



**Generación de cartografía a detalle de aproximadamente 200 Ha a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), como insumo topográfico para proyectos de ingeniería civil**

Mena Castro, Robinson Ernesto y Ordóñez Ríos, María del Carmen

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

M.Sc. Leiva González, César Alberto

M.Sc. Sinda González, Izar

10 de septiembre del 2021



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS\_MENA\_ORDÓÑEZ.docx (D112251658)  
**Submitted:** 9/8/2021 8:11:00 PM  
**Submitted By:** jc.altamiranoc@uta.edu.ec  
**Significance:** 1 %

Sources included in the report:

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/15493/1/Jorge%20Armando%20Cuque%20Casta%C3%B1eda.pdf>  
<https://core.ac.uk/download/pdf/72045983.pdf>

Instances where selected sources appear:

2

Firma:



**Ing. Leiva González, César Alberto M. Sc**

C. C: 1715416689

Firma:



**Ing. Sinde González, Izar M. Sc**

C. C: 1756491278



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el trabajo de integración curricular, “**Generación de cartografía a detalle de aproximadamente 200 Ha a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), como insumo topográfico para proyectos de ingeniería civil**” fue realizado por los señores **Mena Castro, Robinson Ernesto y Ordóñez Ríos, María del Carmen**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual nos permitimos acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

**Sangolquí, 10 de septiembre del 2021**

Firma:



**Ing. Leiva González, César Alberto M. Sc**

C. C: 1715416689



**Ing. Sinda González, Izar M. Sc**

C. C: 1756491278



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Nosotros, **Mena Castro, Robinson Ernesto y Ordóñez Ríos, María del Carmen**, con cédulas de ciudadanía n° 050425157-0 y 070518182-4, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Generación de cartografía a detalle de aproximadamente 200 Ha a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), como insumo topográfico para proyectos de ingeniería civil”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 10 de septiembre del 2021**

Firma:

**Mena Castro, Robinson  
Ernesto**

C. C: 050425157-0

Firma:

**Ordóñez Ríos, María del  
Carmen**

C. C: 070518182-4



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros **Mena Castro, Robinson Ernesto y Ordóñez Ríos, María del Carmen**, con cédulas de ciudadanía n° 050425157-0 y 070518182-4, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Generación de cartografía a detalle de aproximadamente 200 Ha a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), como insumo topográfico para proyectos de ingeniería civil”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 10 de septiembre del 2021**

Firma:

.....  
**Mena Castro, Robinson  
Ernesto**

C. C: 050425157-0

Firma:

.....  
**Ordóñez Ríos, María del  
Carmen**

C. C: 070518182-4

## **Dedicatoria**

*A mis padres quienes me brindaron su apoyo y han hecho que se pueda cumplir esta meta. A mi padre que siempre con su sabiduría me aconseja y me motiva cada día a ser mejor. A mi madre la mejor persona que Dios puso para guiarme y darme aliento en las situaciones adversas.*

**Robinson Mena.**

*Dedico este trabajo a mis padres y hermanos, que han sido mi apoyo y fortaleza en todo momento. A mis amigos, que me han acompañado durante este camino. A mis docentes por su aporte a mi formación. A mí, por cumplir esta meta con valentía y dedicación, siendo siempre una persona de bien y con valores.*

**María del Carmen Ordóñez.**

## **Agradecimientos**

*Agradecer primeramente a Dios, ya que sin lugar a duda él me ha dado la fuerza, la motivación y la sabiduría para cumplir esta meta. También a mi familia que ha sido un pilar fundamental en mi vida, y finalmente agradecer también a nuestro tutor el Ingeniero Cesar Leiva por guiarnos en el presente proyecto.*

**Robinson Mena.**

*Agradezco a Dios por guiarme y acompañarme durante este camino, por darme fuerzas en los momentos más difíciles y ayudarme a cumplir todos mis logros. A mi madre Nely, porque a pesar de que nos separan miles de kilómetros, ella siempre está presente a mi lado con su apoyo incondicional. A mi padre Franklin, por su ayuda y protección. A mis tíos y primos, Raquel, Julio, Diego y Paola por su cariño durante mi progreso. A mi hermano Anthony, por siempre inspirarme a ser mi mejor versión. A mi hermana Aroa, por ser mi motor y la luz en mi vida. A mis amigos Giuli, Paulo, Robin, Paulo, Dani, Diego, Andree, Cami, Vale, Kevin, Joss, Liz y Alexander por hacer esta etapa foránea de mi vida más amena con su ánimo, sus risas y ocurrencias. A mis compañeros, por formar parte de este proceso. A mis docentes, por su paciencia, dedicación y compromiso. A nuestro tutor Ing. César Leiva por ser nuestro mentor en este trabajo.*

**María del Carmen Ordóñez.**

## Índice de contenidos

Resumen.....	12
Abstract.....	13
Capítulo I: Introducción.....	14
Antecedentes.....	14
Planteamiento del problema .....	15
Justificación e importancia .....	16
Área de influencia .....	17
Ubicación de la zona de estudio.....	17
Ubicación política .....	17
Objetivos generales y específicos .....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos.....	19
Meta.....	19
Hipótesis.....	19
Capítulo II: Marco teórico.....	20
Cartografía.....	20
Sistemas de referencia .....	20
Sistemas de referencia terrestres (TRS- Terrestrial Reference System).....	20
Sistema de referencia World Geodetic System 1984 (WGS84) .....	20
Sistemas de referencia celestes (CRS- Celestial Reference System) .....	21
Fotogrametría .....	21
Elementos de fotogrametría.....	22
Clasificación de la fotogrametría.....	23
Imagen digital .....	24
Características de la imagen digital .....	25
Resolución .....	25
Dimensión .....	26
Proceso fotogramétrico.....	27
Productos fotogramétricos .....	29
Planos vectoriales obtenidos de la restitución .....	29
Modelos digitales del terreno (MDT).....	29
Ortofotografía .....	31
Sistemas autónomos no tripulados (Uas O Uav's En Inglés) .....	31

UAV WingtraOne .....	32
Validación de producto fotogramétrico .....	32
Exactitud posicional .....	33
Error medio cuadrático .....	33
Exactitud de posición horizontal .....	34
Exactitud de posición vertical .....	34
Capítulo IV: Metodología .....	35
Generalidades .....	35
Técnica de recolección de datos fotogramétricos.....	37
Vuelo fotogramétrico .....	37
Establecimiento de puntos de control terrestre .....	38
Procesamiento.....	40
Procesamiento inicial.....	41
Obtención de la nube de puntos y malla.....	43
Obtención del modelo digital de la superficie (MDS), ortomosaico e índices .....	44
Depuración de la nube de puntos .....	45
Digitalización 2D .....	48
Control de calidad de la cartografía de detalle generada .....	48
Capítulo V: Análisis de los resultados.....	53
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	58
Conclusiones .....	58
Recomendaciones .....	59
Bibliografía .....	61
Anexos .....	63

### Índice de tablas

Tabla 1. <i>Coordenadas de ubicación de la zona de estudio</i> .....	17
Tabla 2. <i>Coordenadas de los puntos de control terrestre</i> .....	39
Tabla 3. <i>Precisiones de los puntos de control terrestre</i> .....	39
Tabla 4. <i>Coordenadas obtenidas con RTK y con la ortofotografía de cada punto de chequeo</i> .....	49
Tabla 5. <i>Diferencias y errores posicionales obtenidos en cada punto de chequeo</i> .....	56
Tabla 6. <i>Exactitud posicional horizontal y vertical</i> .....	57

## Índice de figuras

Figura 1. <i>Ubicación política de la zona de estudio</i> .....	18
Figura 2. <i>Sistema WGS84</i> .....	21
Figura 3. <i>Diagrama básico de fotogrametría</i> .....	23
Figura 4. <i>Imagen digital</i> .....	25
Figura 5. <i>Imagen digital en RGB</i> .....	25
Figura 6. <i>Representación de GSD</i> .....	26
Figura 7. <i>Orientación interna</i> .....	27
Figura 8. <i>Orientación relativa</i> .....	28
Figura 9. <i>Orientación absoluta</i> .....	28
Figura 10. <i>MDE</i> .....	30
Figura 11. <i>MDS</i> .....	31
Figura 12. <i>Dron WingtraOne</i> .....	32
Figura 13. <i>Diagrama de flujo de trabajo</i> .....	35
Figura 14. <i>Plan de vuelo del UAV</i> .....	38
Figura 15. <i>Procesos secundarios en Pix4D</i> .....	41
Figura 16. <i>Gestor de puntos de control de Pix4D con precisiones</i> .....	43
Figura 17. <i>Nube de puntos generada en Pix4D</i> .....	44
Figura 18. <i>Nube de puntos clasificada en Global Mapper (puntos del terreno)</i> .....	47
Figura 19. <i>Modelo digital del terreno de la hacienda IASA el Prado</i> .....	47
Figura 20. <i>Determinación de puntos de chequeo, método GPS RTK</i> .....	49
Figura 21. <i>Distribución de puntos de chequeo</i> .....	51
Figura 22. <i>Cartografía de detalle generada a través de fotogrametría de corto alcance correspondiente al IASA I, hacienda El Prado</i> .....	53
Figura 23. <i>Perfil longitudinal</i> .....	54
Figura 24. <i>Perfiles transversales</i> .....	55

## Resumen

La topografía es un campo de la Ingeniería que se encarga de la representación gráfica de la superficie de un terreno, de manera que se pueda planificar el desarrollo de una obra civil. Las técnicas de medición han ido evolucionando, pasando desde métodos tradicionales como la cinta métrica, a herramientas como el teodolito y actualmente a equipos de precisión como las estaciones totales, los GNSS y los UAV. De la misma forma, la tecnología ha permitido que los rendimientos en topografía aumenten de forma exponencial, esto gracias a las técnicas fotogramétricas no convencionales de corto alcance (UAV). En el presente proyecto se pretende transmitir los beneficios de las técnicas no convencionales de topografía, utilizando fotogrametría de corto alcance con UAV, realizando un levantamiento topográfico de tipo poligonal de al menos 200 hectáreas. De esta forma se pudo evidenciar los rendimientos que estas técnicas pueden ofrecer. Finalmente se puso en evidencia la potencialidad de los UAV en la generación de modelos digitales de terreno para la obtención de curvas de nivel, y de cartografía a detalle geoméricamente correcta, esto con el fin de comprobar las bondades del método fotogramétrico, mediante la verificación de su exactitud posicional, a través de la norma de la NSSDA.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **FOTOGRAMETRÍA**
- **CARTOGRAFÍA A DETALLE**
- **UAV**
- **LEVANTAMIENTO CON DRON**

## **Abstract**

Topography is a field of engineering that is responsible for the graphic representation of the surface of a land, so that the development of a civil work can be planned. Measurement techniques have evolved, moving from traditional methods such as tape measure, to tools such as theodolite and currently to precision equipment such as total stations, GNSS and UAVs. In the same way, technology has allowed yields in topography to increase exponentially, thanks to unmanned aerial vehicle (UAV's) techniques. These contain sensory devices that allow obtaining high definition photographs and videos, which through the digital photogrammetric process can be orthorectified and thus generate aerial measurements of urban or rural spaces, base cartography on large scales and form mosaics. This project aims to convey the benefits of unconventional surveying techniques, using short-range photogrammetry with UAV, performing a polygonal topographic survey of at least 200 Ha. In this way it was possible to show the yields that these techniques can offer. Finally, the potential of UAV's in the generation of digital terrain models for obtaining contour lines, and geometrically correct detailed cartography, this in order to verify the benefits of the photogrammetric method, by verifying its positional accuracy, through the NSSDA standard.

### **KEY WORDS:**

- **PHOTOGRAMMETRY**
- **DETAILED MAPPING**
- **UAV'S**
- **DRONE SURVEYING**

## Capítulo I: Introducción

### Antecedentes

A lo largo de la historia de la humanidad, esta se ha visto en la necesidad de desarrollar conocimientos geográficos para representar la realidad, esto con el fin de fomentar su desarrollo; una forma de lograr es a través de la representación gráfica de su realidad. Estos procesos se vienen dando desde el principio de la civilización, en pueblos antiguos se han encontrado registros rústicos de cartografía hechos en tablillas de arcilla, papiros, piedras, pieles, etc. Sin embargo, las necesidades de mejorar estas representaciones graficas fueron aumentando con el pasar del tiempo, debido a esto se inventa los Sistemas de Proyección Cartográfica (Santamaría Peña, 2011).

Luego poco a poco van surgiendo las técnicas de medición e instrumentos que ayudan a realizar la tarea de representar un objeto de la realidad en un plano. Van surgiendo la cinta, unidades más avanzadas de medición como los teodolitos y estaciones totales, hasta llegar a la actualidad en la que gracias al desarrollo de la tecnología de drones o UAV's se ha podido implementar la fotogrametría de manera más accesible a los diversos usos en proyectos que requieren de cada vez más precisión.

Desde hace varios años se viene fomentando el uso de la fotogrametría aérea como insumo para la obtención de cartografía de un modo rápido y económico en comparación con cualquier otra técnica de medición. Este método es muy oportuno para la generación de cartografía de grandes áreas de terreno, ya que la principal ventaja que ofrece la fotogrametría aérea es que se captura grandes superficies en periodos muy cortos de tiempo, en comparación con los métodos

tradicionales. Desde aproximadamente hace un siglo se ha utilizado la fotogrametría aérea y se han obtenido resultados muy confiables, con el desarrollo de la tecnología este método ha pasado de ser totalmente analógico a un sistema digital. Otra técnica más novedosa, que tiene una amplia aceptación por parte del mercado y cada vez tiene mayor utilización es el LIDAR. Esta tecnología permite la medición de distancias con la ayuda de un sensor láser y es muy eficaz para la generación de modelos digitales del terreno (MDT) de grandes áreas, sobre todo por su elevada resolución espacial y precisión altimétrica (Galcerá, Seguí, & Portalés, 2015).

Los proyectos de vuelo fotogramétricos son esenciales en múltiples labores, tanto dentro del ámbito de la ingeniería como de la planificación medioambiental, estudios geológicos, etc.

### **Planteamiento del problema**

El surgimiento de la fotogrametría digital trajo con ello la mecanización de los procesos fotogramétricos, la evolución de la robótica, la informática y la ciencia de los micro-sensores, permitiendo de este modo la aparición de los Aviones no Tripulados (UAV). Actualmente la fotogrametría es una técnica y procedimiento que se ha vuelto más accesible, siendo cada vez más habitual la aparición de estos equipos, que incluyen instrumentación de bajo costo como cámaras digitales compactas y sistemas de vuelo de condición ultraligera (Angulo Valencia, 2014).

La automatización de los procesos de las técnicas digitales sustituye la componente óptico-mecánica y electrónica por software, y además identifica puntos homólogos en las imágenes, realizando las mediciones mediante los restituidores fotogramétricos digitales. Los instrumentos matemáticos de la fotogrametría analítica y de los procesos digitales de imágenes permiten la generación de cartografías y

representaciones en 2D y 3D (Angulo Valencia, 2014).

Este trabajo plantea el uso de un vehículo no tripulado con la finalidad de obtener imágenes aéreas para la generación de información cartográfica del área de estudio. Además, se validará la calidad del producto mediante la exactitud posicional horizontal y vertical según la norma NSSDA (Angulo Valencia, 2014).

### **Justificación e importancia**

La ingeniería civil ha tenido el deber de diseñar, construir y dar mantenimiento a proyectos, además de satisfacer las necesidades de funcionalidad, confiabilidad y seguridad de una población. Dentro de la ejecución del proyecto, se encuentra el análisis de la topografía, donde se llevarán a cabo los procedimientos para determinar la planimetría y altimetría del terreno. En función a las características de cada proyecto variarán las limitaciones de tiempo, recursos y metodología de trabajo (Claros, Guevara, & Pacas, 2016).

Se conoce como fotogrametría al conjunto de procesos y técnicas que deducen la fotografía de un objeto, su forma y dimensiones, la cual es utilizada para la elaboración de cartografía general o topográfica, para escalas medias y grandes; el levantamiento fotogramétrico es el uso de la fotogrametría en la topografía.

Con el avance de la tecnología, se han implementado metodologías para levantar grandes extensiones de terreno, en tres dimensiones y con gran precisión en función de su escala de trabajo (Angulo Valencia, 2014).

El uso de sistemas UAV (Unmanned aerial vehicles), tiene las mismas ventajas y productos que los sistemas aéreos tripulados, entre estas ventajas se encuentran el ser operado de manera independiente, tener bajo costo de explotación y conservar autonomía en la planificación del vuelo (Angulo Valencia, 2014).

En Ecuador es importante la implementación de esta tecnología, ya que el país cuenta con zonas inaccesibles como ríos y vegetación. Ésta facilitaría la obtención de datos y mejoraría la calidad de información existente en aquellas zonas complicadas. Por tal motivo, este trabajo plantea el uso de un vehículo no tripulado con la finalidad de obtener imágenes aéreas para la generación de información cartográfica de la zona de estudio (Angulo Valencia, 2014).

## **Área de influencia**

### ***Ubicación de la zona de estudio***

La zona de estudio del presente proyecto se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas. Se presentan las coordenadas en latitud y longitud y también en rectangulares UTM zona 17 Sur.

**Tabla 1**

*Coordenadas de ubicación de la zona de estudio*

<b>Ubicación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Elevación</b>
<b>IASA-Sangolquí</b>	S0° 23' 12.17"	W78° 24' 53.17"	9957212.096m	787774.817m	2747.104m

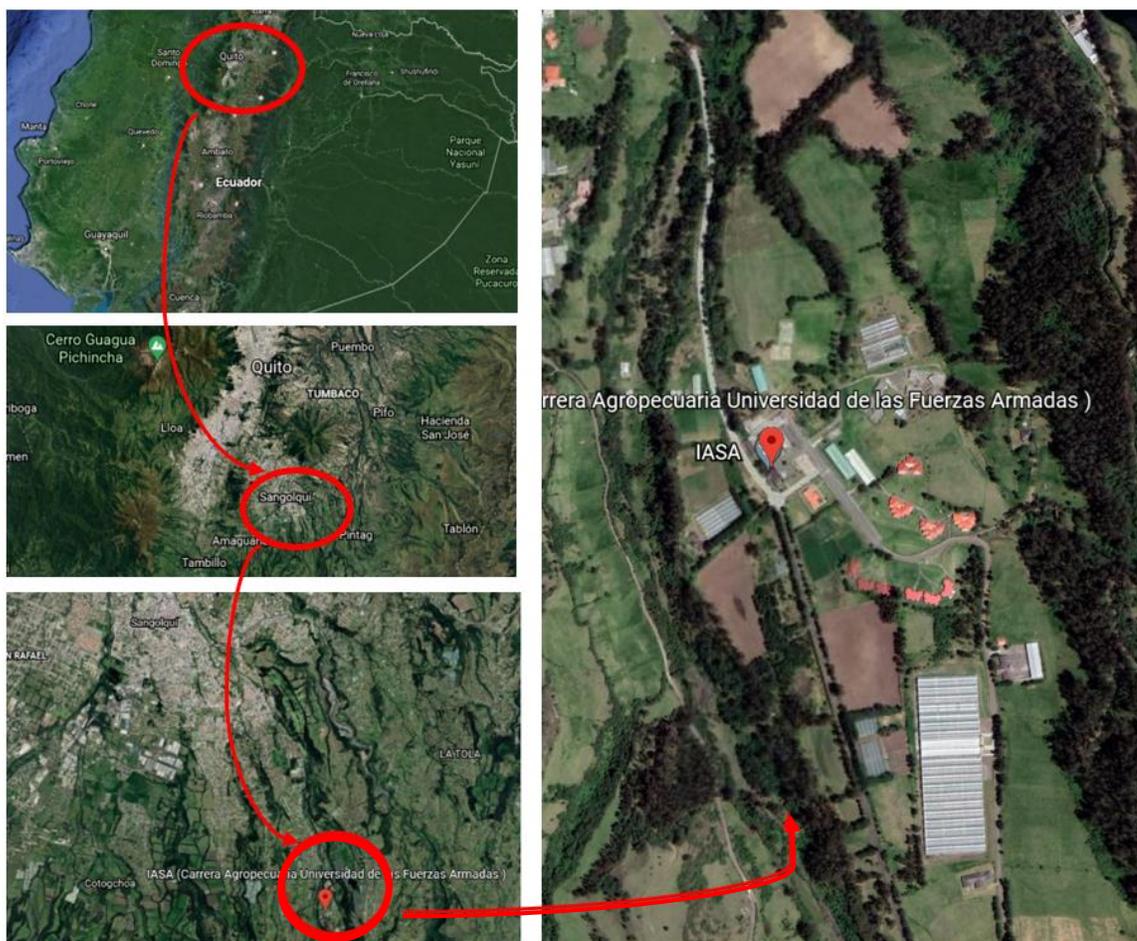
*Nota:* La tabla muestra las coordenadas Norte, Este y de elevación del área de estudio.

### ***Ubicación política***

El Campus IASA de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se encuentra ubicado políticamente en la Hacienda el Prado sector Selva Alegre, Sangolquí, perteneciente al cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha. En la figura 1 se muestra la ubicación política del área de estudio.

## Figura 1

### Ubicación política de la zona de estudio



*Nota:* La figura representa la ubicación política del área de estudio. Tomado de Google Maps.

## Objetivos generales y específicos

### *Objetivo general*

Generar cartografía a detalle de aproximadamente 200 Ha a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), como insumo topográfico para proyectos de ingeniería civil.

**Objetivos específicos**

- Revisar bibliografía respecto al método de fotogrametría a corto alcance
- Realizar vuelo fotogramétrico con UAV y establecimiento de puntos de control con GNSS.
- Desarrollar procesamientos fotogramétricos para obtención de ortofotografía y nube de puntos.
- Obtener planimetría y altimetría en ambiente CAD.
- Generar perfiles longitudinales y transversales del componente altimétrico del levantamiento.
- Validar estadísticamente la precisión horizontal y vertical de la cartografía generada.

**Meta**

Cartografía a detalle a escala 1:1000 de aproximadamente 200 Ha y perfiles transversales y longitudinales en formato CAD.

**Hipótesis**

La fotogrametría con drones (UAV: Unmanned aerial vehicle-Vehículo aéreo no tripulado) permite obtener productos cartográficos de alta precisión.

## Capítulo II: Marco teórico

### Cartografía

El objetivo de esta ciencia es estudiar los mapas a manera de representación de la realidad geográfica, que envuelve el estudio de la esencia de los mapas, los procesos de su elaboración y confección, la reproducción masiva y uso en problemas aplicados. De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional, la cartografía es el conjunto de métodos y técnicas científicas que intervienen en la elaboración de mapas, modelos en relieve o globos que representan la tierra o parte de ella (Franco Maass & Valdez Pérez, 2003).

### Sistemas de referencia

Son un conjunto de modelos que describen las posiciones y movimientos de cuerpos celestes o de cuerpos sobre la tierra. Dentro de este se definen los parámetros de origen, escala, orientación y plano principal (Quirós, 2014).

Hay dos sistemas de referencia fundamentales:

#### ***Sistemas de referencia terrestres (TRS- Terrestrial Reference System)***

Estos sistemas son utilizados para determinar coordenadas de puntos sobre la superficie de la Tierra o en sus límites. Por tanto, se encuentran en continua rotación (Benitez, 1995).

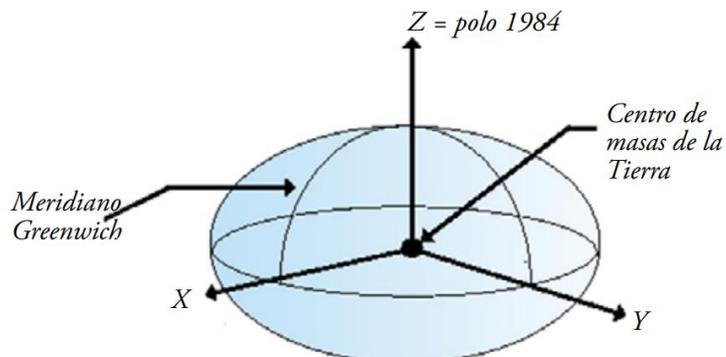
#### ***Sistema de referencia World Geodetic System 1984 (WGS84)***

Es un sistema de referencia Terrestre, que tiene un elipsoide de referencia, tal y como se observa en la figura 2, donde sus ejes y su origen coinciden con los

del sistema ETRS89 (Quirós, 2014).

## Figura 2

Sistema WGS84



*Nota:* La figura representa el sistema de referencia WGS84. Tomado de (Quirós, 2014).

El centro de masas de la tierra es su origen, el eje X es la dirección de la intersección del plano ecuatorial con el meridiano de Greenwich, el eje Y es la dirección que forma el triángulo directo y el eje Z es la dirección del polo en 1984 (Quirós, 2014).

### **Sistemas de referencia celestes (CRS- Celestial Reference System)**

Estos sistemas definen la situación y el movimiento de objetos externos a la Tierra, como las estrellas, los planetas y los satélites artificiales (Benitez, 1995).

### **Fotogrametría**

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS), la fotogrametría es el dogma que permite adquirir información confiable sobre el espacio físico, por medio de procesos de medición, análisis de imágenes y patrones de energía electromagnética radiada. Este ámbito del conocimiento se

orienta con otras disciplinas tales como geodesia, cartografía y topografía, las cuales constituyen en conjunto una disciplina integrada denominada geomática (Arriola Valverde, 2018).

Por medio de la fotografía digital en banda visible y sensores remotos, se realiza la obtención de datos en estudios fotogramétricos tales como cámaras multiespectrales, junto con información que proviene de sistemas de posicionamiento global. Posteriormente estos datos operan con herramientas de procesamiento y sistemas de información geográfica (GIS) para la obtención de productos como modelos digitales de elevación (DEM) u ortomosaicos (Arriola Valverde, 2018).

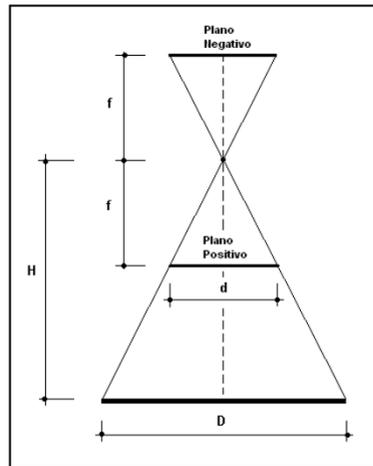
### **Elementos de fotogrametría**

- *Escala:* Se define como la función entre lo que mide un objeto en la fotografía ( $d$ ) y lo que representa realmente en el terreno ( $D$ ), o como la relación entre la distancia focal ( $f$ ) y la altura de vuelo ( $H$ ).
- *Distancia focal:* Es la distancia entre el centro óptico del objetivo y el plano focal, donde se apoya la película, es decir, es la distancia fija entre el centro de la lente y la película (UNNE, 2011).
- *Altura de vuelo:* Está definido como la distancia entre el terreno fotografiado y el centro de la lente (UNNE, 2011).

Para mayor entendimiento, en la figura 3 se encuentran representados los elementos mencionados.

### Figura 3

Diagrama básico de fotogrametría



*Nota:* El gráfico representa el diagrama de los elementos de la fotogrametría. Tomado de (UNNE, 2011).

### Clasificación de la fotogrametría.

La clasificación de la fotogrametría según la posición de toma de fotografía capturada, es (Jauregui, 2010):

- *Fotogrametría terrestre:* es usada en campos como la arquitectura, arqueología, y en levantamientos topográficos, su posición y sus elementos de orientación externa de la cámara son ya conocidos, debido a que utiliza fotografías tomadas sobre superficie terrestre.
- *Fotogrametría aérea:* utilizado a partir de imágenes obtenidas desde una cámara aerotransportada, su eje óptico la mayoría de las veces es vertical y su posición en el espacio no está definida.

La clasificación de la fotogrametría según el tipo de captura y procesamiento

de las fotografías, es:

- *Fotogrametría analógica*: Fue la primera etapa de la fotogrametría en desarrollarse. Se utiliza para la obtención de mapas, con información altimétrica.
- *Fotogrametría analítica*: Fue la segunda etapa de la fotogrametría en desarrollarse. Se logra niveles de detalle a diferentes escalas y se facilita la información a programas de tipo CAD.
- *Fotogrametría digital*: Con la aparición del avance tecnológico, la imagen analógica es sustituida por la imagen digital. El empleo de las computadoras y los programas o software dan origen a los modelos digitales del terreno 3D, etc.

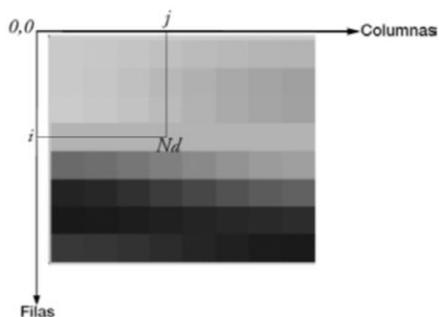
### **Imagen digital**

Se define como una matriz bidimensional, donde cada unidad mínima de información es un píxel con coordenadas fila, columna (i,j) (Quirós, 2014).

Cada píxel está conformado por un Nivel Digital (Nd) que estará representado por un nivel de gris en pantalla, como se observa en la Figura 4, que representa una imagen monobanda. Mientras tanto, las imágenes a color (RGB), como se observa en la Figura 5, se componen de tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el verde (Green) y otra para el azul (Blue) (Quirós, 2014).

## Figura 4

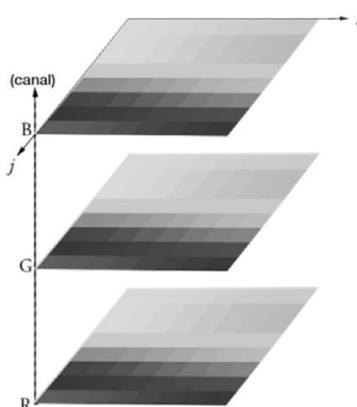
### *Imagen digital*



*Nota:* La figura representa la imagen digital monobanda. Tomado de (Quirós, 2014).

## Figura 5

### *Imagen digital en RGB*



*Nota:* La figura representa la imagen digital en RGB. Tomado de (Quirós, 2014).

## Características de la imagen digital

### ***Resolución***

Es el tamaño de pixel, ya que de este depende la calidad de la imagen. Si este tamaño es muy grande, la imagen pierde información, pero si es muy pequeño, la imagen conservaría muy buena calidad. La unidad se expresa en ppp (píxeles por pulgada) (Quirós, 2014).

Para el caso de imágenes aéreas, la resolución es denominada como espacial y corresponde directamente con el tamaño del píxel en el terreno (GSD- Ground Sample Distance) (PIX4D, 2021).

El tamaño de píxel en el terreno (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos sobre el terreno. A mayor altitud del vuelo, mayor es el valor del GSD y menor es la resolución espacial de la imagen.

Un GSD de 5 cm significa que un píxel de la imagen representa 5 cm lineales sobre el terreno, y una superficie de 25 cm<sup>2</sup> (5\*5=15 centímetros cuadrados).

La figura 6 muestra gráficamente a qué se refiere el término GSD (PIX4D, 2021).

### **Figura 6**

#### *Representación de GSD*



*Nota:* La imagen representa gráficamente el término GDD. Tomado de (Quirós, 2014).

### ***Dimensión***

Se define como el ancho y el alto de una imagen. La unidad se expresa en cm, pulgadas o píxeles (Quirós, 2014).

Profundidad de color: Es el número de bits que se utiliza para describir el

color de cada píxel, cuanto mayor sea esta profundidad, más colores tendrá la imagen (Quirós, 2014).

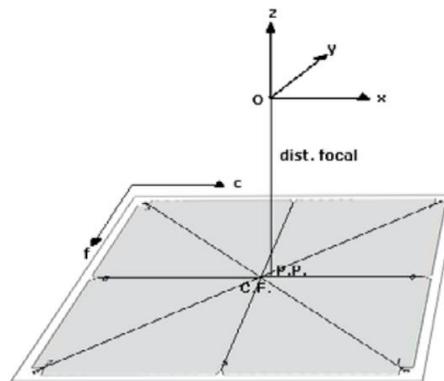
### Proceso fotogramétrico

Este proceso se divide en 4 etapas:

- *Orientación Interna:* Es un proceso en el que el sistema de coordenadas píxel (fila, columna) se transforma al sistema de coordenadas de la cámara, cuya unidad se expresa en mm y consiste en un sistema cartesiano 3D con la proyección de la cámara ubicada en el centro, tal y como se visualiza en la figura 7 (Quirós, 2014).

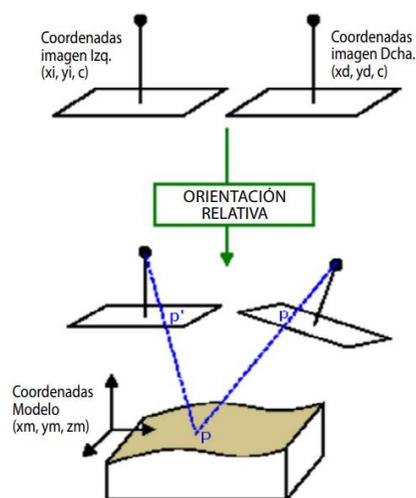
#### Figura 7

*Orientación interna*



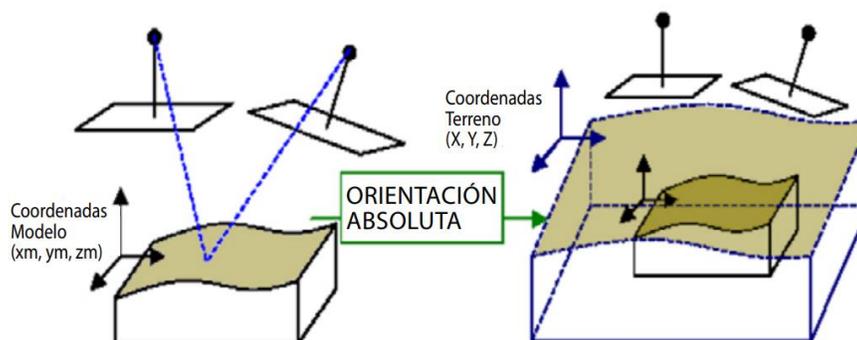
*Nota:* La figura representa la orientación interna. Tomado de (Quirós, 2014).

- *Orientación Relativa:* En esta etapa se identifican los puntos homólogos en cada fotografía para más adelante reconstruir los haces y generar el modelo (Quirós, 2014). En la figura 8 se encuentra graficado el proceso.

**Figura 8***Orientación relativa*

*Nota:* El gráfico muestra el proceso de la orientación relativa. Tomado de (Quirós, 2014).

- *Orientación Absoluta:* Durante esta fase se nivela el modelo, se lo escala y se lo traslada a su verdadera posición en el espacio, con la utilización de puntos de apoyo, como se observa en la figura 9 (Quirós, 2014).

**Figura 9***Orientación absoluta*

*Nota:* La imagen representa el proceso de orientación absoluta. Tomado de (Quirós, 2014)

- *Restitución*: Este proceso determina e identifica los pares estereoscópicos con los puntos de objetos foto identificables y extrae los detalles de altimetría y planimetría (Sánchez, 2006).

### **Productos fotogramétricos**

Los tres productos que se obtienen en el proceso fotogramétrico son:

1. Planos vectoriales obtenidos de la restitución.
2. Modelos digitales del terreno.
3. Ortofotografías.

#### ***Planos vectoriales obtenidos de la restitución***

El producto de la primera fase de la restitución se conoce como minuta, la cual debe ser revisada y editada para generar el plano final.

Primero se revisa los posibles errores que pueda haber, tales como cruce altimétrico de elementos con curvas de nivel, elementos poligonales cerrados, errores topológicos, entre otros (Quirós, 2014).

Luego de revisar los errores, se continúa con la fase de edición, para finalmente obtener los planos vectoriales.

#### ***Modelos digitales del terreno (MDT)***

Son un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio (Quirós, 2014).

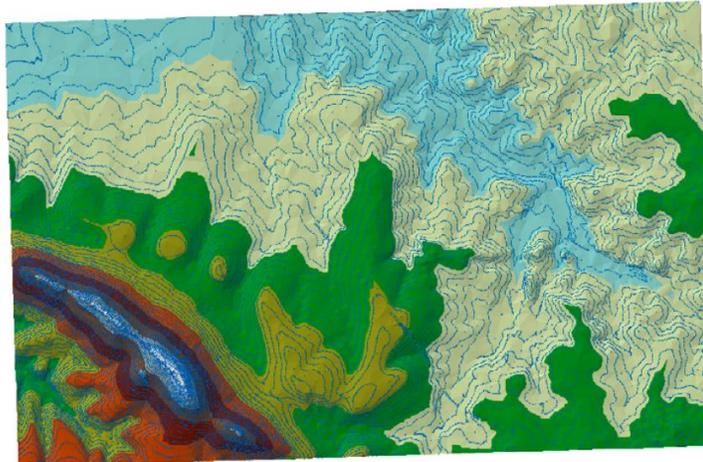
Se puede distinguir los siguientes tipos de MDT:

- *Modelo digital de elevaciones (MDE)*: Este modelo incluye la

distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. En la figura 10 se muestra la representación del modelo.

**Figura 10**

*MDE*

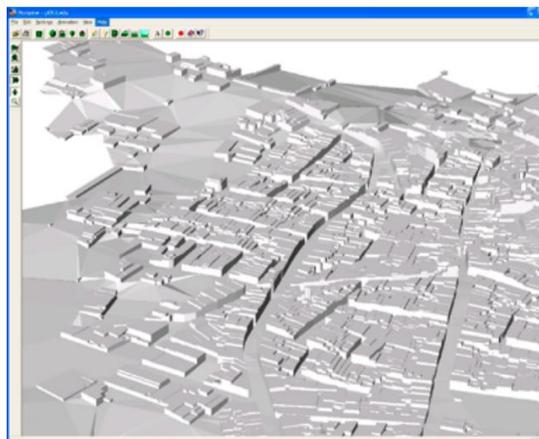


*Nota:* La imagen representa el modelo digital de elevaciones. Tomado de (Quirós, 2014).

- *Modelo digital de superficie (MDS):* Como se observa en la figura 11, el MDS representa las altitudes de los elementos presentes en la superficie, tales como edificios, infraestructura, vegetación, entre otros.

## Figura 11

MDS



*Nota:* La imagen representa el modelo digital de superficie Tomado de (Quirós, 2014).

### **Ortofotografía**

La ortofotografía se obtiene mediante la ortoproyección, que es el método fotogramétrico que permite la obtención de fotomapas precisos, rectificadas mediante la corrección diferencial de la fotografía original. Para generar la misma, es necesario utilizar el MDE (Quirós, 2014).

### **Sistemas autónomos no tripulados (Uas O Uav's En Inglés)**

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV-Unmanned Aerial Vehicle), conocidos popularmente como drones, son sistemas capaces de mantener un vuelo controlado, de forma remota o automática mediante planes de vuelos programados (Sani, 2015).

Actualmente los UAV's contienen dispositivos sensoriales que permiten obtener fotografías y videos de alta definición, los cuales mediante el proceso fotogramétrico digital pueden ortorectificarse y así generar mediciones aéreas de espacios urbanos o rurales, cartografía base en escalas grandes y formar mosaicos

(Sani, 2015).

### **UAV WingtraOne**

Es un dron con una cámara Sony RX1R II de fotograma completo de 42 MP, un receptor multifrecuencia PPK GNSS y una lente de distorsión ultrabaja, WingtraOne es capaz de cubrir 110 ha a una altura de 93 m y un GSD de 1.2cm / px en un solo vuelo o 400 ha a 3 cm / px (WINGTRA, 2021). En la figura 12 se muestra físicamente el dron WingtraOne.

### **Figura 12**

*Dron WingtraOne*



*Nota:* La imagen representa el aspecto del dron WingtraOne. Tomado de (WINGTRA, 2021).

### **Validación de producto fotogramétrico**

A continuación, se describen los procesos realizados para el control de calidad de los productos fotogramétricos:

### **Exactitud posicional**

La exactitud posicional se define como un aspecto que define principalmente la calidad del producto cartográfico, dado que interfiere en factores como la geometría, topología, además se encuentra relacionada con el interfuncionamiento de los datos espaciales (Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 2019).

### **Error medio cuadrático**

Con el valor que se obtiene de la diferencia entre el valor de la coordenada tomada de la Ortofotografía respecto al valor verdadero en el sistema de referencia especificado, se determina el error medio cuadrático, el cual se define con la siguiente ecuación (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RTK - ORTOFOTO)^2}{n}}$$

Donde:

*RTK* representa los datos obtenidos con el sistema de referencia.

*ORTOFOTO* representa los datos de la Ortofotografía

*N* representa el número de puntos de control

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

Con la obtención del RMSE para XY ( $RMSE_r$ ) y para Z, se calcula el error real de la muestra analizada en función de un determinado nivel de confianza impuesto, que generalmente es del 95%.

La precisión con un nivel de confianza del 95% significa que el 95% de las

posiciones del conjunto de datos tendrá un error con respecto a la posición de terreno real igual o menor al valor de precisión determinado (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998).

### ***Exactitud de posición horizontal***

Como se indica en (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998) se calcula el coeficiente de exactitud posicional a un 95 % de confianza dependiendo de los siguientes casos:

- a) Si  $RMSE_X = RMSE_Y$ , se emplea la ecuación:

$$Exactitud_r = 1.7308xRMSE_r$$

- b) Si  $RMSE_X \neq RMSE_Y$ , se emplea la ecuación:

$$Exactitud_r = 1.22385x(RMSE_X + RMSE_Y)$$

### ***Exactitud de posición vertical***

Como se indica en (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998) se calcula el coeficiente de exactitud posicional a un 95 % de confianza con la siguiente ecuación:

$$Exactitud_E = 1.96xRMSE_E$$

## Capítulo IV: Metodología

### Generalidades

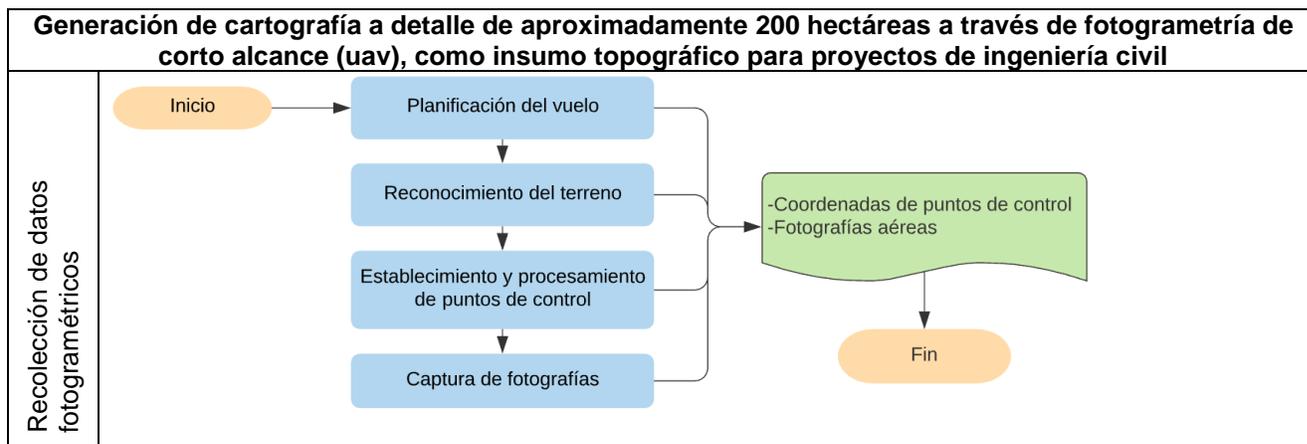
La metodología del proyecto se dividió en seis fases que engloban los pasos a seguir para alcanzar los objetivos de este trabajo, siendo:

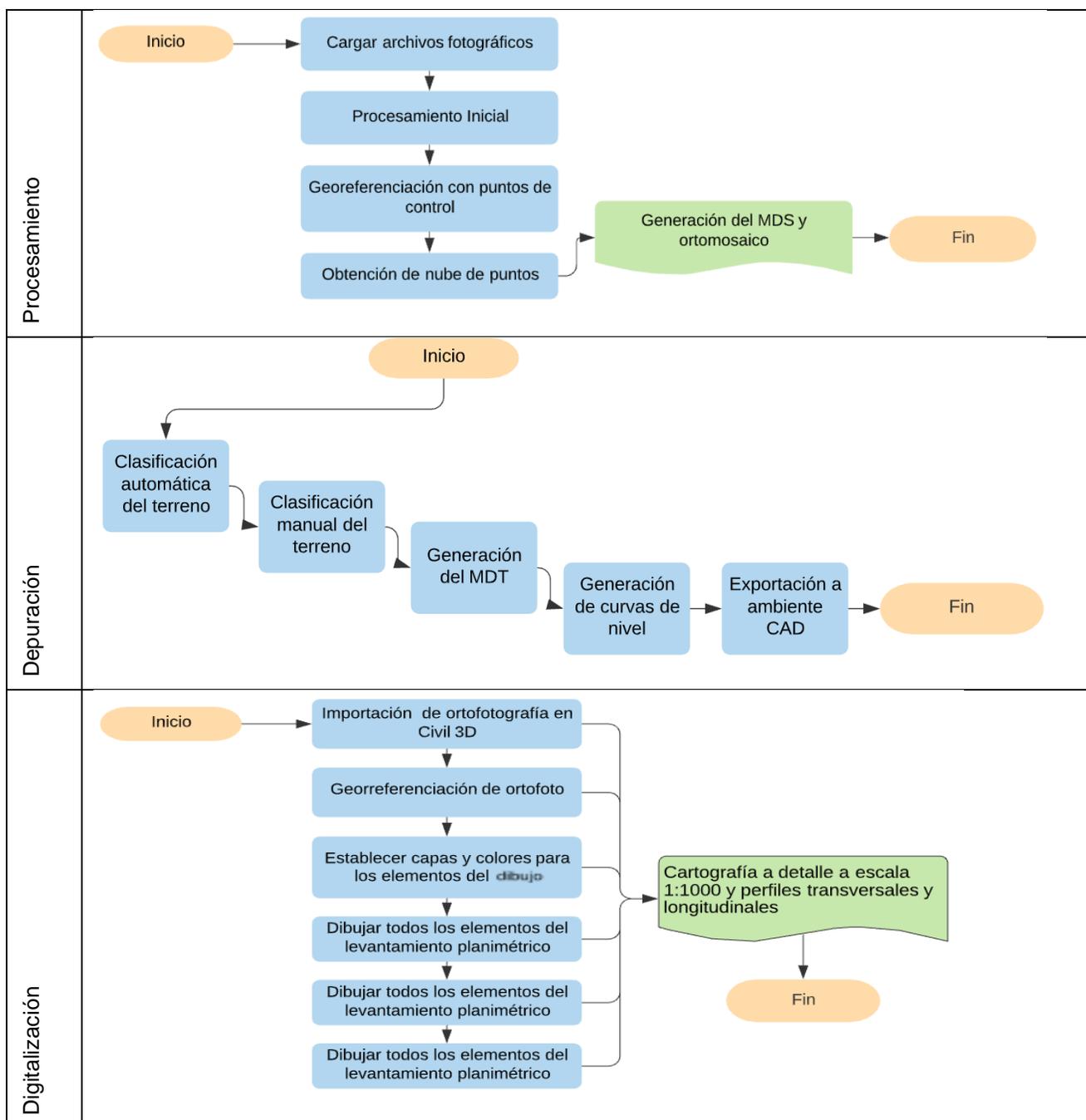
1. Recolección de datos fotogramétricos
2. Procesamiento
3. Depuración
4. Digitalización
5. Control de calidad de la cartografía generada

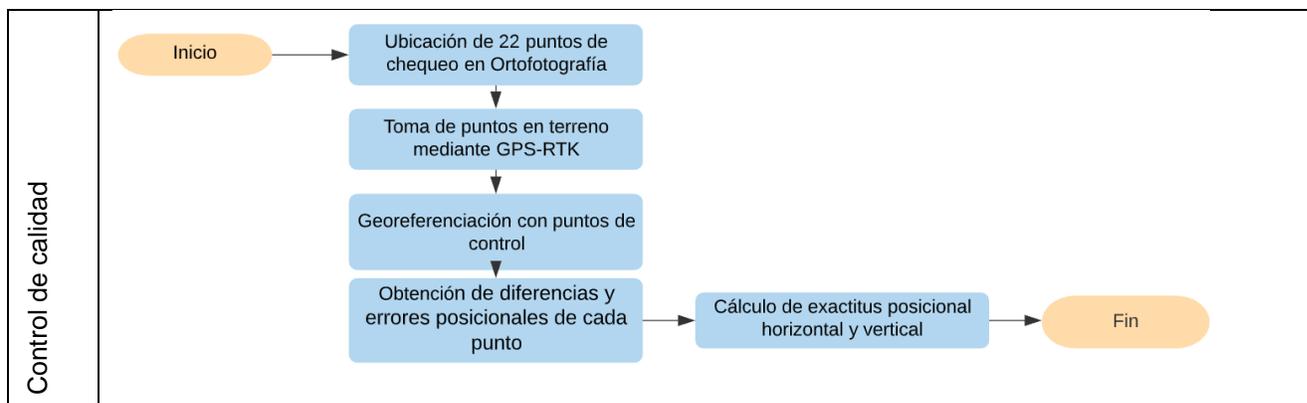
Para representarlo de mejor manera en la figura 13 se presenta un diagrama de flujo de trabajo.

### Figura 13

*Diagrama de flujo de trabajo*







*Nota.* El diagrama de flujo muestra todos los pasos que hay que seguir en cada proceso para llegar a los resultados esperados.

## Técnica de recolección de datos fotogramétricos

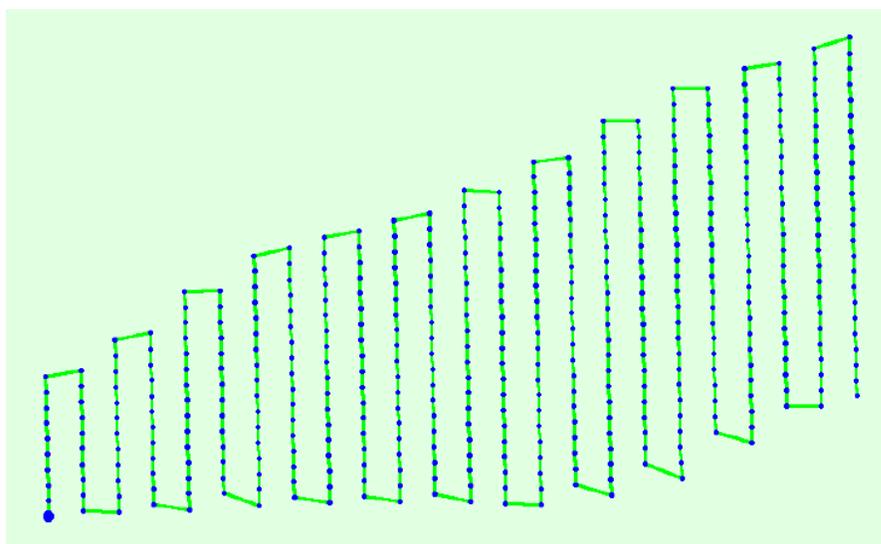
### *Vuelo fotogramétrico*

Para la realización del vuelo es necesario previamente realizar la planificación del mismo ya que se requieren el ingreso de parámetros que varían en función de los requerimientos del proyecto.

Para la planificación del vuelo del presente proyecto se utilizó el software Wingtra Pilot del UAV WingtraOne equipado con una cámara Sony RX1R II de 42 MP de frame completo y lente de baja distorsión. Y se realizó un vuelo automático en forma de malla, en la figura 14 se muestra la ruta seguida.

## Figura 14

### *Plan de vuelo del UAV*



*Nota:* La imagen representa la ruta seguida del plan de vuelo del UAV.

La altura de vuelo planificada fue de 300 m; los traslajos planificados para el vuelo, fueron de 80% - 70%, longitudinal y transversal, respectivamente. Además, también se planeó obtener un GSD de 5 cm/píxel, posteriormente en el procesamiento se obtuvo un valor real del GSD de 5.68 cm/píxel.

Esta actividad fue realizada por el Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción (DCTC) en abril del 2021 y las fotografías resultantes fueron entregadas para el desarrollo del presente proyecto por parte del Ing. Eduardo Kirby.

### ***Establecimiento de puntos de control terrestre***

Para lograr resultados aceptables en la generación de cartografía es necesario que las fotografías tomadas por el dron tengan una conexión precisa con el terreno, para esto deben estar georreferenciadas con la ayuda del uso de puntos de control terrestre.

Esta actividad también fue realizada por el DCTC en abril del 2021, utilizando equipos GNSS Trimble R8s y software de procesamiento Trimble Business Center. En total se determinaron 9 puntos de control para el vuelo procesado, materializados con marcas fotoidentificables.

A continuación, se presenta la tabla 2 con las coordenadas de los puntos de control terrestre medidas en las instalaciones del IASA, hacienda el prado.

**Tabla 2**

*Coordenadas de los puntos de control terrestre.*

Punto	Lambda (Long)	Phi (Lat)	h	H	Este	Norte
<b>BASE</b>	078°24'56,94928"	S0°23'08,26892"	2744,876	2748,250	787646,337	9957332,582
<b>P1</b>	078°24'43,03850"	S0°22'55,94404"	2844,831	2818,191	788076,862	9957711,248
<b>P2</b>	078°25'00,74178"	S0°22'26,44764"	2689,73	2663,125	787529,379	9958617,963
<b>P3</b>	078°25'05,89956"	S0°22'24,54422"	2685,978	2659,028	787369,811	9958676,510
<b>P4</b>	078°25'02,54659"	S0°23'05,61212"	2733,55	2706,934	787473,177	9957414,289
<b>P5</b>	078°24'53,22037"	S0°23'04,83525"	2739,957	2713,327	787761,744	9957438,078
<b>P6</b>	078°24'37,04006"	S0°23'11,81418"	2835,672	2809,017	788262,310	9957223,433
<b>P7</b>	078°24'56,07992"	S0°23'38,84275"	2771,674	2744,647	787672,947	9956392,909
<b>P8</b>	078°24'42,55633"	S0°23'36,70855"	2786,79	2760,130	788091,397	9956458,373
<b>P9</b>	078°24'29,37108"	S0°23'42,03095"	2910,844	2884,164	788499,308	9956294,665

*Nota:* La tabla muestra las coordenadas en elevación, Este y Norte de los 9 puntos de control terrestre.

También se presenta en la tabla 3 las precisiones de cada uno de los puntos de control terrestre.

**Tabla 3**

*Precisiones de los puntos de control terrestre.*

Punto	Pres. Este (m)	Pres. Norte (m)	Pres. Elevación (m)
<b>BASE</b>			
<b>P1</b>	0,004	0,003	0,007
<b>P2</b>	0,003	0,003	0,006
<b>P3</b>	0,002	0,002	0,004

<b>Punto</b>	<b>Pres. Este (m)</b>	<b>Pres. Norte (m)</b>	<b>Pres. Elevación (m)</b>
<b>P4</b>	0,002	0,002	0,004
<b>P5</b>	0,002	0,001	0,002
<b>P6</b>	0,002	0,002	0,004
<b>P7</b>	0,003	0,002	0,005
<b>P8</b>	0,002	0,002	0,003
<b>P9</b>	0,002	0,002	0,005

*Nota:* La tabla muestra las precisiones en Este, Norte y elevación de los 9 puntos de control terrestre.

### **Procesamiento**

Una vez obtenidas las fotografías aéreas y los puntos de posicionamiento terrestre, lo siguiente es el procesamiento de la información para la obtención de la nube de puntos, modelos digitales de la superficie, modelo digital del terreno y la ortomosaico u ortofoto georreferenciada.

Estos procesos son realizados en el software Pix4D, para el presente proyecto se usó la versión de prueba de 15 días del software.

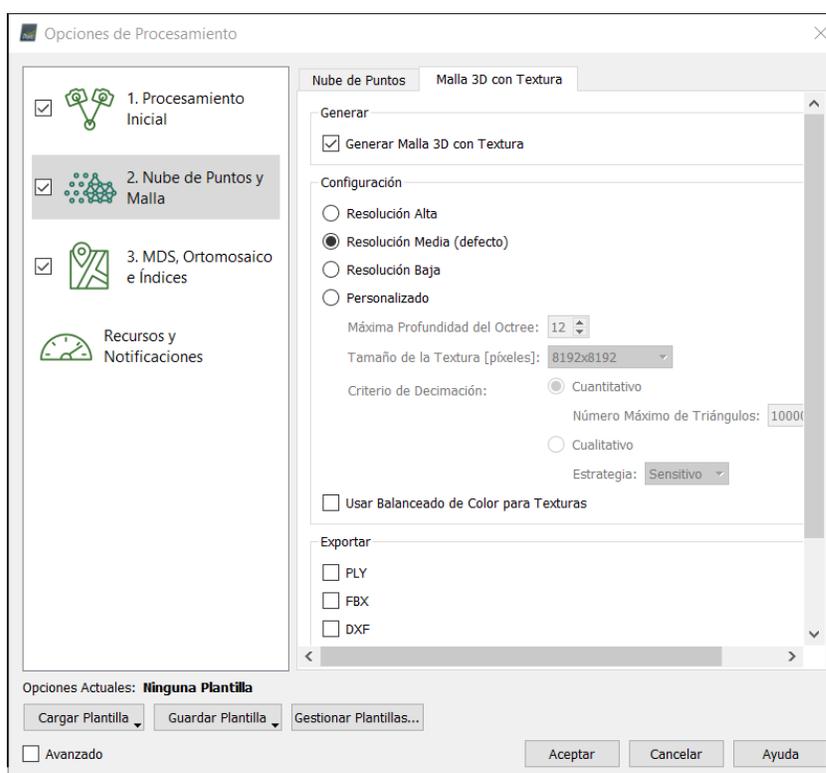
El software Pix4D divide el procesamiento de mapas en 3D en 3 procesos secundarios enumerados a continuación.

1. Procesamiento inicial.
2. Obtención de la nube de puntos y malla.
3. Obtención del modelo digital de la superficie (MDS), ortomosaico e índices.

En la figura 15 se muestra los procesos secundarios que se deben realizar en el software Pix4D.

## Figura 15

### Procesos secundarios en Pix4D



*Nota:* La imagen muestra los procedimientos secundarios que se llevan a cabo en el software Pix4D.

### **Procesamiento inicial**

Una vez abierto el Pix4D lo primero es crear el archivo y cargar las fotografías obtenidas con el dron, posteriormente se define el sistema de coordenadas con las cuales se hicieron las tomas de fotografías en el vuelo y el sistema de coordenadas de salida del proceso, el cual para el presente proyecto es el WGS84 / UTM zona 17S.

Una vez establecidos estos datos de partida, se empieza el procesamiento inicial rápido en el software.

Posteriormente es necesario importar los puntos control con la herramienta de Gestor GCP (gestor de puntos de control terrestre) y ubicarlos manualmente en todas las fotografías donde aparecen cada uno de los puntos de posicionamiento.

Luego de haber ubicado todos los puntos de control, es necesario volver a correr nuevamente el procesamiento inicial en el software, pero esta vez se configura una mayor resolución.

Otro aspecto importante es que “en este paso se utilizarán las imágenes e insumos adicionales como los GCP descritos en la sección, como *entradas* para realizar las siguientes tareas” (Pix4Dmapper, 2019):

- **Extracción de Puntos clave:** Identifica características específicas como puntos clave en las imágenes.
- **Puntos clave que coinciden:** Encuentra qué imágenes tienen los mismos puntos clave y coincidan con ellas.
- **Optimización del modelo de la cámara:** Calibra la distancia interna (distancia focal) y parámetros externos (Orientación) de la cámara.
- **Localización GPS / GCP:** Localiza el modelo si se proporciona información de geolocalización (Pix4Dmapper, 2019).

En la figura 16 se presenta el gestor de puntos de control dentro del software Pix4D, junto con los 9 puntos de control del proyecto.

## Figura 16

### Gestor de puntos de control de Pix4D con precisiones

Gestor GCP/MTP

Sistema de coordenadas de los puntos de apoyo  
 Datum: World Geodetic System 1984; Sistema de Coordenadas: WGS 84 / UTM zone 17S (EGM 96 Geoid)

Tabla GCP/MTP

	Etiqueta	Tipo	X [m]	Y [m]	Z [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]
0	P1	3D punto de ap...	788076.862	9957711.248	2844.831	0.020	0.020
0	P2	3D punto de ap...	787529.379	9958617.963	2689.729	0.020	0.020
0	P3	3D punto de ap...	787369.811	9958676.510	2685.978	0.020	0.020
0	P4	3D punto de ap...	787473.177	9957414.289	2733.552	0.020	0.020
0	P5	3D punto de ap...	787761.744	9957438.078	2739.957	0.020	0.020
0	P6	3D punto de ap...	788262.310	9957223.433	2835.672	0.020	0.020
0	P7	3D punto de ap...	787672.947	9956392.909	2771.674	0.020	0.020
0	P8	3D punto de ap...	788091.397	9956458.373	2786.789	0.020	0.020
0	P9	3D punto de ap...	788499.308	9956294.665	2910.844	0.020	0.020

*Nota:* La figura muestra el sistema de coordenadas de los 9 puntos de apoyo.

### Obtención de la nube de puntos y malla

El siguiente sub proceso es la creación de la nube de puntos donde para tener un archivo menos pesado y por ende más trabajable, se configura la resolución para obtener un punto por cada metro cuadrado, caso contrario se obtendrá una nube de puntos demasiado densa.

Según el manual de (Pix4Dmapper, 2019), este paso se basará en los puntos de empate automáticos con:

- *Densificación de Puntos:* Se crean Puntos de Empate adicionales basados en los Puntos de Empate Automáticos que resultan en una Nube de Puntos Densificados.
- *Malla con textura 3D:* basada en la nube de puntos densos, se puede crear una malla con textura 3D.

En la figura 17 se presenta la nube de puntos una vez georreferenciada con los puntos de control.

### Figura 17

*Nube de puntos generada en Pix4D*



*Nota.* El grafico presenta los puntos de control correctamente ubicados en la nube de puntos.

### ***Obtención del modelo digital de la superficie (MDS), ortomosaico e índices***

Como se señala en (Pix4Dmapper, 2019), este paso permite la creación de:

- *Modelo de superficie digital (DSM):* La creación del DSM permitirá el cálculo de volúmenes, ortomosaicos y mapas de reflectancia.

- *Ortomosaico*: La creación del Ortomosaico se basa en ortorectificación. Este método elimina las distorsiones de perspectiva de las imágenes.
- *Mapa de reflectancia*: El objetivo es producir un mapa en el que el valor de cada píxel indique fielmente la reflectancia del objeto.
- *Mapa de índices*: genera un mapa de índices donde se calcula el color de cada píxel utilizando una fórmula que combina diferentes bandas de los mapas de reflexión.

En el Anexo A se presenta el reporte de calidad entregado por Pix4D luego de realizar por completo el procesamiento descrito en la metodología del presente trabajo.

### **Depuración de la nube de puntos**

Una vez obtenida la nube de puntos es necesario obtener el modelo digital únicamente del terreno, para esto hay que llevar a cabo una depuración en la que se clasifican los puntos pertenecientes al terreno de los demás puntos que pueden ser edificios, árboles, arbustos, o cualquier otro tipo de obstáculo. Esta depuración es llevada a cabo mediante el software Global Mapper, que para el presente proyecto se utilizó la versión de licencia de prueba de 30 días.

El proceso que se siguió es el siguiente:

1. Se importa la nube de puntos exportada de Pix4D mapper.
2. Se realiza una clasificación automática del terreno en la que el software identifica la gran mayoría de los puntos pertenecientes al terreno.
3. Luego de esto es necesario la realización de una clasificación manual

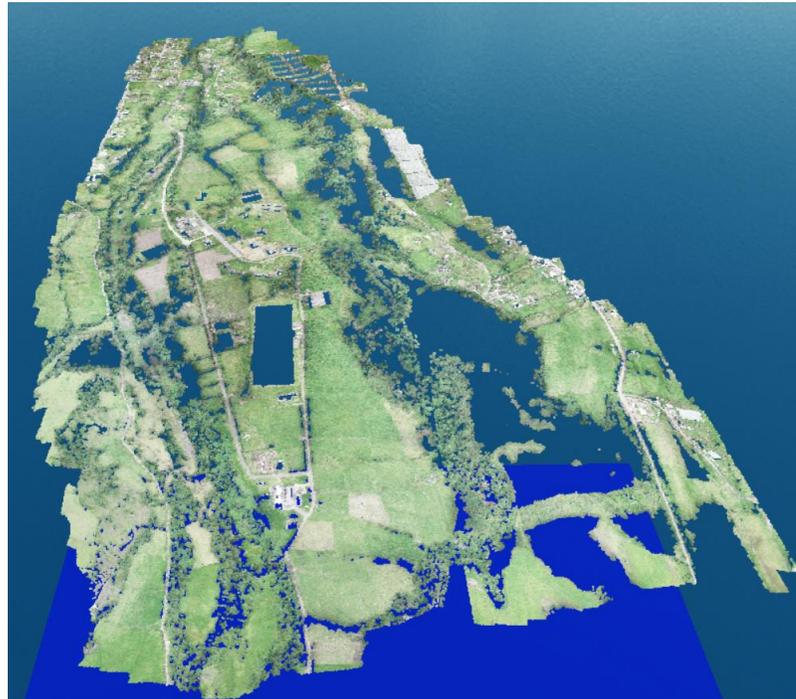
de los puntos sobrantes pertenecientes al terreno, debido a que no todos han sido clasificados correctamente por el software, este proceso lleva el 90 % del tiempo total.

4. Una vez bien clasificados todos los puntos del terreno se procede a la obtención del modelo digital del terreno.
5. Con el modelo digital ya creado lo siguiente es la creación de las curvas de nivel. Para el presente proyecto se representaron curvas de nivel secundarias cada metro y curvas principales cada cinco metros.
6. Finalmente se exportan las curvas de nivel al software Civil 3D para continuar con el trabajo.

El resultado de la depuración es el modelo digital del terreno, junto con las curvas de nivel descritas en este capítulo. La nube de puntos clasificada se presenta en la figura 18, y el modelo digital del terreno en la figura 19.

**Figura 18**

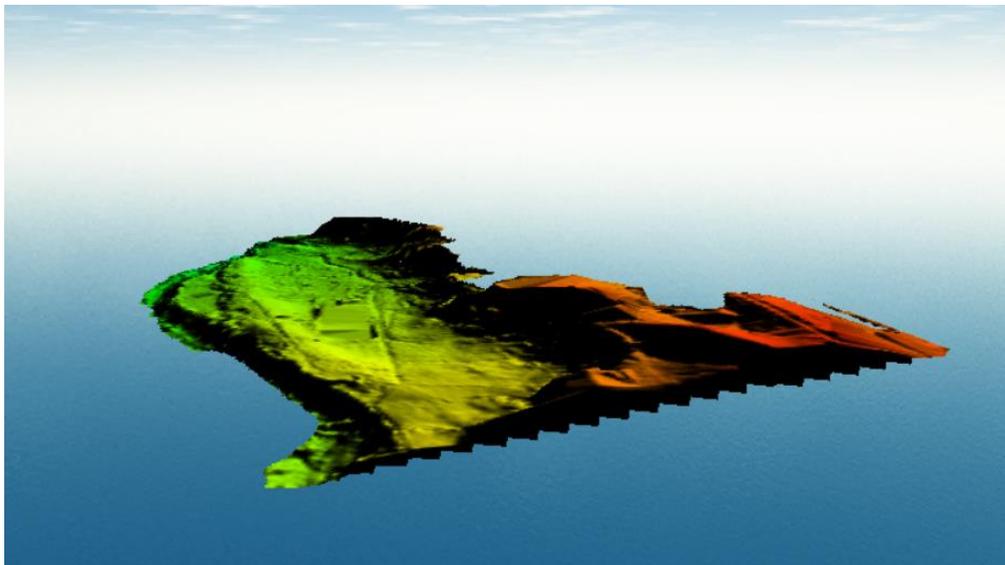
*Nube de puntos clasificada en Global Mapper (puntos del terreno)*



*Nota:* La figura muestra la nube de puntos clasificada en el software Global Mapper.

**Figura 19**

*Modelo digital del terreno de la hacienda IASA el Prado*



*Nota:* La figura representa gráficamente el modelo digital del terreno.

## **Digitalización 2D**

Teniendo como base el montaje del mosaico de las ortofotos obtenido con el software Pix4D Mapper, el próximo paso es realizar la digitalización sobre la ortofoto cargada en el programa Civil 3D.

Una vez importada la ortofoto en el software, se debe comprobar que se encuentre georreferenciada y con una buena calidad, a fin de que se pueda observar y ampliar con zoom todos los detalles del área en cuestión, para que la precisión al momento de dibujar sea mayor.

Posteriormente, con ayuda de las herramientas de dibujo que ofrece el programa, se establecen capas y colores que servirán de base para contornear todos los elementos que componen el levantamiento, tales como edificaciones, vías, aceras, vegetación, entre otros.

Finalmente se insertan las curvas de nivel obtenidas con el programa Global Mapper y se convierte las polilíneas en superficie, para completar la georreferenciación en altimetría y planimetría.

## **Control de calidad de la cartografía de detalle generada**

Una vez ejecutado el levantamiento en altimetría y planimetría en el Civil 3D, se procede a realizar la evaluación de calidad del producto obtenido a través del control de la exactitud posicional al 95% de confianza. A continuación, se detalla el procedimiento realizado:

Primero se tomó 22 puntos de chequeo, ubicados de manera aleatoria, cubriendo toda el área del IASA, como se representa en la figura 21.

Después de colocar los puntos de control en la Ortofotografía, se realiza la toma de estos puntos en terreno, como se observa en la figura 20, mediante el uso

de un GNSS diferencial de doble frecuencia con el método de RTK (posicionamiento cinemático en tiempo real).

### Figura 20

*Determinación de puntos de chequeo, método GPS-RTK*



*Nota:* La imagen muestra el proceso de posicionamiento de los puntos de chequeo.

Estas coordenadas obtenidas, en el sistema de coordenadas UTM17S-WGS84 se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Coordenadas obtenidas con RTK y con la Ortofotografía de cada punto de chequeo*

ID	CODE	Coordenadas RTK			Coordenadas Ortofotografía		
		Este	Norte	Elevación	Este	Norte	Elevación
1	BASE	787646.34	9957332.58	2744.88			
2	PC1	787614.95	9957346.94	2745.29	787614.88	9957347.03	2745.07
3	PC2	787587.01	9957309.02	2746.55	787587.04	9957308.90	2746.70
4	PC3	787759.93	9957291.68	2744.46	787759.93	9957291.73	2744.61
5	PC4	787731.66	9957181.72	2747.18	787731.63	9957181.81	2747.35
6	PC5	787818.91	9957164.81	2749.35	787818.77	9957164.96	2749.34
7	PC6	787784.68	9957459.61	2740.47	787784.70	9957459.68	2740.56
8	PC7	787735.50	9957440.96	2739.99	787735.34	9957440.91	2740.07
9	PC8	787582.87	9957497.26	2739.10	787582.73	9957497.29	2739.64
10	PC9	787614.44	9957553.59	2737.32	787614.44	9957553.61	2736.93

ID	CODE	Coordenadas RTK			Coordenadas Ortofotografía		
		Este	Norte	Elevación	Este	Norte	Elevación
11	PC10	787574.94	9957462.30	2742.20	787574.85	9957462.30	2742.01
12	PC11	787923.38	9957066.25	2756.95	787923.32	9957066.17	2756.81
13	PC12	787908.68	9956912.80	2760.67	787908.64	9956912.83	2760.54
14	PC13	787907.22	9956874.95	2760.87	787907.09	9956875.04	2761.41
15	PC14	787904.13	9956743.36	2766.53	787904.10	9956743.30	2766.15
16	PC15	787866.13	9956533.44	2779.72	787866.05	9956533.47	2779.24
17	PC16	787908.52	9956436.67	2779.78	787908.49	9956436.52	2780.17
18	PC17	787798.91	9956621.61	2774.71	787798.81	9956621.65	2774.76
19	PC18	787705.68	9956937.40	2760.81	787705.60	9956937.44	2760.93
20	PC19	787663.68	9957284.33	2745.12	787663.65	9957284.31	2745.06
21	PC20	787457.81	9957222.70	2738.62	787457.89	9957222.72	2739.00
22	PC21	787462.50	9957439.86	2732.08	787462.24	9957439.93	2732.04
23	PC22	787469.48	9957509.11	2727.75	787469.20	9957509.26	2728.27

*Nota:* La tabla muestra las coordenadas en elevación, Este y Norte obtenidas con la Ortofotografía y con RTK de los 22 puntos de chequeo.

En la figura 21 se presenta la distribución de los puntos de chequeo

**Figura 21***Distribución de puntos de chequeo*

*Nota:* La imagen muestra la distribución de los puntos de chequeo sobre la Ortofotografía.

Se compara las coordenadas obtenidas con RTK con las coordenadas obtenidas en la Ortofotografía para obtener las diferencias y errores posicionales de cada punto y finalmente se obtienen las exactitudes posicionales horizontal y vertical del levantamiento, a través de la norma del NSSDA.

## Capítulo V: Análisis de los resultados

Una vez desarrollados los procesos que se encuentran especificados en la metodología, se obtuvo el producto final, es decir, la cartografía a detalle de las aproximadamente 200 ha que conforman el IASA I, el cual se puede observar a continuación, en la Figura 22.

### Figura 22

*Cartografía de detalle generada a través de fotogrametría de corto alcance correspondiente al IASA I, hacienda El Prado.*



*Nota.* La figura muestra la cartografía a detalle, la cual tiene un área de 149,978 hectáreas.

En la figura 22 se puede visualizar la digitalización final de las curvas de nivel, las edificaciones, las aceras, la vegetación y las vías del área comprendida. Durante este proceso hubo tramos de los elementos del plano que se realizaron mediante comprobación en campo, debido a que la vegetación tapaba parte de estas secciones.

Para más detalle, el plano del levantamiento se encuentra adjuntado en el *Anexo B*.

La cartografía final fue presentada en escala 1:5000, debido a la magnitud del proyecto, no obstante, los procedimientos para su obtención fueron realizados en escala 1:1000.

Seguidamente se obtuvo la información del levantamiento altimétrico del terreno, mediante un corte longitudinal y dos cortes transversales de todo el proyecto, tal y como se observa en las Figuras 23 y 24. También se adjunta el plano a escala de los perfiles generados en el *Anexo C*.

## Figura 23

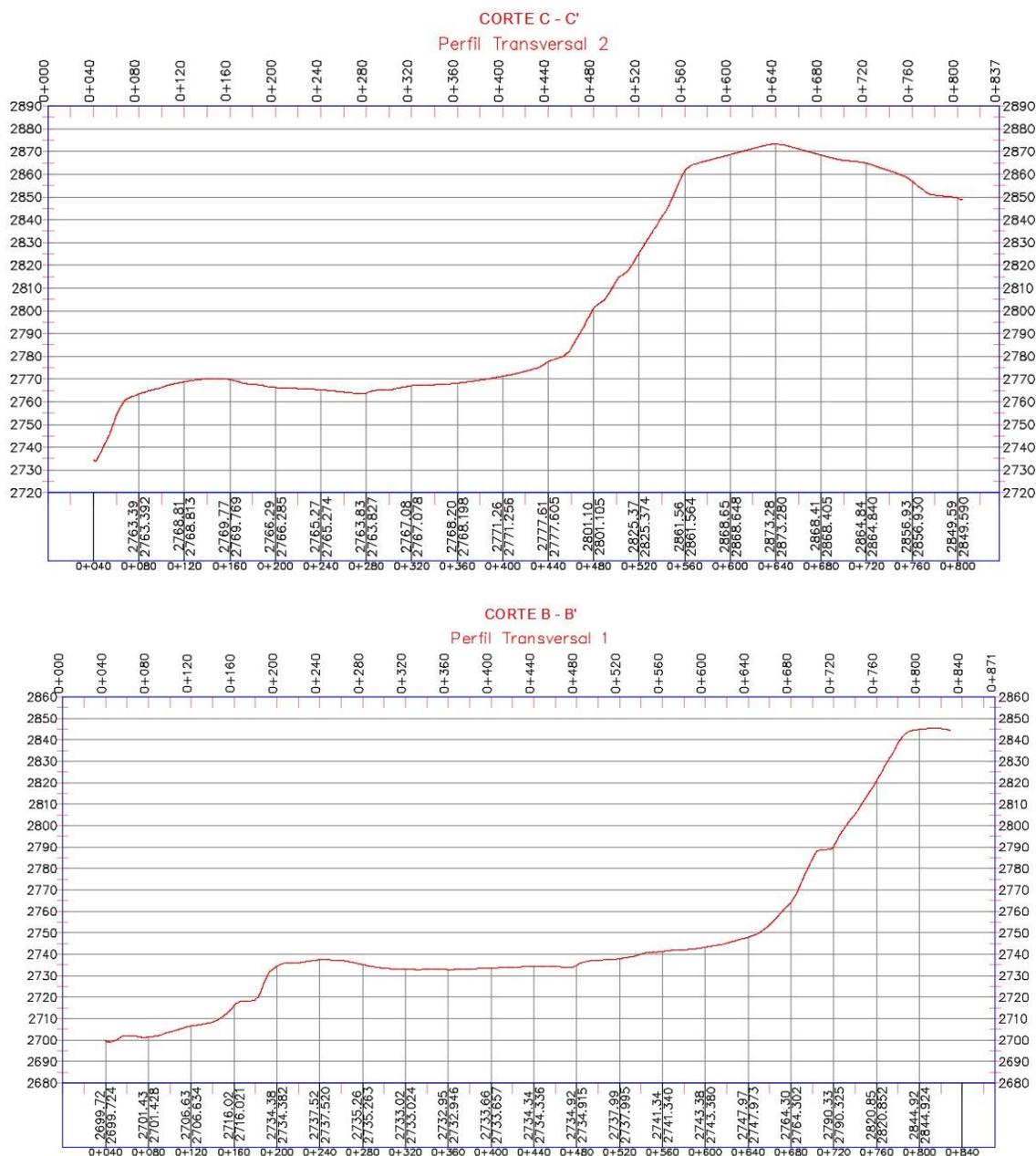
### Perfil longitudinal



*Nota.* En el gráfico se puede observar el abscisado del perfil cada 40 metros y la grilla vertical cada 10 metros.

**Figura 24**

*Perfiles transversales*



*Nota.* En los gráficos se representa el abscisado del perfil cada 40 metros y la grilla vertical cada 10 metros.

Finalmente, para efectuar el control de calidad de la cartografía a detalle

generada, como se indica en el capítulo 3, se realizó el proceso de validación de exactitud posicional, obteniendo los siguientes resultados que se presentan en la tabla 5 y tabla 6:

**Tabla 5**

*Diferencias y errores posicionales obtenidos en cada punto de chequeo*

ID	CODE	Diferencias			Error Posicional
		Este	Norte	Elevación	
1	BASE				
2	PC1	-0.06	0.09	-0.21	0.107
3	PC2	0.03	-0.11	0.16	0.115
4	PC3	0.00	0.06	0.15	0.055
5	PC4	-0.03	0.09	0.18	0.092
6	PC5	-0.15	0.15	-0.01	0.208
7	PC6	0.02	0.07	0.09	0.074
8	PC7	-0.16	-0.04	0.09	0.167
9	PC8	-0.14	0.03	0.55	0.138
10	PC9	0.00	0.02	-0.39	0.022
11	PC10	-0.08	0.00	-0.19	0.081
12	PC11	-0.06	-0.08	-0.14	0.100
13	PC12	-0.04	0.03	-0.13	0.047
14	PC13	-0.13	0.09	0.54	0.152
15	PC14	-0.03	-0.05	-0.39	0.061
16	PC15	-0.08	0.03	-0.48	0.085
17	PC16	-0.02	-0.15	0.40	0.154
18	PC17	-0.10	0.04	0.04	0.112
19	PC18	-0.08	0.04	0.12	0.084
20	PC19	-0.03	-0.02	-0.05	0.037
21	PC20	0.08	0.03	0.38	0.083
22	PC21	-0.26	0.06	-0.04	0.269
23	PC22	-0.28	0.15	0.52	0.320

*Nota.* Esta tabla muestra el cálculo del error posicional de cada uno de los puntos con 3 cifras significativas.

**Tabla 6***Exactitud posicional horizontal y vertical*

<b>RMSE Este</b>	<b>RMSE Norte</b>	<b>RMSE E</b>	<b>RMSE r</b>	<b>Exactitud r (95%)</b>	<b>Exactitud E (95%)</b>
0.1101	0.0759	0.2898	0.1338	0.2277	0.5679

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados del cálculo de la exactitud posicional horizontal y vertical con 4 cifras significativas.

Como se visualiza en la Tabla 6, la exactitud posicional horizontal al 95% de confianza según la norma del NSSDA, basada en el RMS, es de 0,227 m.

Y la exactitud posicional vertical al 95% de confianza según la norma del NSSDA, basada en el RMS, es de 0,5679 m.

En base a las exactitudes posicionales calculadas, la cartografía cumple con la precisión horizontal máxima de 30 cm (IGM, 2019), requerida para escala 1:1000, que fue la escala de trabajo, sin embargo, no cumple con la precisión vertical máxima de 33,33 cm (ASPRS, 1990) requerida para escala 1:1000, con curvas de nivel cada metro.

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

- Se generó efectivamente cartografía a detalle de aproximadamente 200 hectáreas a través de fotogrametría de corto alcance (UAV), desarrollando los procesamientos fotogramétricos, mediante los programas Pix4D y Global Mapper, con los cuales se obtuvo la ortofotografía y modelo digital del terreno, que sirvió de base para la digitalización en Civil 3D del levantamiento planimétrico y altimétrico, dando como producto final, la cartografía y los perfiles longitudinales y transversales de las 149,978 hectáreas del perímetro del IASA I, hacienda el prado, en formato CAD a una escala de trabajo de 1:1000, sin embargo, por fines de presentación se muestra en un plano a escala 1:5000.
- Con la validación estadística se obtuvo una exactitud posicional horizontal al 95% de confianza, de 0,227 m y una exactitud posicional vertical al 95% de confianza, de 0,5679 m. Por tanto, la cartografía cumplió con la precisión horizontal máxima de 30 cm (IGM, 2019), requerida para escala 1:1000, que fue la escala de trabajo, sin embargo, no cumplió con la precisión vertical máxima de 33,33 cm (ASPRS, 1990) requerida para escala 1:1000. Este resultado se debe a la cantidad de obstáculos del terreno que existen en el área de estudio, a la falta de más puntos control terrestre y a la naturaleza misma del método (mediciones indirectas). Además, al existir grandes áreas de superficie donde no es posible capturar el terreno a través de las fotografías debido a la existencia de vegetación (árboles de 20 a 30 metros de altura), se generan zonas sin

información en el modelo digital del terreno y posteriormente curvas de nivel cuya representación altimétrica no es fiel a la realidad.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda realizar un procesamiento con mayor número de puntos de control para mejorar la precisión horizontal y vertical del modelo digital de superficie (MDS) y la nube de puntos, para alcanzar una escala de trabajo mayor.
- Si el proyecto presenta zonas de alta densidad de vegetación, donde el UAV no pueda capturar imágenes del terreno, es recomendable el uso de dispositivos convencionales como estación total, para el levantamiento y la obtención de puntos directamente del terreno, obteniendo una mayor cantidad de información y así poder lograr una mejor precisión en el levantamiento topográfico, una mejor calidad en el proceso de interpolación por triangulación y un modelo digital de terreno más fiel a la realidad.
- Una vez obtenida la ortofoto u ortomosaico, es recomendable reducir su resolución e importarlo a un formato JP2, esto con el fin de que al momento de realizar la digitalización en 2D se pueda tener un ambiente de trabajo CAD más trabajable, cabe mencionar que, para el presente proyecto fue obligatorio realizar este procedimiento ya que al ser el ortomosaico un archivo demasiado grande no pudo ser soportado por el software AutoCAD Civil 3D.
- Es recomendable también, la disminución controlada de la resolución de la nube de puntos al momento de generar el modelo digital de terreno, para obtener mejores resultados en la obtención de las curvas de nivel, ya que

estas resultan más suavizadas.

## Bibliografía

- Almeida, A. (2021). *DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICO LOCAL PARA GENERAR CARTOGRAFÍA A ESCALAS GRANDES, CASO DE ESTUDIO: ISLAS-GALÁPAGOS*.
- Angulo Valencia, L. V. (2014). *Generación de cartografía básica a detalle mediante una metodología de toma con aviones no tripulados (UAV's)*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/9434/T-ESPE-048572.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arriola Valverde, S. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga TEC*, 9-12. Obtenido de <file:///C:/Users/robin/Downloads/3144.pdf>
- ASPRS. (1990). *ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS*. Obtenido de [http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/1990\\_jul\\_1068-1070.pdf](http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/1990_jul_1068-1070.pdf)
- Benitez, E. (1995). *SISTEMAS DE REFERENCIA*. Valencia. Obtenido de [http://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct42/ct42\\_4.pdf](http://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct42/ct42_4.pdf)
- Claros, R., Guevara, Á., & Pacas, N. (2016). *APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS*.
- Franco Maass, S., & Valdez Pérez, M. E. (2003). *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. Mexico: Universidad Autónoma del Estado de Mexico.
- Galcerá, S., Seguí, A., & Portalés, C. (2015). *Optimización de Proyectos de Vuelo en Fotogrametría Aerea*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gomez , R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. *Informes de la Construcción Vol. 73*, 1-10. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/6050/7426>
- IGM. (2019). *PROTOCOLO DE FISCALIZACIÓN PARA PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE CON FINES CATASTRALES ESCALA 1 : 1 000, OBTENIDA A TRAVÉS DE MÉTODO AEROFOTOGRAMÉTRICO, DIGITALIZACIÓN 2D SOBRE ORTOFOTO O LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO*.
- Instituto Panamericano de Geografía e Historia. (2019). *GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE DATOS ESPACIALES*. Obtenido de [http://publicaciones.ipgh.org/publicaciones-ocasionales/Guia\\_Evaluacion\\_Exactitud\\_Posicional\\_Datos\\_Espaciales.pdf](http://publicaciones.ipgh.org/publicaciones-ocasionales/Guia_Evaluacion_Exactitud_Posicional_Datos_Espaciales.pdf)
- Jauregui, I. (2010). *Introducción a la fotogrametría*.

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial (NEVI) - 12*. Quito: Volumen 2.
- National Standard for Spatial Data Accuracy. (1998). *National Standard for Spatial Data Accuracy*. Obtenido de <https://transportation.ky.gov/Highway-Design/Documents/FGDC%20STD%20007.3%201998.pdf>
- PIX4D. (2021). *PIX4D*. Obtenido de <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360033638951-Tama%C3%B1o-de-pixel-en-el-terreno-GSD>
- Pix4Dmapper. (2019). *Guía de Inicio*. LATAM: Pix4D. Obtenido de [https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/traductions/Pix4Dmapper\\_Getting\\_Started\\_Master\\_4.0\\_ES\\_FINAL.pdf](https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/traductions/Pix4Dmapper_Getting_Started_Master_4.0_ES_FINAL.pdf)
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Cáceres. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-121-Fases-del-proceso-fotogrametrico-digital\\_fig43\\_272090105](https://www.researchgate.net/figure/Figura-121-Fases-del-proceso-fotogrametrico-digital_fig43_272090105)
- Sánchez, J. (2006). *INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos.
- Sani, J. (2015). : *VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS-ECUADOR*. Sangolquí.
- Santamaría Peña, J. (2011). *La Cartografía y las Proyecciones Cartográficas*. La Rioja: Universidad de La Rioja.
- Santos Pérez, L. J. (2005). Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lidar, el posible futuro de la Cartografía catastral urbana. *Catastro*, 131-154. Obtenido de [http://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct53/05-catastro\\_53.pdf](http://www.catastro.meh.es/documentos/publicaciones/ct/ct53/05-catastro_53.pdf)
- Trimble Inc. (- de Enero de 2015-2020). *Trimble.com*. Obtenido de Trimble.com: <https://es-la.geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-12/Datasheet%20-%20Trimble%20R8s%20GNSS%20-%20Spanish%20Lat%20Amer%20-%20Screen.pdf>
- UNNE. (2011). *PRINCIPIOS DE FOTOGRAMETRÍA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE.
- WINGTRA. (2021). Drone Wingtra.

## Anexos