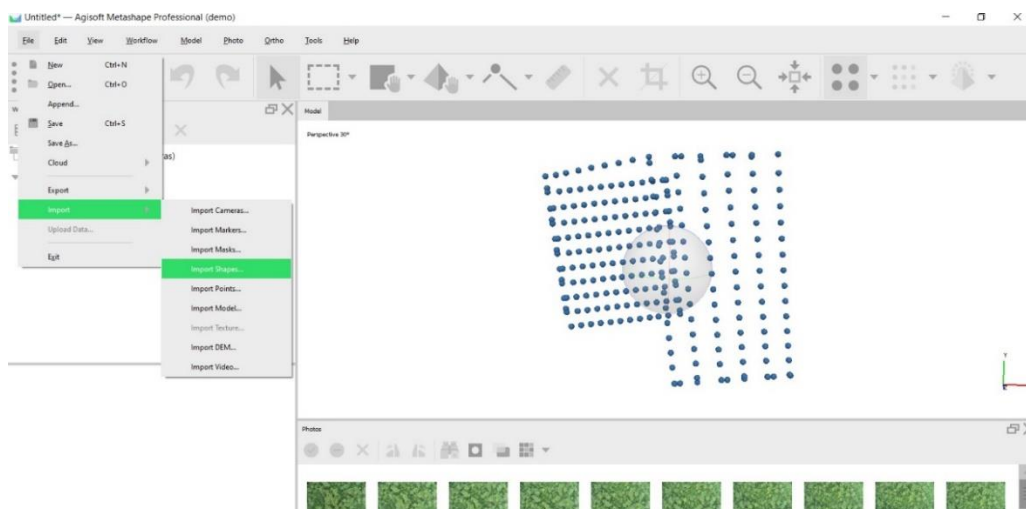


**Figura 35:** Procedimiento para importar el archivo shapefile de la misión al software Agisoft Metashape.

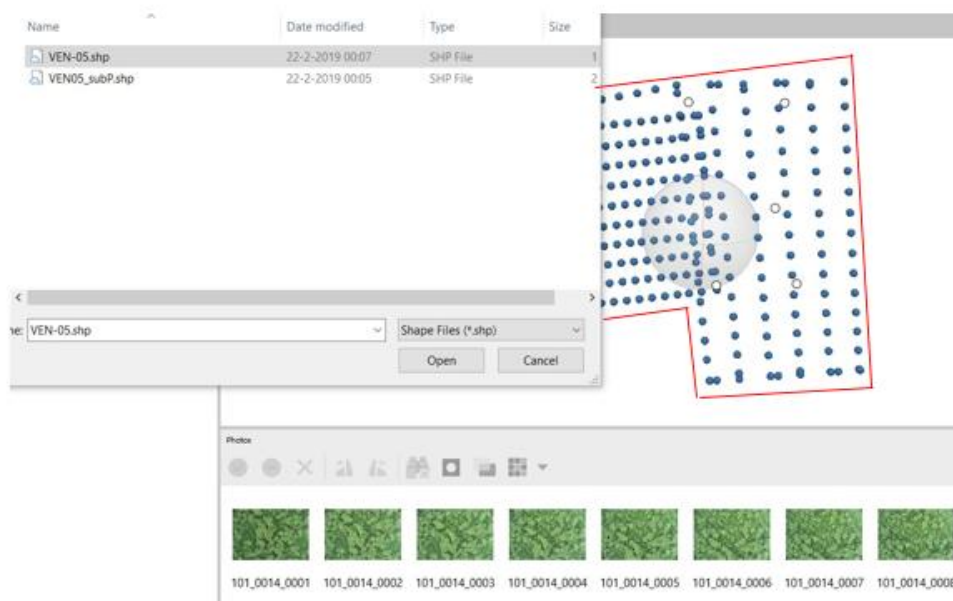


**Figura 36:** Polígono de la misión (color rojo) superpuesto con las fotografías tomadas durante el vuelo (puntos azules).



**Nota:** Verificar que tanto las imágenes como el archivo shapefile de la misión se encuentren en el mismo sistema de referencia

## Procesamiento de datos

El procesamiento de datos es la parte fuerte del trabajo con RPAs, aquí se puede trabajar con diversos software dependiendo de la actividad a conducir. A continuación, se presenta el flujo de trabajo resumido (Fig. 37), resaltando los pasos que serán descritos a continuación:

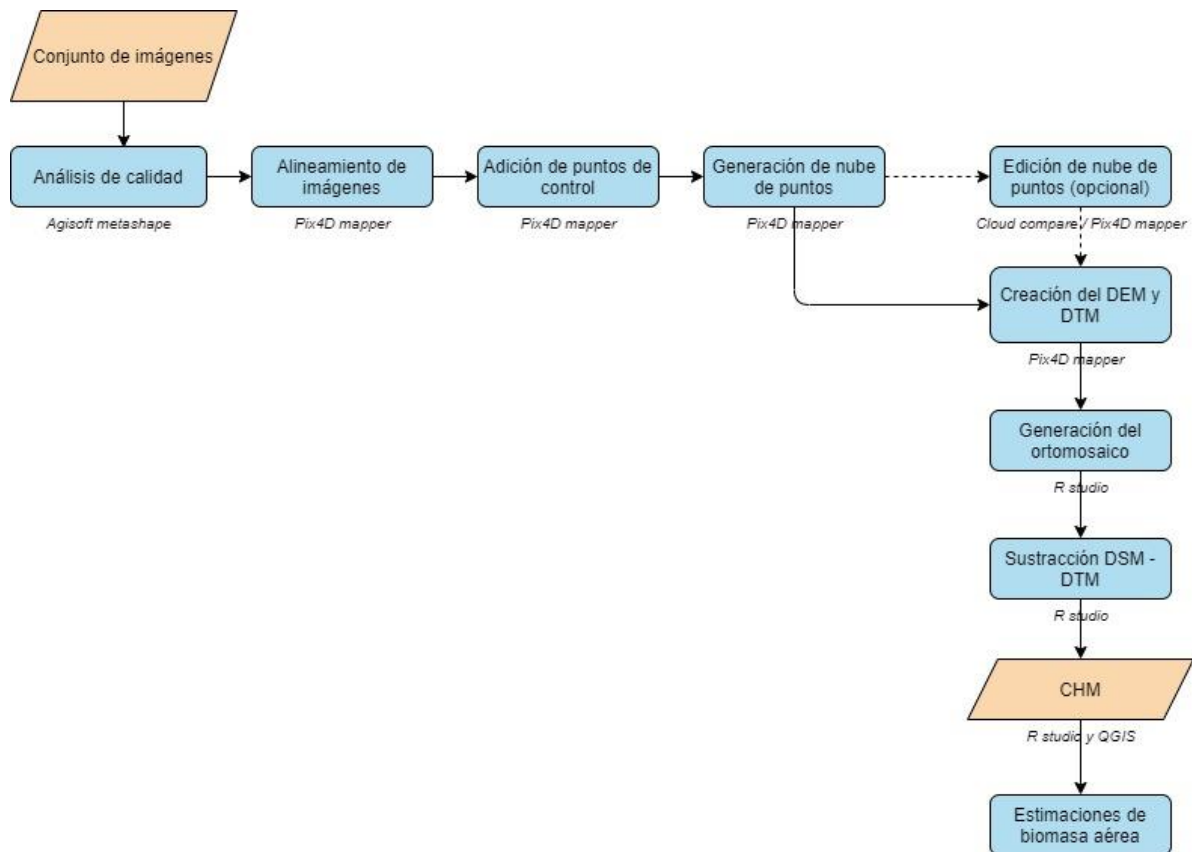


**Figura 37:** Flujo de trabajo para el procesamiento de las imágenes de RPAS para la evaluación y estimación de biomasa de las plantaciones forestales del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo.

Existen diversos software que se pueden emplear en la etapa de procesamiento de datos, pero los que se han trabajado para el proyecto son los que se describen a continuación: Agisoft Metashape (versión demo) es útil para realizar el análisis de calidad de las imágenes; Pix4Dmapper que, a partir del conjunto de imágenes con traslape entre sí, genera la nube de puntos que permite tener modelos 3D y exportar modelos digitales de superficie, del terreno (MDS, MDT), y ortomosaicos; Cloudcompare es útil para la edición de la nube de puntos en caso se considere necesario. RStudio para la generación de modelos de altura de copas y estimaciones de biomasa aérea, además del

software QGIS que además se utiliza para la visualización de los productos generados. Los requerimientos de sistema para usar RStudio y QGIS se pueden observar en el **Anexo 6**.

## Análisis de calidad de las imágenes

Antes de generar el ortomosaico, es necesario revisar las imágenes que van a ser utilizadas en dicho proceso asegurando la calidad del mismo. A continuación, se muestran los pasos a seguir usando el software Agisoft Metashape versión Demo.

1. Seleccionar todas las imágenes que serán analizadas en el software y arrastrarlas en la parte central de la ventana, como se muestra en la imagen (Fig. 38).

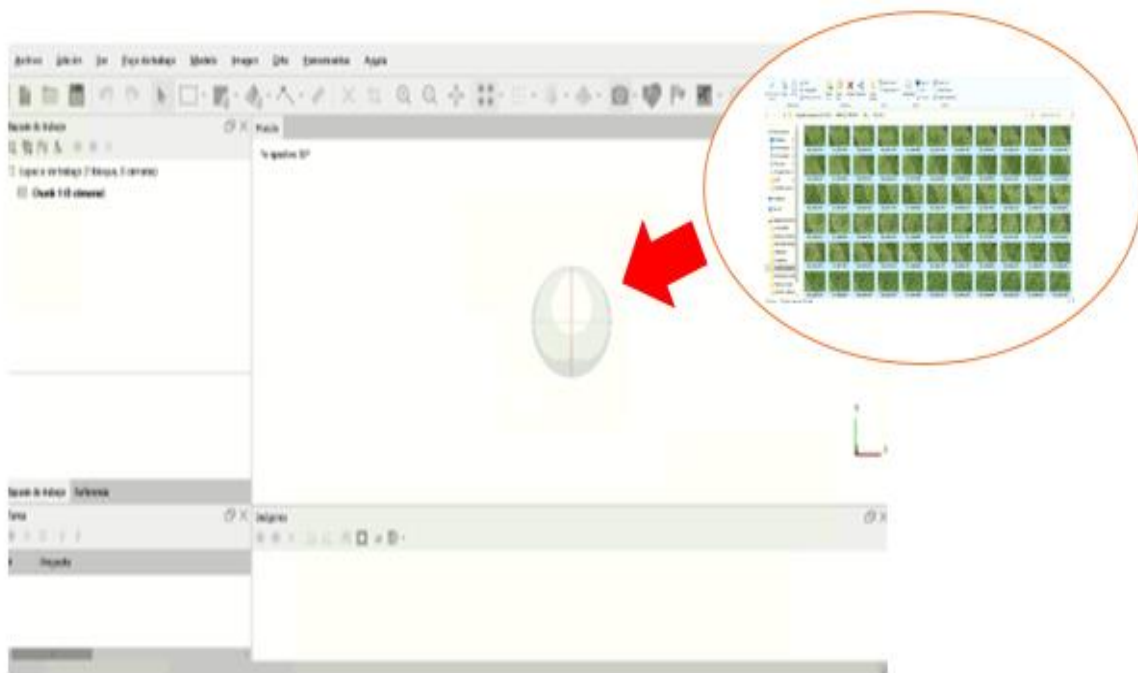


**Figura 38:** Procedimiento para cargar las imágenes de la misión en Agisoft Photoscan.

2. En la ventana del programa se observa la posición de las imágenes con su respectivo código (Fig. 39).

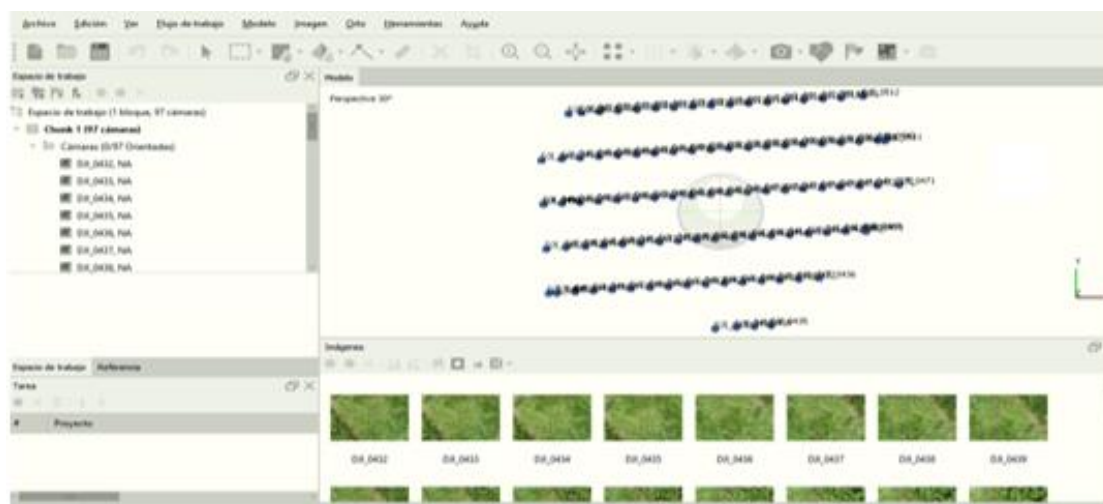


**Figura 39:** Visualización de la ubicación de las imágenes capturadas durante la misión.

3. En el lado izquierdo, se observa el fichero “Chunk” que permite cargar varias imágenes de diferentes misiones teniendo distintos ficheros y verificar el número de imágenes cargadas. Una vez seleccionadas todas las imágenes, se selecciona el ícono del lado derecho que permite mostrar los detalles de las imágenes (fecha y hora de captura, el modelo de cámara, la distancia focal, etc.) (Fig. 40).

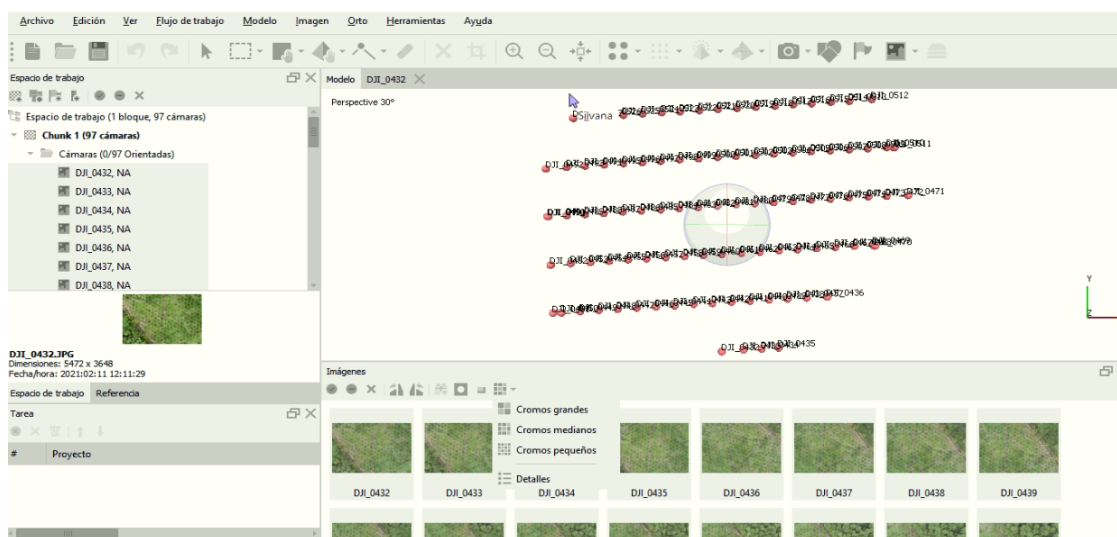


**Figura 40:** Selección de las imágenes y detalles de captura.

- Luego se da clic derecho dentro de la opción donde se muestran los detalles de las imágenes y se selecciona la opción “Estimar calidad de imagen” (Fig. 41).

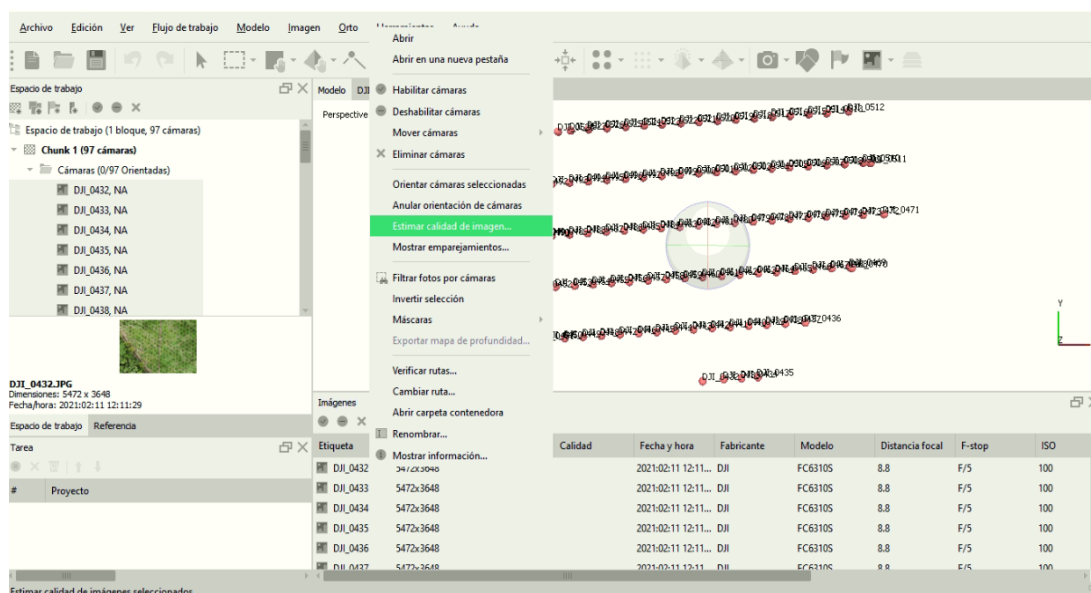


**Figura 41:** Procedimiento para estimar la calidad de las imágenes.

- Se selecciona la opción “cámaras seleccionadas” para utilizar las imágenes que se van a procesar (Fig. 42) y se mostrará una ventana con el porcentaje de avance del proceso realizado (Fig. 43).

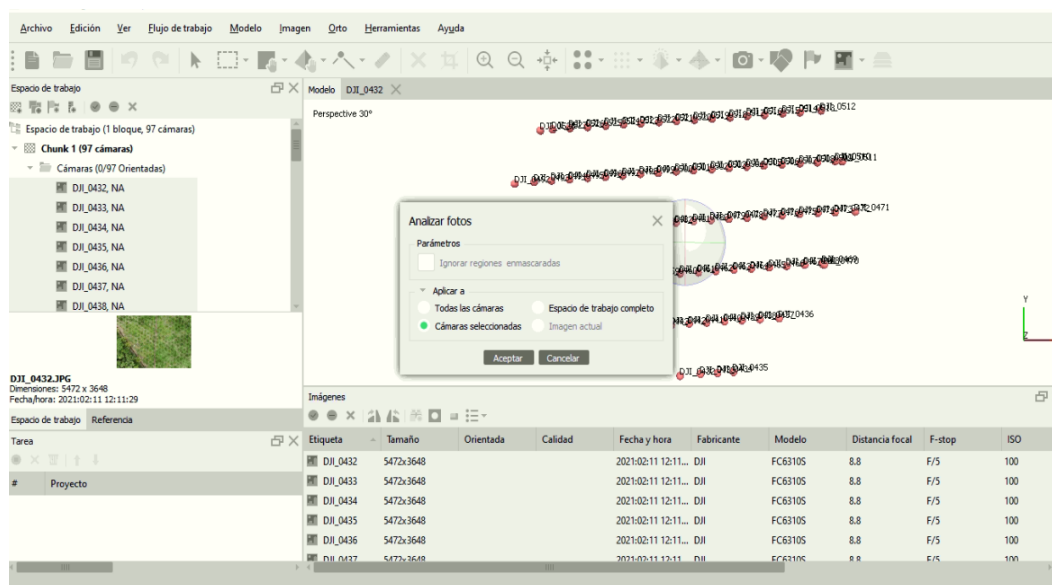


**Figura 42:** Selección de cámaras para determinar las imágenes a analizar.

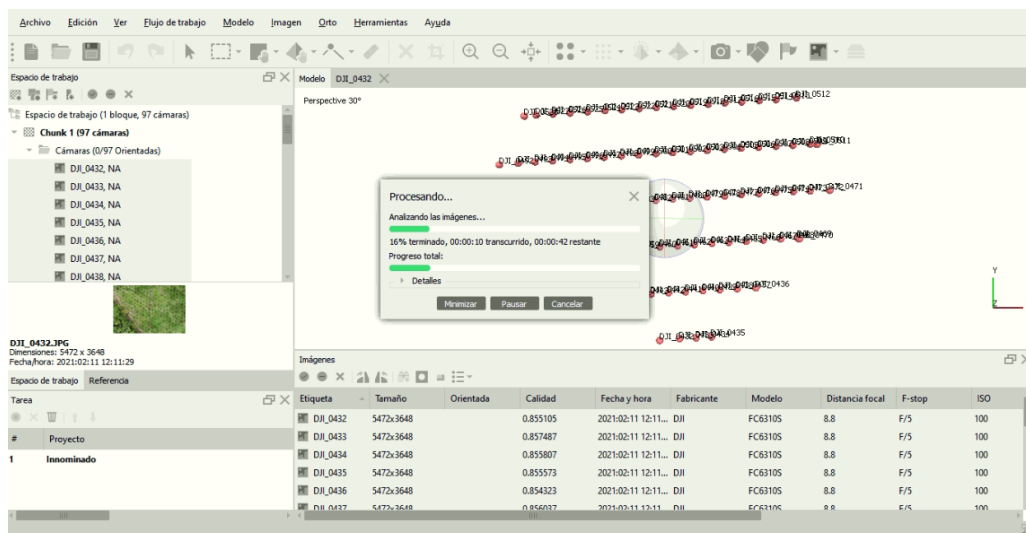


Figura 43: Visualización de avance del análisis.

- Finalmente, aparecerán valores de 0 a 1 para evaluar la calidad de cada imagen. Se recomienda trabajar con imágenes con calidad mayor a 0.4 (Fig. 44). Aquellas imágenes con una calidad inferior a 0.4 pueden ser deshabilitadas del procesamiento siempre y cuando existan otras imágenes cercanas que no permitan dejar espacios vacíos, ya que es preferible obtener un ortomosaico con partes borrosas, que obtener un mosaico con agujeros por falta de imágenes en algunas partes, o no obtener ningún producto debido a la falta de puntos en común.

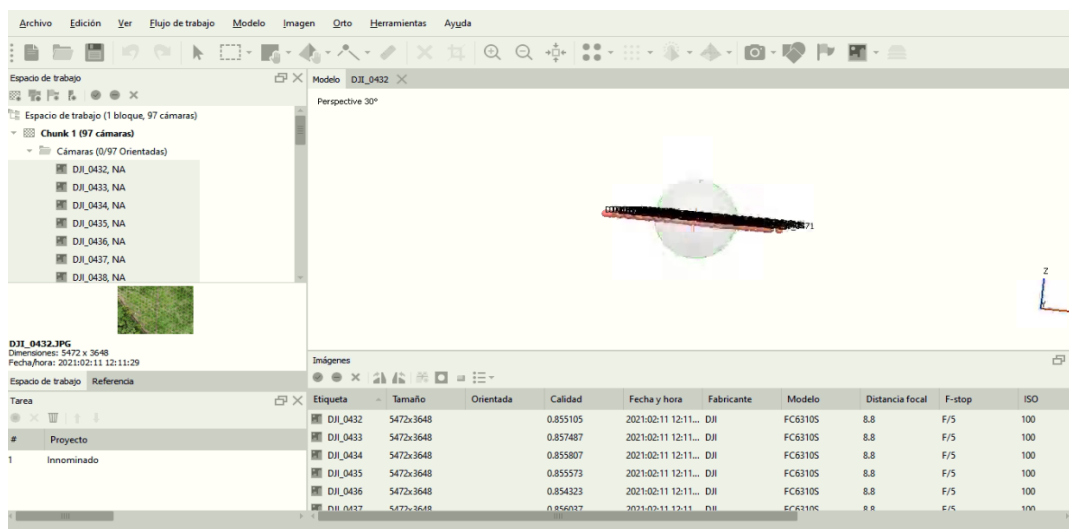


Figura 44: Visualización de la calidad de las imágenes analizadas.

## Generación de ortomosaicos

Para generar los ortomosaicos se adaptó la metodología descrita en el Manual de procesamiento de imágenes del PH4 para el mapeo de vegetación en Pix4dmapper Pro (Generación de ortomosaicos y DSMs) (Tagle *et al.*, 2019) para el procesamiento de las imágenes obtenidas en las plantaciones del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo.

### Procesamiento en Pix4Dmapper

Pix4D mapper es uno de los tantos software que permiten la generación de ortomosaicos mediante el uso de la técnica de “Estructura del Movimiento” – Structure from Motion en Inglés (SfM). Esta se basa la redundancia obtenida de múltiples imágenes con altos porcentajes de traslape, lo cual permite que se encuentren varios puntos en común en el bloque de imágenes, ubicando a las imágenes en un mosaico en donde se ha reducido el desplazamiento y distorsiones que se aparecen en una imagen por separado (Westoby *et al.*, 2012). Este software brinda una interfase amigable que permite obtener ortomosaicos a partir de 3 pasos básicos, los cuales son descritos a paso a paso en el Manual Manual de procesamiento de imágenes del PH4 para el mapeo de vegetación en Pix4dmapper Pro (Generación de ortomosaicos y DSMs) (Tagle *et al.*, 2019), a continuación se presenta un resumen de cada paso y las opciones recomendadas para el trabajo con plantaciones forestales.

#### 1. Procesamiento Inicial

En este paso se utilizarán las imágenes capturadas e insumos adicionales como los GCP donde se realiza la configuración del bloque fotogramétrico en donde el objetivo es determinar la información que recrea la escena en el momento de la captura de las imágenes (datos de orientación exterior e interior de la cámara y los puntos que relacionan las imágenes entre sí) utilizando una de las estrategias principales de procesamiento en fotogrametría que es la extracción y correlación de puntos comunes entre las imágenes para alinear lograr la alinear las imágenes.

#### 2. Nube de puntos y malla

Esta etapa tiene como objetivo la reconstrucción 3D de la escena a partir de la extracción de una nube de puntos. Aquí se va a determinar las coordenadas del terreno de cada uno de los puntos comunes extraídos de las imágenes y posteriormente determinar las coordenadas del terreno para cada uno de los píxeles en las imágenes a través de lo que se denomina densificación de nube de puntos.

La estrategia para la generación de puntos 3D consiste en determinar las coordenadas 3D de los puntos característicos extraídos en la primera etapa de procesamiento. En el área de visión por computador se presenta una estrategia llamada Structure from motion (SfM). Esta se basa en el ajuste en bloque y se diferencia de la fotogrametría estereoscópica en que la geometría de la escena y los parámetros de la cámara son calculados sin necesidad de tener datos iniciales, es decir, no requiere de una calibración previa de la cámara ni de GCP. En lugar de ello, la estrategia se basa en la redundancia obtenida de múltiples imágenes con altos porcentajes de traslape (Westoby *et al.*, 2012).

### **3. DSM, Ortomosaico e índices**

En esta etapa se presentan las estrategias para la generación del modelo digital del terreno a partir de la rasterización de la nube de puntos, y la ortorrectificación a partir del DSM generado, el cual permite la eliminación de la distorsión en las imágenes generada por el relieve.

En la sección **3. DSM, Ortomosaico e Índice**, en la pestaña “DSM and Orthomosaic” (Fig. 45): se seleccionan las siguientes opciones:

- En “RASTER DSM”, activar la casilla GeoTIFF como formato para exportación
- Debido a que se está trabajando en una zona con estructuras más definidas (campos de cultivo, plantaciones y aparecen caminos u otras estructuras) se recomienda seleccionar el método **“Inverse Distance Weighting”**
- Activar la casilla “Merge tiles” para obtener el DSM completo en una carpeta, de lo contrario, solo se exportará dividido en varias partes, lo cual es útil si el DSM es muy pesado, pues es más fácil cargarlo por partes en software como QGIS.
- En la opción Ortomosaico, activar la casilla “GeoTIFF” y “Merge tiles” para obtener el mosaico como un solo archivo “.tif” georeferenciado.

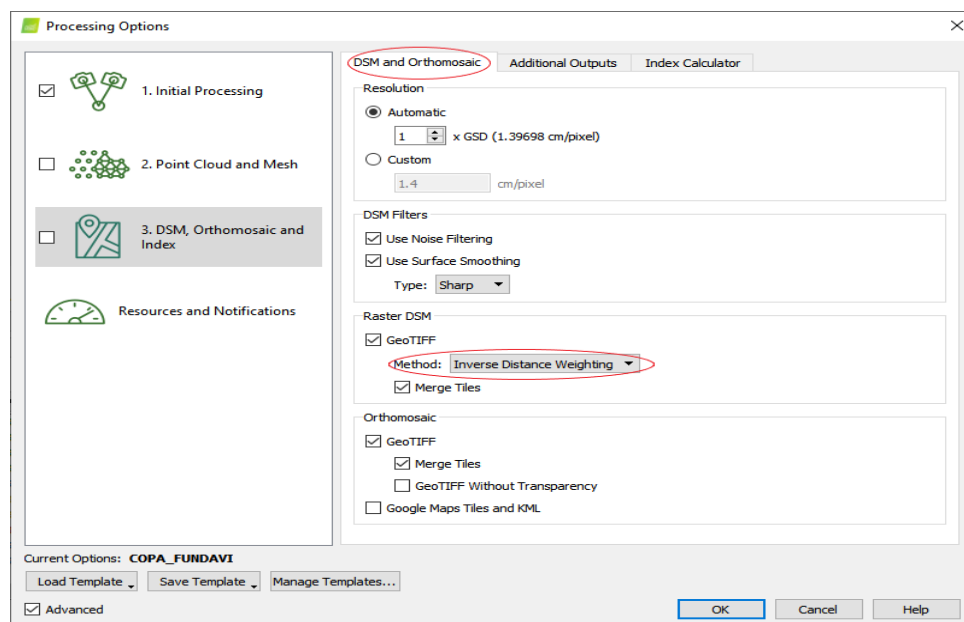


**Figura 45:** Selección de opciones para la creación del ortomosaico.

### Diferencia de procesamiento con el método de triangulación y el método IDW

En las áreas de estudio se identificaron tres tipos de plantaciones: Agroforestales, Macizo y Linderos. Estas áreas fueron sobrevoladas con parámetros altura de vuelo de 60 m y 90 m sobre la superficie

terrestre y con ángulos de inclinación cámara de 90 grados. Se realizaron pruebas durante el procesamiento utilizando dos métodos, el de triangulación (recomendado por Pix4D para vegetación densa/compleja de reconstruir) y el método Inverse Distance Weighting – IDW, para estructuras más definidas. A continuación, se muestran los resultados para cada método empleado.

En la Fig. 46, se muestra el ortomosaico de la zona de Pizarro, misión PIZ-04\_1 a 60 m de altura con ángulo de 90°, realizada con el método de Triangulación. El mosaico obtenido sale borroso.



**Figura 46:** Ortomosaico de la misión PIZ-04\_1 obtenido con el método de triangulación.

En la Fig. 47, se muestra el ortomosaico de la zona de Pizarro, misión PIZ-04\_1 a 60 m de altura con ángulo de 90°, el cual fue generado con el método IDW. Este método es recomendado para áreas con estructuras más definidas como, por ejemplo: palmeras, campo de cultivos, edificios, etc. Se observa que el ortomosaico se ve más claro, y las copas se muestran completas y mejor delimitadas.



**Figura 47:** Ortomosaico de la misión PIZ-04\_1 obtenido con el método IDW.

Esto se debe a que la opción de Triangulación trabaja con el método de triangulación de Delaunay, sirviendo para zonas planas y haciendo una reconstrucción menos precisa pero más rápida, requiriendo menos tiempo de procesamiento; mientras que la interpolación IDW requiere diez veces más tiempo (Pix4D) pues realiza más iteraciones para obtener los puntos a través de cálculos de promedio ponderado de las distancias, lo cual funciona en zonas donde hay estructuras mejor diferenciadas.

Por este motivo es que se recomienda trabajar con la interpolación IDW (como se mencionó anteriormente) para procesar las imágenes de las plantaciones.

## Edición de Nube de Puntos

Como se vio en el proceso de generación del ortomosaico, uno de los primeros pasos es la generación de la nube de puntos, la cual es la reconstrucción 3D del modelo sobrevolado y que, a partir de ella se generarán los modelos de elevación de superficie (DEM) o de terreno (DTM). Pix4D permite exportar esta nube en formato “.las”.

Debido a que esta nube de puntos se ha generado a partir de puntos en común encontrados en un conjunto de imágenes RGB, hay algunos puntos que no necesariamente han sido ubicados correctamente y esto puede afectar a la correcta generación de los DEM y DSM. Para remover estos puntos y “limpiar” a la nube de puntos se puede trabajar en el mismo software Pix4Dmapper, o se puede realizar este procedimiento en el software libre CloudCompare:

1. Insertar la nube de puntos del proyecto de la misión PIZ-04\_2.

- Seleccionar la misión que se quiere editar entre los proyectos generados en Pix4D (Fig. 48).
- Elegir la nube de puntos sin editar de la carpeta del proyecto. Este archivo tiene la extensión “.las”.

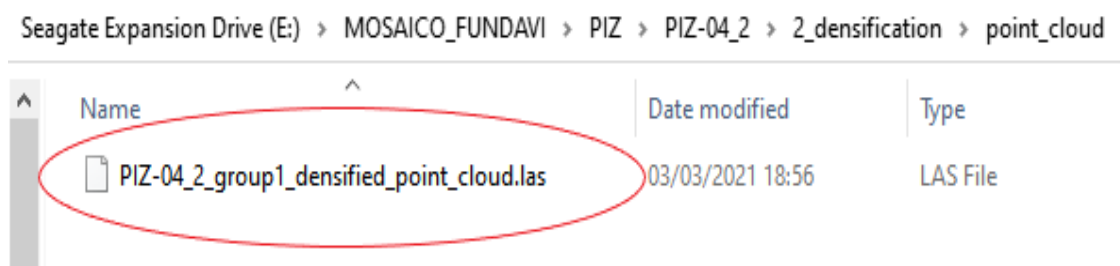


**Figura 48:** Selección del archivo con extensión “.las”.

2. Importar la nube de puntos.

- Importar la nube de puntos (“point cloud”) seleccionado al programa CloudCompare.

- Seleccionar la opción “Apply” y “Yes”, para aceptar y visualizar el archivo en el software (Fig. 49).

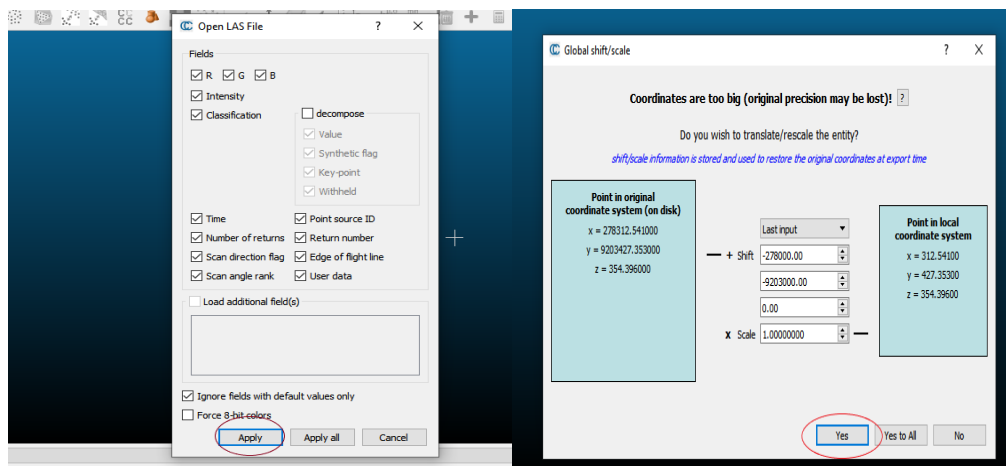


**Figura 49:** Visualización del archivo en el programa CloudCompare.

### 3. Editar la nube de puntos.

- Hacer clic en la nube de puntos de la misión.
- Elegir la opción “Segment”, para activar la edición (Fig. 50).

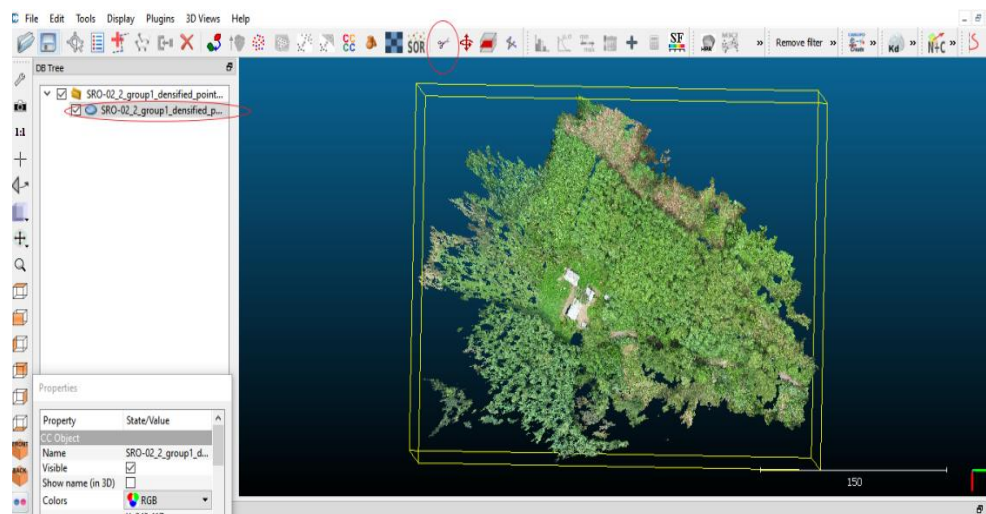


**Figura 50:** Activación de edición de nube de puntos.

#### 4. Corte de la nube de puntos.

- Seleccionar la opción “Pause segmentation” para delimitar y definir los contornos de la nube de puntos (Fig. 51).



**Figura 51:** Delimitación de los contornos de la nube de puntos.

- Elegir la opción “Segment Output” para cortar los contornos que no pertenecerán en la nube de puntos (Fig. 52).
- Realizar estos pasos hasta tener una nube de puntos editada de la zona de interés.

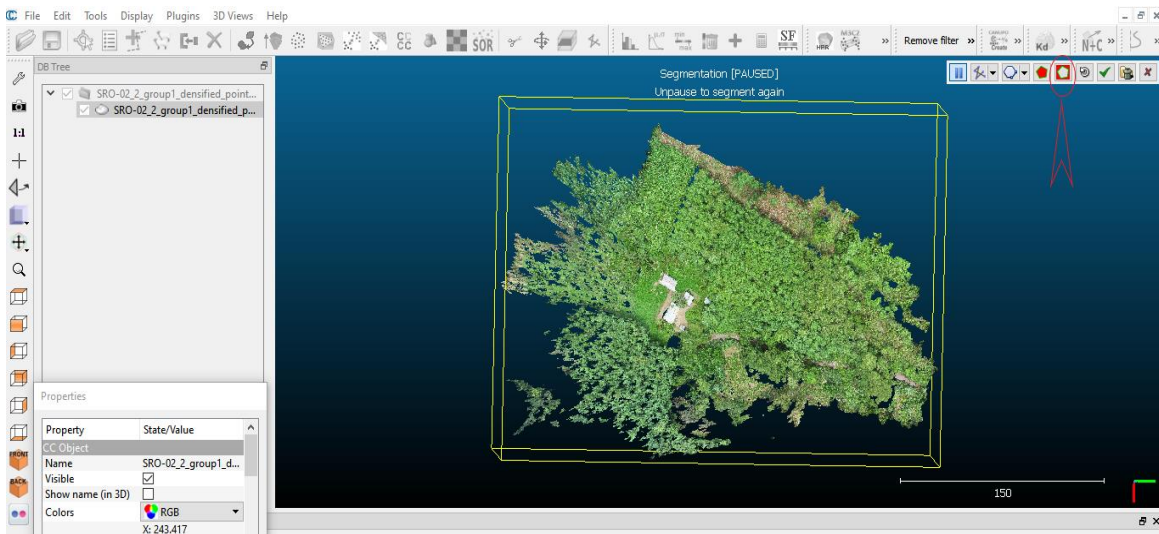


**Figura 52:** Corte de los contornos de la nube de puntos.

## 5. Guardar la nube de puntos editada.

- Seleccionar la opción “Confirm segmentation” para terminar la edición de la nube de puntos (Fig. 53).

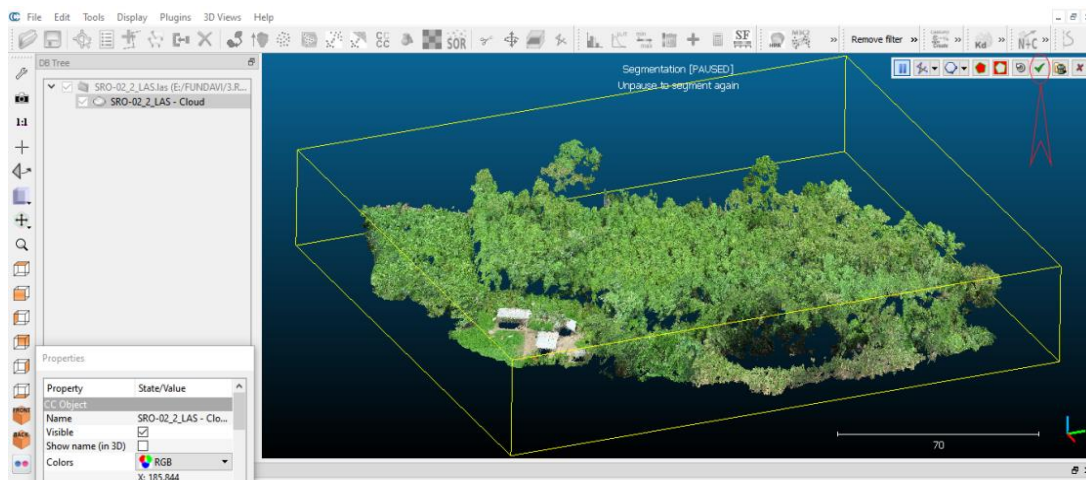


**Figura 53:** Visualización de nube de puntos editada.

- Seleccionar la nube de puntos editada y exportar en el formato de extensión “.las”.
- Seleccionar la opción “Save current entity”, elegir la carpeta donde se quiere guardar el archivo y hacer clic en “Save” (Fig. 54).

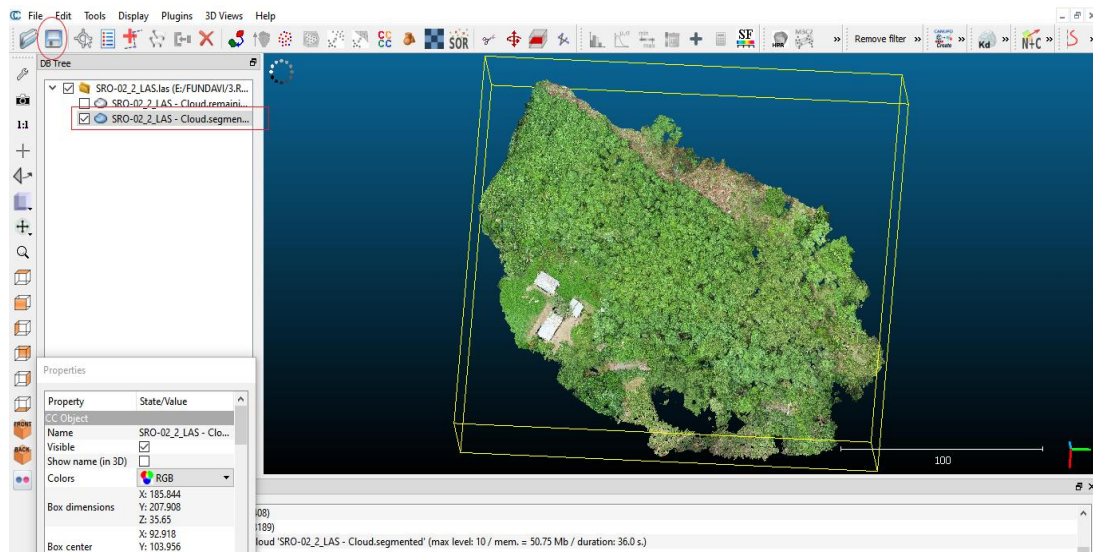


**Figura 54:** Selección de la carpeta donde se guardará la nube de puntos.

## Generación de Modelos de Altura de Copas (CHMs)

Para generar el CHM y tener valores de alturas, se debe sustraer al modelo de elevación de superficie, el relieve utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CHM} = \text{DSM} - \text{DTM}$$

Donde:

CHM: Canopy Height Model

DSM: Digital Surface Model o Modelo Digital de Superficie

DTM: Digital Terrain Model o Modelo Digital del Terreno

Este paso se puede realizar en el software libre QGIS, pero también se puede utilizar el script de R que se encuentra en el repositorio de Github (<https://github.com/xime377/UAV-classification>) (Fig. 55).

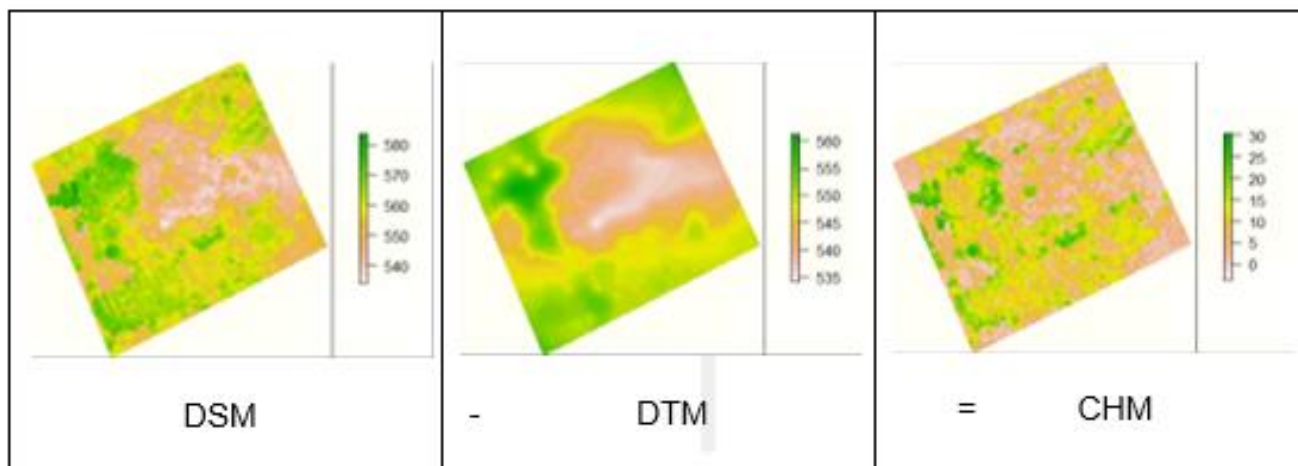


**Figura 55:** Cálculo del CHM para la misión LAM-01\_3.

## Estimaciones de Biomasa aérea

El diámetro a la altura del pecho (dap) es el parámetro a considerar para las estimaciones de biomasa de especies arbóreas según la metodología bajo estándares de VCS (Estándares de carbono verificado) y CCB (The Climate, Community & Biodiversity Alliance) empleando ecuaciones alométricas.

Una opción para poder hallar este parámetro, es realizando estimaciones en función del diámetro de copa obtenido de los ortomosaicos utilizando la metodología de Malleux (1970), el CHM y la ubicación tomada con un receptor GPS; ya que con una cámara RGB solo se pueden apreciar las copas, no el dap. El dap podría apreciarse en la nube de puntos, pero en zonas densas es complicado.

Cabe resaltar que el cálculo del CHM y la segmentación de las copas se debe realizar utilizando el programa R mediante los scripts que se encuentran en el repositorio de Github (<https://github.com/xime377/UAV-classification>), empleando la metodología de Tagle (2019). A continuación, se muestran los pasos para realizar las estimaciones de biomasa aérea en el siguiente flujograma (Fig. 56):

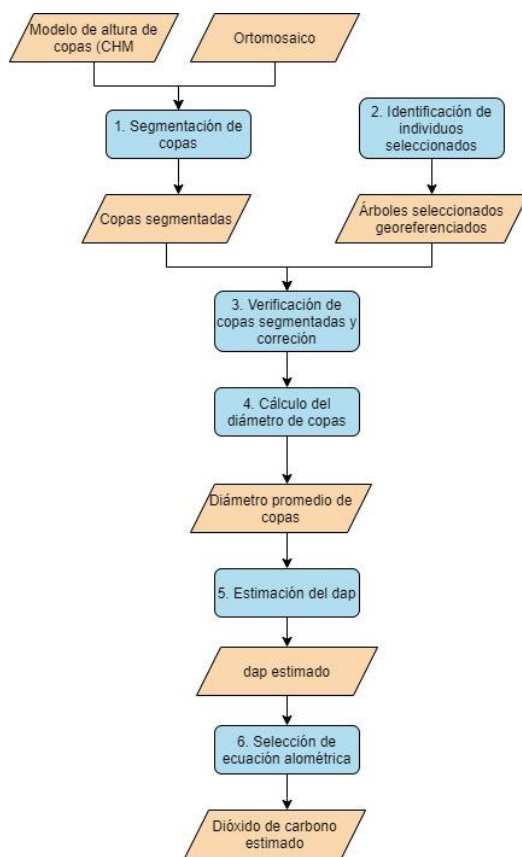


**Figura 56:** Flujograma para la estimación de biomasa aérea.

1. La segmentación de copas se debe realizar utilizando el paquete rgrass 7 que permite utilizar la implementación de las herramientas de GRASS GIS en R (la versión del programa, de preferencia debe ser la actualizada y estar descargada independientemente del QGIS). Emplear la función `i.segment` incorporando el uso del CHM para que los resultados se generen acorde a los estratos del área. Los parámetros `threshold` y `minsize` a utilizar son 4000 y 0.05 respectivamente, que son aquellos que se ajustan a los tipos de copas de árboles. Cabe mencionar que estos parámetros dependerán de la resolución empleada, en este caso los ortomosaicos utilizados poseen una resolución espacial entre 1 y 2 cm. La segmentación puede observarse en las Fig. 57 - 59.

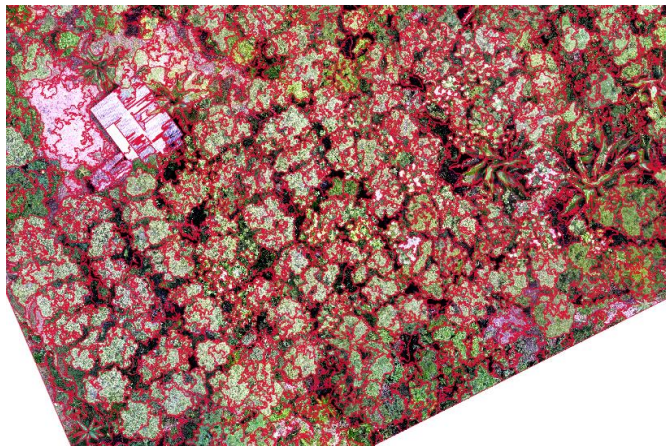


**Figura 57:** Segmentación de copas de la misión LAM-01\_3 de 60 m de altura sobre la estación base.

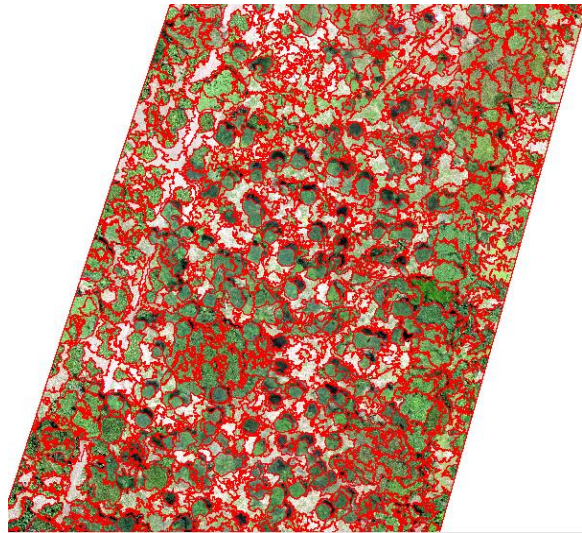


**Figura 58:** Segmentación de copas de la misión DDM-01\_2 de 60 m de altura sobre la estación base.

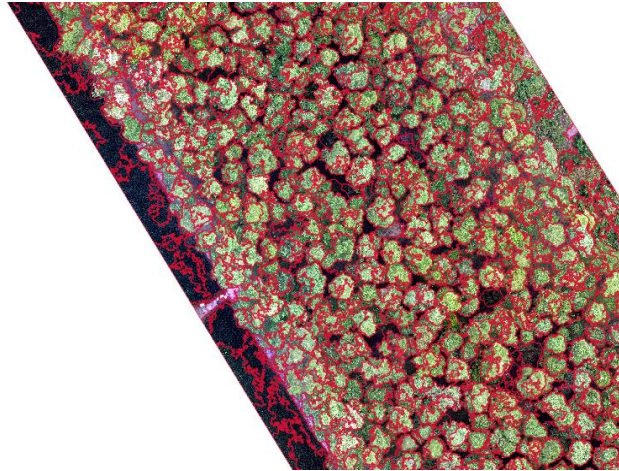


**Figura 59:** Segmentación de copas de la misión VILL-01\_6 a 60 m de altura sobre la estación base.

2. Identificar los individuos del estrato dominante que fueron seleccionados durante las evaluaciones en campo, utilizar las coordenadas UTM que se puedan obtener mediante la ubicación del receptor GPS y realizar algunos ajustes de ser necesario con referencia a las coordenadas relativas tomadas en campo.
3. Realizar una verificación por árbol para comprobar si la segmentación de copas fue correcta, caso contrario se debe corregir manualmente visualizando el ortomosaico.
4. El diámetro de copas se obtendrá utilizando la herramienta “Minimum Bounding Geometry”, esta genera un polígono convexo que circunscribe a la copa del árbol en sus puntos más distantes. También se debe crear un “campo” en la tabla de atributos para calcular el diámetro del polígono convexo (Fig. 60).



**Figura 60:** Polígono convexo (azul) que circunscribe la copa (rojo) de la misión DDM-01\_2.

5. Existen estudios que indican la relación entre el diámetro de copa y el dap. Para el bosque húmedo tropical, se reportó que esta relación era de 20 a 1, además que no varía significativamente entre clases diamétricas; así como para 15 especies de un bosque tropical en Puerto Rico. En el caso de

Perú se encontró que esta relación era de 19 a 1 para la especie *Cedrelinga cateniformis*, siendo esta relación directa y fuerte (Dawkins, 1963; Wadsworth, 2000; Angulo, 2015).

En el caso de especies latifoliadas como; *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juglans regia*, *Quercus robur*, etc., las especies forestales tienen mayores relaciones diámetro de copa-dap cuando son jóvenes, pero la proporción se reduce a medida que aumenta el dap, comenzando a estabilizarse en torno a 30 cm de dap (Hemery *et al.*, 2005).

Cabe detallar que debido a la relación funcional que existe entre el diámetro de copa y el dap se ha podido predecir densidades y áreas basales por hectárea, como en el caso de la especie *Swietenia macrophylla* (Mayhew y Newton, 1998).

Es por ello que se procederá a establecer la ecuación que determine la relación entre la variable dependiente (dap) y la independiente (diámetro promedio de copa) considerando que el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) se aproxime a 1 para cada especie y de ser necesario ajustarlo a la localidad, cabe resaltar que los valores a utilizar serán dap obtenido en campo y diámetro promedio obtenido a través de los ortomosaicos. Una vez encontrada la ecuación que se ajuste mejor, se podrá predecir el dap de cualquier individuo del cual se tenga el diámetro de copa. A continuación, se muestran las ecuaciones establecidas para las especies *Schizolobium amazonicum* “pino chuncho”, *Calycophyllum spruceanum* “capirona”, *Guazuma crinita* “bolaina blanca” (Fig. 61-63):

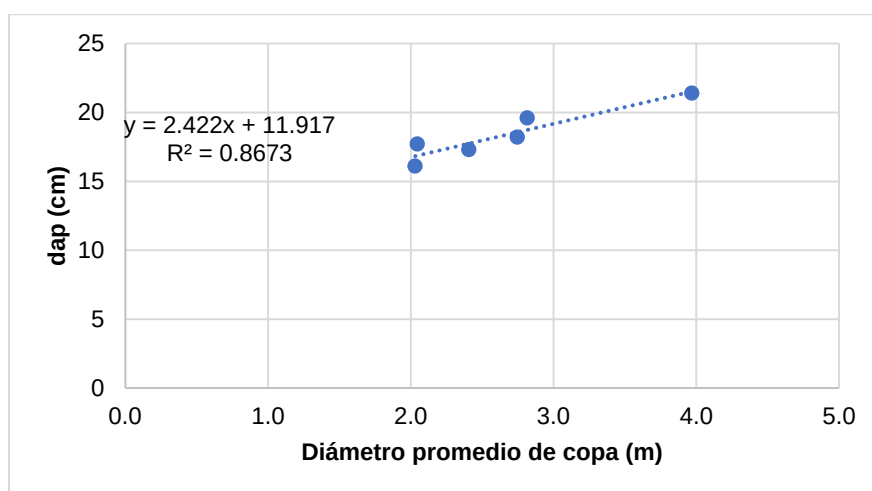


**Figura 61:** Gráfico de dispersión que muestra la relación entre el dap (cm) y el diámetro promedio de copa (m) para la especie *Schizolobium amazonicum* “pino chuncho”

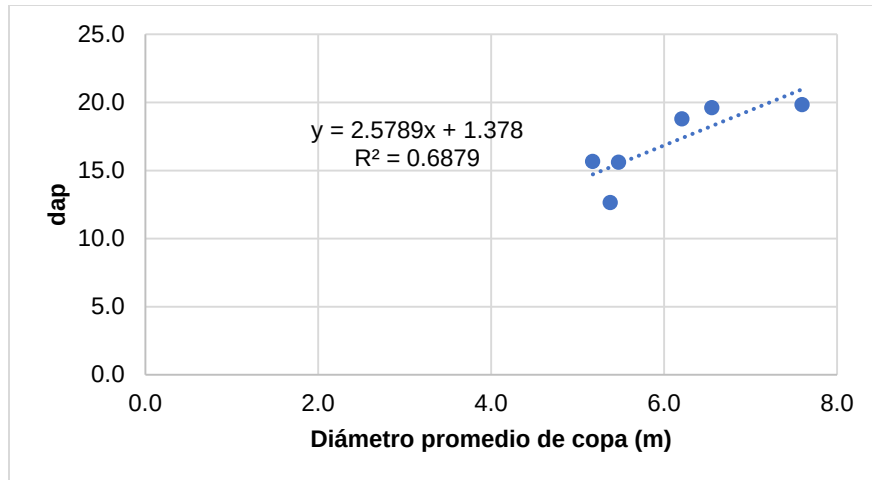


**Figura 62:** Gráfico de dispersión que muestra la relación entre el dap (cm) y el diámetro promedio de copa (m) para la especie *Calycophyllum spruceanum* "capirona".

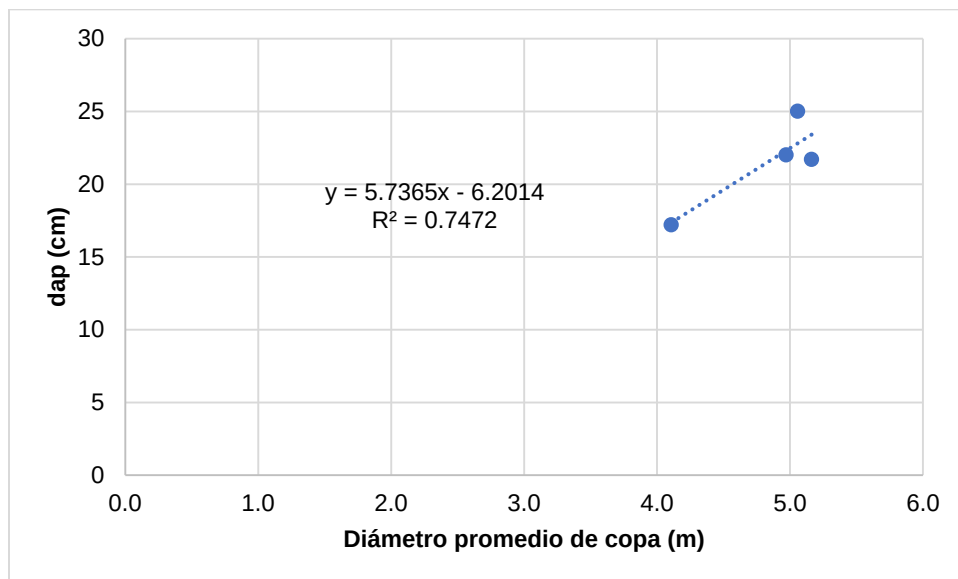


**Figura 63:** Gráfico de dispersión que muestra la relación entre el dap (cm) y el diámetro promedio de copa (m) para la especie *Guazuma crinita* "bolaina blanca".

- La estimación de la biomasa se realizará utilizando la metodología bajo estándares de VCS (Estándares de carbono verificado) y CCB (The Climate, Community & Biodiversity Alliance) empleando las siguientes ecuaciones para hallar el contenido de carbono sobre el suelo.

a) Ecuación alométrica para estimar biomasa aérea

La ecuación a utilizar va depender del rango en el que se encuentra el dap como se detalla a continuación:

- Si el dap  $\geq 1$  cm y dap  $< 5$  cm (Nascimento y Laurance, 2002)

$$AGLB = \exp(-1.7689 + 2.3770 \times \ln \ln (dap))$$

- Si el dap  $\geq 5$  cm y dap  $< 20$  cm (Higuchi et al., 1998):

$$AGLB = \exp(-1.754 + 2.665 \times \ln (dap)) \times 0.6$$

- Si el dap  $\geq 20$  cm:

$$AGLB = \exp(-0.151 + 2.170 \times \ln (dap)) \times 0.6$$

b) Proceso para estimar la cantidad de carbono capturado (Fig. 64):

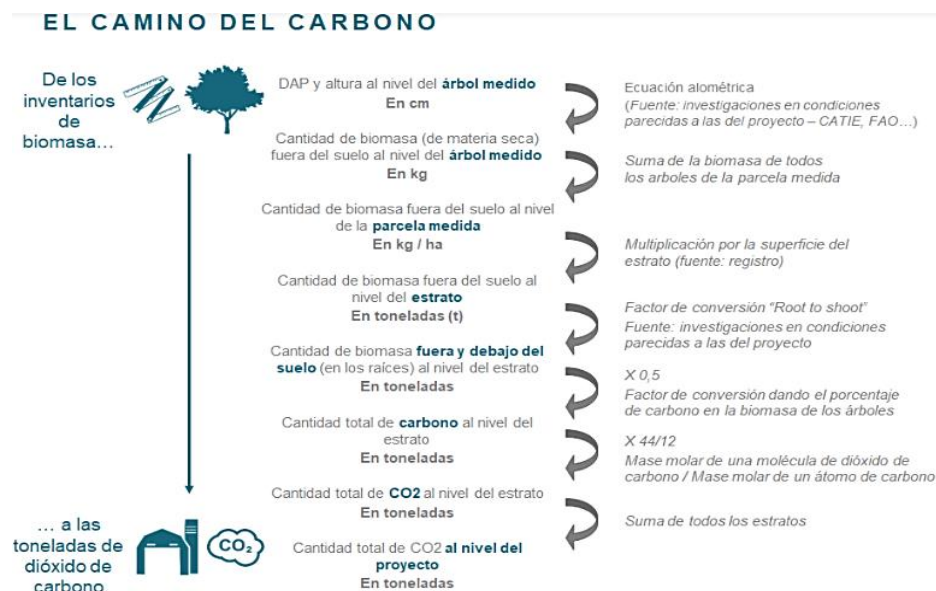


**Figura 64:** Flujograma del proceso de estimación de carbono almacenado en las plantaciones forestales y su equivalencia a CO<sub>2</sub>

Fuente: © PUR Projet

## Detección de áreas para restauración

Existe una gran necesidad de identificar áreas prioritarias para ser restauradas en la zona del Bosque Modelo Río Huayabamba – Abiseo. Esto debido a la degradación de los ecosistemas ocasionada por el uso poco sostenible de los recursos naturales en esta localidad.

Los RPAs son una herramienta útil para la detección de áreas prioritarias a través de la captura de imágenes de alta resolución espacial y videos aéreos debido a la facilidad con la que se pueden operar, logrando capturar información visual en poco tiempo y logrando alcanzar áreas remotas.

Para detectar visualmente áreas prioritarias para ser restauradas se recomienda sobrevolar a 150 m y 120 m de altura sobre la superficie terrestre con un ángulo de inclinación de cámara entre 45° a 90° para registrar videos en donde se pueda determinar la ubicación de este tipo de área. La ventaja de registrar videos, es que se tiene información continua del transecto que se vuela, y posteriormente se pueden exportar las imágenes que contengan la información de interés. Las Fig. 65-67 son un ejemplo de lo mencionado anteriormente.



**Figura 65:** Área 1 para restauración en el distrito de San José de Sisa, provincia El Dorado.



**Figura 66:** Área 2 para restauración en el distrito de San José de Sisa, provincia El Dorado.



**Figura 67:** Área para restauración en el distrito de Ledoy, provincia de Bellavista.

# Perspectivas del uso de RPAs para la evaluación de plantaciones forestales

El uso de los RPAs y de la fotogrametría aplicada a la evaluación de la vegetación, permite obtener información que, complementada con los sistemas de información geográfica e inventarios forestales, representan herramientas poderosas en la gestión de los recursos naturales. A continuación, se presenta un recuento de los costos y tiempos empleados, ventajas y desafíos en el uso de tecnologías RPAs para fines de evaluación de plantaciones y detección de áreas prioritarias para la restauración de zonas degradadas.

## Costos

Los costos necesarios para desarrollar evaluaciones con RPAs son evidentemente más altos que los costos para realizar la colecta de datos directamente en campo a través de inventarios; sin embargo, hay que tomar en cuenta que gran parte de estos costos incluyen costos fijos iniciales, debido al valor de los equipos, licencias de software para el procesamiento de las imágenes y capacitaciones, los cuales representan una inversión inicial (Tabla 1). Asimismo, es importante considerar que el uso de RPAs permite evaluar mayores extensiones en menor tiempo.

**Tabla 1:** Costos para desarrollar una evaluación con RPAs vs. Inventario forestal convencional.

| Tipo de evaluación               | Tipo de inversión    | Ítem                                               | Cantidad | Costo unitario (S/.) | Costo total (S/.) | Costo total (USD) |
|----------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------|----------|----------------------|-------------------|-------------------|
| RPAs                             | Materiales y equipos | RPA DJI Phantom 4 Pro                              | 1        | 6036                 | 6036              | 1630              |
|                                  |                      | Baterías para RPA                                  | 4        | 717                  | 2868              | 774               |
|                                  |                      | Memoria microSD 64 GB                              | 1        | 190                  | 190               | 51                |
|                                  |                      | Cargador múltiple                                  | 1        | 433                  | 433               | 117               |
|                                  |                      | Tablet                                             | 1        | 1100                 | 1100              | 297               |
|                                  |                      | Receptor GPS                                       | 1        | 1625                 | 1625              | 439               |
|                                  | Software             | Licencia perpetua Pix4Dmapper                      | 1        | 18064                | 18064             | 4990              |
|                                  | Capacitación         | Curso de Pilotaje                                  | 1        | 350                  | 350               | 98                |
|                                  |                      | Curso de Fotogrametría y procesamiento de imágenes | 1        | 3000                 | 3000              | 840               |
|                                  | Personal             | Piloto                                             | 1        | 350                  | 350               | 98                |
| Copiloto                         |                      | 1                                                  | 250      | 250                  | 70                |                   |
| Asistente                        |                      | 2                                                  | 80       | 160                  | 45                |                   |
| Inventario forestal convencional | Materiales y equipos | Clinómetro SUUNTO                                  | 1        | 900                  | 900               | 252               |
|                                  |                      | Cinta diamétrica                                   | 1        | 200                  | 200               | 56                |
|                                  | Personal             | Jefe de Brigada                                    | 1        | 100                  | 100               | 28                |
|                                  |                      | Asistente                                          | 2        | 80                   | 160               | 45                |

### Caso práctico:

Se necesita evaluar los árboles en plantaciones mixtas de 1 ha para coleccionar datos de DAP y altura y obtener la biomasa total por hectárea. Se consideran dos métodos, evaluación con RPAs e inventario forestal convencional (Tabla 2).

**Tabla 2:** Comparación entre costos y tiempo estimado bajo dos métodos de evaluación

| Fase                      | Actividad                  | RPAs | Inventario |
|---------------------------|----------------------------|------|------------|
| Colecta de datos          | Número de personas         | 3    | 3          |
|                           | Número de días efectivos   | 1    | 3          |
|                           | Costo total por ha*        | 680  | 780        |
| Procesamiento en gabinete | Número de personas         | 1    | 1          |
|                           | Número de días efectivos** | 2    | 2          |
|                           | Costo total por ha*        | 200  | 160        |
| Costo total (S/.)         |                            | 880  | 940        |
| Días efectivos            |                            | 3    | 5          |

\*Los costos no incluyen la adquisición de materiales, equipos, licencias y capacitaciones.

\*\*Número de días considerando que se tienen listas las calibraciones.

## Ventajas

Existen numerosas ventajas del uso de tecnologías RPAs en la evaluación de la vegetación y el monitoreo de los recursos naturales. Se mencionan algunas de las ventajas a continuación:

- Eficiencia en la evaluación de la vegetación para áreas extensas, esto implica ahorro de tiempo, menos personal de campo y trabajo logístico cuando se requiere acceder a zonas más lejanas.
- La generación de ortomosaicos y reconstrucción 3D tiene múltiples usos, el presente manual solo ha mencionado el cálculo de la biomasa por hectárea; pero al almacenar las imágenes obtenidas se empieza a recopilar data “histórica” que puede servir para diferentes usos adicionales; al volar más de una vez en diferentes fechas se empieza a tener un monitoreo del área, que también puede servir para evaluar fenología por citar sólo un ejemplo.
- Al contar con grabaciones de video, se logra monitorear de manera continua y sencilla a las áreas de interés.

## Limitaciones

Como cualquier tecnología, el uso de RPAs comerciales también presenta algunas limitaciones:

- El relativo costo elevado de los equipos y licencias, sin embargo; existe una amplia gama de RPAs con una buena relación costo – beneficio.
- Las imágenes RGB solo capturan información de la parte superior de la zona a evaluar, por lo que, en zonas con vegetación densa, no es posible tener datos fiables del relieve del suelo o adquirir información directa del dap, como cuando se utiliza sensores Lidar.
- El tiempo de duración de las baterías puede resultar una limitante, este problema puede resolverse teniendo al menos 4 baterías cargadas para realizar los sobrevuelos.

## Comparación de la fotogrametría con cámara RGB vs. Sensores LIDAR

El sistema LiDAR (que se compone del sensor LiDAR, un receptor GPS y una unidad de medida inercial) emite una intensa cantidad de haces de luz y mide el tiempo que tarda en ser detectado el reflejo de estos por el sensor. Esta información se utiliza para calcular rangos o distancias a objetos.

Las coordenadas 3-D (es decir, x, y, z o latitud, longitud y elevación) de los objetos de destino se calculan a partir de la diferencia de tiempo entre el pulso láser que se emite y devuelve, el ángulo en el que se emitió el pulso y la ubicación absoluta del sensor sobre la superficie de la Tierra o sobre ella (Petrie y Toth, 2008).

El uso de sensores LIDAR (Light Detecting And Ranging) incorporado a un RPA permite recopilar información tridimensional del ambiente. Las evaluaciones con sensores LIDAR permiten obtener datos de estructura de la vegetación directamente y estimar la biomasa aérea y carbono con alta precisión (Cao et al. 2019). Por este motivo, el uso de LIDAR es recomendable en zonas de vegetación densa.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo entre RPA con sensores LIDAR y sensores RGB (Tabla 3).

**Tabla 3:** Cuadro comparativo entre RPAs con sensores LIDAR y RGB.

| <b>RPA - LIDAR</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>RPA – cámara RGB</b>                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sensor activo.</b> No depende de buenas condiciones de luz.                                                                                                                                                                    | <b>Sensor pasivo.</b> Depende de condiciones de luminosidad específicas.                                                                                                |
| Puede ofrecer información sobre el terreno y perfil de bosque hasta en <b>áreas densamente boscosas</b> .                                                                                                                         | Solo proporcionará información de la parte superior del dosel (útil para <b>áreas ligeramente boscosas o áreas que no cuentan con dosel denso</b> ).                    |
| <b>Cobertura:</b> definida por el RPA (Los RPA de ala fija que transportan la carga útil del sistema LIDAR, pueden cubrir hasta 10 km <sup>2</sup> ).                                                                             | <b>Cobertura:</b> definida por el RPA. Hasta 10 km <sup>2</sup> .                                                                                                       |
| <b>Producto directo:</b> Nube de puntos dispersa (que da una sensación general de formas y contornos, pero no ofrece detalles contextuales).<br>Después de procesamiento: Nube de puntos filtrada, DTM, DSM                       | <b>Producto directo:</b> varias imágenes RGB<br>Después de procesamiento: Nube de puntos a color, DSM, DTM, Ortomosaico                                                 |
| <b>Precisión:</b> en general precisión horizontal limitada, dependerá de la precisión del propio LIDAR y de la calidad del sistema INS (IMU y GNSS). La precisión absoluta típica que puede esperar de un sistema LIDAR ligero en | <b>Precisión:</b> una cámara con sensor de alta resolución y calidad puede producir precisiones horizontales en el rango de 1 cm y precisiones de elevación en el rango |

| <b>RPA - LIDAR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>RPA – cámara RGB</b>                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| un RPA de ala fija es de aproximadamente 10 cm horizontal y 5 cm vertical.                                                                                                                                                                                                                                                                  | de 2 a 3 cm, acompañado de una adecuada superposición de imágenes.                                                                                                              |
| <b>Capacitación para el post-procesamiento:</b> requiere absolutamente experiencia más allá de una capacitación rápida o la lectura de un manual                                                                                                                                                                                            | <b>Capacitación para el post-procesamiento:</b> medianamente rápida y en base a los objetivos                                                                                   |
| <b>Flujo de trabajo:</b> Phoenix LIDAR Systems y Yellowscan son pioneras en un flujo de trabajo de procesamiento de datos optimizado. Sin embargo, hoy en día, el proceso generalmente implica varios pasos manuales y diferentes herramientas y conocimientos especializados para desarrollar una nube de puntos precisa.                  | <b>Flujo de trabajo:</b> Pix4D, Agisoft, Bentley CC, Propeller y Dronedeploy han optimizado los flujos de trabajo a lo largo de años de experiencia con gran cantidad de datos. |
| <b>Factores operativos y logísticos:</b> Requiere que todos sus componentes funcionen sincronizadamente (Pequeños errores en las mediciones del sensor pueden generar grandes errores en las salidas. O puede haber resultados que "parecen" correctos, pero no lo son). La única solución para los datos LIDAR erróneos es repetir vuelos. | <b>Factores operativos y logísticos:</b> Se pueden emplear técnicas como los GCPs para corregir errores geométricos o ediciones a las imágenes mejorar colores.                 |
| Alta productividad                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Menor productividad, superposición de imágenes (60-90%).                                                                                                                        |
| Pesados y voluminosos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Generalmente ligeros y pequeños.                                                                                                                                                |
| Sensor más sensible y delicado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Sensor más resistente.                                                                                                                                                          |
| Logística más compleja, mayor tiempo de trabajo en campo y gabinete.                                                                                                                                                                                                                                                                        | Logística más simple, sobrevuelos más sencillos, menos requerimientos computacionales.                                                                                          |
| Costos elevados (130 000 USD).                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Costos más accesibles y variados (1 500 USD a más).                                                                                                                             |
| Requiere de dos pilotos certificados y una licencia especial.                                                                                                                                                                                                                                                                               | Requiere de un piloto certificado.                                                                                                                                              |

**Fuente:** Cao et al. (2019), Wíngtra (2021).

En la evaluación de zonas de complejidad relativamente baja (p. e. plantaciones), las técnicas de fotogrametría usando un sensor RGB, además de ser más económicas pueden igualar los resultados

obtenidos con sensores LIDAR, es decir se puede obtener resultados semejantes teniendo en cuenta una adecuada planificación de las misiones y un cuidadoso procesamiento de las imágenes.

Por los motivos mencionados, se recomienda el uso de RPAs con cámaras RGB, debido a su costo, versatilidad, durabilidad y a que el contenido de este manual cubre los conocimientos necesarios para cumplir con la planificación de las misiones y el procesamiento de las imágenes sin problemas.

## Conclusiones y Recomendaciones

- El uso de RPAs constituye una herramienta útil para la colecta de imágenes de alta resolución, que, procesadas a través de técnicas fotogramétricas, calibración y validación de datos, permite estimar la biomasa aérea de una plantación y posteriormente determinar el carbono VCS.
- Es posible determinar el dap (diámetro a la altura del pecho) por especie seleccionando la ecuación con el coeficiente de correlación más próximo a 1 que explique la relación entre la variable independiente (diámetro de copa) y la variable dependiente (dap).
- En caso de no contar con sensores RTK, se recomienda el uso de 5 GCPs como mínimo es para obtener un ortomosaico con mejor precisión a nivel planimétrico y altimétrico, de preferencia usar un receptor GPS submétrico.
- Las imágenes capturadas durante los sobrevuelos deben pasar por una verificación en campo para asegurarnos de que se haya cubierto el área planificada para la misión y que las imágenes sean nítidas.
- Los parámetros de vuelo que proveen mosaicos de buena calidad para identificar las copas de los árboles en plantaciones forestales que posean hasta 30 m de altura promedio del dosel son: 60 m de altura sobre el nivel del suelo (AGL), traslape frontal y lateral de 90%, velocidad de captura de las imágenes media y ángulo de cámara de 90°.
- El método de interpolación para generar los mosaicos que más se ajusta en el caso de las plantaciones forestales es el IDW.
- La determinación del diámetro de copa de los árboles se puede realizar en plantaciones de baja y mediana densidad de siembra.

## Anexos

### Anexo 1: Requerimientos mínimos del sistema para usar Pix4Dmapper

| CARACTERÍSTICA                                                         | RECOMENDACIÓN                                                  |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Sistema operativo                                                      | Windows 8, 10, 64 bits                                         |
| Procesador                                                             | CPU quad-core o hexa-core Intel i7/Intel i9/Threadripper/Xeon/ |
| Tarjeta gráfica                                                        | GeForce GTX GPU compatible con OpenGL 3.2 y 2 GB de RAM        |
| Disco duro                                                             | SSD                                                            |
| <i>Proyectos pequeños (menos de 100 imágenes de 14 MP)</i>             | 8 GB de RAM, espacio libre de 15 GB en SSD                     |
| <i>Proyectos de tamaño mediano (entre 100 y 500 imágenes de 14 MP)</i> | 16 GB de RAM, espacio libre de 30 GB en SSD                    |
| <i>Proyectos grandes (más de 500 imágenes de 14 MP)</i>                | 32 GB de RAM, espacio libre de 60 GB en SSD                    |
| <i>Proyectos muy grandes (más de 2000 imágenes de 14 MP)</i>           | 64 GB de RAM, espacio libre de 120 GB en SSD.                  |

**Anexo 2: Check List antes de ir al campo para el RPA DJI Phantom Pro y mantenimiento de equipos**

| ITEM                                         | CANTIDAD |
|----------------------------------------------|----------|
| Phantom 4 PRO                                | 1        |
| Baterías LiPo 4S Intelligent flight 5870 mAH | 8        |
| Bolsas ziplock de 6.5 x 7"                   | 9        |
| Bolsas ziplock de 12 x 18"                   | 5        |
| Hélices negras                               | 6        |
| Hélices grises                               | 6        |
| Control remoto                               | 1        |
| iPad mini 32 Gb                              | 1        |
| Cover de iPad resistente al agua SURVIVOR    | 1        |
| Cover simple para iPad                       | 1        |
| Cargador Hub para 3 baterías                 | 1        |
| Cargador para RC y batería                   | 1        |
| Cargador para iPad                           | 1        |
| Cable conector para PH4                      | 1        |
| Micro SD ScanDisk 128 GB + adaptador         | 1        |
| Adaptador memoria SD                         | 1        |
| Mochila para PH4                             | 1        |
| Arnés control remoto                         | 1        |
| Protector de cámara                          | 1        |
| Kit de limpieza                              | 1        |
| Set de desarmadores                          | 1        |
| Binoculares                                  | 1        |
| Logbook                                      | 1        |
| Bolsa de fertilizante                        | 1        |
| Sílica gel (bolsitas de 100 g)               | 6        |

| KIT DE LIMPIEZA                        | ✓ |
|----------------------------------------|---|
| Brocha pequeña                         |   |
| Paños húmedos                          |   |
| Franela delgada (pañó limpia pantalla) |   |
| Hisopos                                |   |
| Pera de presión                        |   |
| Solución líquida de limpieza           |   |

**Anexo 4: Formato de registro de misiones (LOGBOOK).**

| ID Vuelo | Fecha     | Hora  | Piloto    | Copiloto  | Aeronave      | Nombre de la misión | Tipo de Misión | Velocidad /Dirección viento | Condición de iluminación | ID Batería | Batería inicial RPA | Batería inicio de misión RPA | Batería final de misión RPA | Batería final RPA | Batería inicial RC | Batería final RC | Altura sobre la estación base (m) | Ángulo de cámara (°) |
|----------|-----------|-------|-----------|-----------|---------------|---------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|------------|---------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------|
|          | dd/mm/aaa | hh:mm | Iniciales | Iniciales | Nombre/ID     |                     |                | m/s / dir                   |                          |            | V0 (%)              | V1 (%)                       | V2 (%)                      | Vf (%)            | V0 (%)             | Vf (%)           |                                   |                      |
| 79       | 5/22/2018 | 13:33 | XTC       | JFN       | Phantom 4 Pro | ARA-01-01           | RGB            | > 5                         | PN                       | 2          | 99                  | 96                           | 50                          | 45                | 90                 | 85               | 100                               | 90                   |

**Fuente:** Protocolo para Sobrevuelos con RPAs Phantom 4 Pro y Phantom 4 RTK (Tagle et al., 2021).

**Anexo 5: Instructivo de vuelo para el Phantom 4 Pro**

| ACTIVIDAD                                                         |   |
|-------------------------------------------------------------------|---|
| ANTES DE PRENDER RPA                                              | √ |
| Colocar tablero de despegue en zona segura                        |   |
| Remover seguro del gimbal de la cámara                            |   |
| Colocar hélices                                                   |   |
| Asegurar que hélices estén sujetas                                |   |
| Revisar batería RPA                                               |   |
| Revisar batería RC                                                |   |
| Alinear antenas del RC (en paralelo)                              |   |
| Revisar batería iPad                                              |   |
| Revisar SD card, suficiente memoria                               |   |
| iPad conectada a RC                                               |   |
| Prender RC                                                        |   |
| ****Prender PH4****                                               |   |
| UNA VEZ PRENDIDO                                                  | √ |
| Abrir DJI go para verificar conexión con PH4                      |   |
| Revisar satélites de GPS                                          |   |
| Colocar RC en función modo P                                      |   |
| Abrir Pix4D capture para planear/ seleccionar la misión           |   |
| Revisar ángulo de la cámara (90° para ortomosaicos, 45° tomas 3D) |   |
| Revisar altura de vuelo y traslape de imágenes                    |   |
| Cerrar DJI go                                                     |   |
| Revisar que el PH4 tenga dos luces verdes y dos rojas             |   |
| Personas alejadas suficientemente                                 |   |
| ****Despegar****                                                  |   |

Anexo 6: Requerimientos mínimos del sistema para usar QGIS, R y RStudio.

| Característica           | Recomendación                                                                                      |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sistema Operativo</b> | Windows 10 64 bits-y/o Linux                                                                       |
| <b>Procesador</b>        | Intel Core i5 o i7                                                                                 |
| <b>Memoria RAM</b>       | 16 GB a más                                                                                        |
| <b>Tarjeta gráfica</b>   | al menos 4 GB RAM                                                                                  |
| <b>Disco Duro</b>        | SSD de 480 GB y almacenamiento en la nube (Google Drive, Dropbox, OneDrive), por ejemplo, de 2 TB* |

## Referencias bibliográficas

- Agisoft. 2021. Agisoft Metashape. Recuperado de: <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>

- Angulo, J. 2015. Relación entre el diámetro de copa y del fuste de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, en la zona de Atalaya, región Ucayali. Recuperado de: <http://repositorio.unia.edu.pe/bitstream/unia/71/1/TESIS5.pdf>
- ArcGis Pro. 2021. Introducción a la representación cartográfica de ortofotos. Recuperado de: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/introduction-to-ortho-mapping.htm>
- ArduPilot Dev Team. 2020. Software Mission Planner. Recuperado de: <https://ardupilot.org/planner/>
- Cao, L.; Liu, H.; Fu, X.; Zhang, Z.; Shen, X.; Ruan, H. 2019. Comparison of UAV LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry Point Clouds for Estimating Forest Structural Attributes in Subtropical Planted Forests. *Forests*, 10, 145. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/f10020145>
- Carpio, M.; Torre, J. y Fuentes, J. 2017. Prospección de recursos de rocas y minerales industriales en la región San Martín, INGEMMET. Boletín, Serie B: *Geología Económica*, 39, 349 p.
- Colomina, I. y Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS*, 92, 79-97. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Dawkins, C. 1963. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. *Commonwealth Forestry Review*, 42(2):318-333.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2015. Requisitos para las Operaciones de Sistemas de Aeronaves pilotadas a distancia (NTC 001-2015).
- DJI. 2020. Phantom 4 Pro/ Pro + Manual del usuario. Recuperado de: [https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4\\_pro/20200108/Phantom\\_4\\_Pro\\_Pro\\_Plus\\_Series\\_User\\_Manual\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20200108/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_EN.pdf)
- DroneDeploy. App DroneDeploy. Recuperado de: <https://www.dronedeploy.com/product/mobile/>
- Escalante, J.; Cáceres, J. y Porras, H. 2016. Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119–140. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-921X2016000400009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2016000400009)

- González, P. 2015. Levantamiento mediante GPS de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la universidad en el mismo sistema de coordenadas. Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4651/pfc5890.pdf>
- Hemery, E.; Savill, S. y Pryor, N. 2005. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management*, 215(1-3):285-294.
- Higuchi, N.; Santos, J.; Ribeiro, L.; Minette, L. y Biot, Y. 1998. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da amazônia brasileira. *Acta amazônica*, 28(2): 153-166.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). 2015. Manual of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Recuperado de: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/4053.pdf>
- Jiménez-Jiménez, S.; Ojeda-Bustamante, W.; Ontiveros-Capurata, R.; Flores-Velázquez, J.; Marcial-Pablo, M. y Robles-Rubio, B. 2017. Cuantificación del error de modelos digitales de terreno derivados de imágenes adquiridas con UAV. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 9(2), 85-100. Recuperado de: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.007>
- Malleux, J. 1970. Estudio de la relación dap con el diámetro de copa en un bosque húmedo sub tropical. *Revista forestal del Perú*, 4 (1-2). Recuperado de: <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1089>.
- Mayhew, J. y Newton, F. 1998. *Silviculture of mahogany*. Nueva York, USA. CABI. 367p.
- Nascimento, H. y Laurance, W. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 168(1-3):311-321.
- Neitzel, F. y Klonowski, J. 2011. Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *ISPRS*, 38, 1-6. Recuperado de: [http://143.93.114.105/sites/default/files/public/data/uav-g\\_neitzel\\_klonowski.pdf](http://143.93.114.105/sites/default/files/public/data/uav-g_neitzel_klonowski.pdf)
- Nex, F. y Remondino, F. 2013. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- Petrie, G. y Toth, C. 2008. Introduction to laser ranging, profiling, and scanning en, *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press (2008), 6–24
- Pix4D. 2021. App Pix4D Capture. Recuperado de:

<https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dcapture>

- Pix4D. 2018. Do more GCPs equal more accurate drone maps? Recuperado de: <https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps>
- Proyecto de Reforestación y Captura de Carbono Jubilación Segura. 2017. Modelos Agroforestales de Jubilación Segura.
- Sharma, J. (Ed.). 2019. Applications of Small Unmanned Aircraft Systems: Best practices and case studies. Recuperado de: <https://books.google.nl/books?id=0UW4DwAAQBAJ&lpg=PA279&dq=good%20practices%20flying%20uavs%20science%20direct&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>.
- SkyDroid LTD. 2021. App Tower
- Stott, E.; Williams, R. y Hoey, T. 2020. Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an rtk-gnss unmanned aerial vehicle and sfm photogrammetry. *Drones* 4(3) 1-21. Recuperado de: 10.3390/drones4030055.
- Tagle, X. 2017. Study of radiometric variations in Unmanned Aerial Vehicle remote sensing imagery for vegetation mapping, Lund University.
- Tagle, X.; Di Liberto, S. y Benavides, J. 2019. Manual de procesamiento de imágenes del PH4 para el mapeo de vegetación en Pix4dmapper Pro (Generación de ortomosaicos y DSMs). Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/339028663\\_Manual\\_del\\_procesamiento\\_de\\_imagenes\\_del\\_PH4\\_para\\_el\\_mapeo\\_de\\_vegetacion\\_en\\_Pix4Dmapper\\_Pro\\_Generacion\\_de\\_ortomosaicos\\_y\\_DSMs](https://www.researchgate.net/publication/339028663_Manual_del_procesamiento_de_imagenes_del_PH4_para_el_mapeo_de_vegetacion_en_Pix4Dmapper_Pro_Generacion_de_ortomosaicos_y_DSMs)
- Tagle, X.; Falen, L.; Bartholomeus, H.; Cárdenas, R.; Flores, G.; Herold, M.; Coronado, E.N.H. y Baker, T.R. 2019. Identifying and Quantifying the Abundance of Economically Important Palms in Tropical Moist Forest Using UAV Imagery. *Remote Sens.*, 12, 9.
- Tagle, X.; Flores, G.; Di Liberto, S.; Dávila, A.; Del Águila, C. y Falen, L. 2021. Protocolo para sobrevuelos con RPAs Phantom 4 Pro y Phantom 4 RTK. Proyecto: “Nuevos enfoques para comprender el estado de la biodiversidad y contribuir con el bienestar social: Estudio de la distribución y degradación de *Mauritia flexuosa* en la Amazonía”.
- Vallhonrat, L. 2017. Efectos de las interferencias electromagnéticas en la operativa de drones. Universidad politécnica de Catalunya. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108590/memoria.pdf?sequence=1&isAll>

owed=y

- Villanueva, J. y Blanco, A. 2019. Optimization of Ground Control Point (GCP) Configuration for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) survey using Structure From Motion (SFM). *ISPRS*, 42, 167-174. Recuperado de: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019>
- Wadsworth, F. 2000. Producción forestal para América tropical. Manual de Agricultura 710-S. 603 p.
- Westoby, M.; Brasington, J.; Glasser, N.; Hambrey, M. y Reynolds, J. 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Wingtra. 2021. Drone photogrammetry vs. LIDAR: What sensor to choose for a given application. Recuperado de: <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>