

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de fotogrametría
con vehículo aéreo no tripulado**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Leonardo Brenes González

Cartago, Junio 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

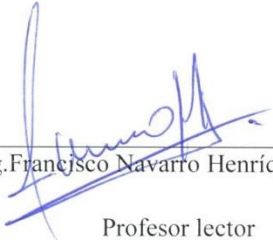
PROYECTO DE GRADUACIÓN

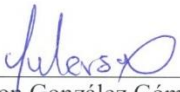
ACTA DE APROBACIÓN


Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de fotogrametría con vehículo aéreo no tripulado, realizado por el señor Leonardo Brenes González y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador


Ing. Francisco Navarro Henríquez, M.Sc.
Profesor lector


Ing. Jeferson González Gómez, M.Sc.
Profesor lector


Ing. Sergio Arriola Valverde
Profesor asesor

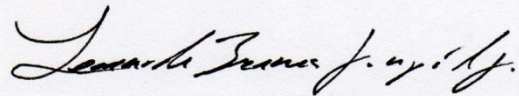
Cartago, 15 de Junio de 2016

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, es su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Leonardo Brenes González

Cédula: 304380335

Resumen

Costa Rica es un país con gran cantidad de recursos naturales donde el desarrollo económico ha estado ligado históricamente a la producción agrícola. Es por ello que la pérdida de nutrientes y problemas relacionados a la erosión tiene un alto impacto. En casos particulares este fenómeno ocurre principalmente debido al clima, malas prácticas agrícolas, uso excesivo de fertilizantes entre otros factores que afectan el potencial productivo de los suelos. La erosión no solo afecta al suelo, también contamina los recursos hídricos por medio de sedimentos. Uno de los métodos para cuantificar la erosión del suelo, es por medio de parcelas de escorrentía las cuales por lo general se encuentran delimitadas por tabiques de metal incrustado en el suelo y sistemas de tanques receptores que permitan almacenar agua y cuantificar los sedimentos arrastrados.

En nuestro país normalmente las parcelas de escorrentía se utilizan para cuantificar la erosión, pero sus desventajas en el costo de construcción, mantenimiento, tiempo, capacitación, tamaño y dificultades en la medición lo hacen un método no muy eficaz.

Por lo tanto, se está explorando como solución alternativa a las parcelas de escorrentía la técnica de fotogrametría mediante sistemas UAV para la generación de mapas tridimensionales suficientemente precisos que permitan cuantificar la erosión.

El presente proyecto plantea el desarrollo de una metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de la técnica de fotogrametría mediante el empleo de sistemas UAV. Dicha metodología permitirá cuantificar erosión de manera más sistemática, precisa y menos invasiva en comparación al empleo de parcelas de escorrentía.

Palabras clave: Agisoft, fotogrametría, mapa 3D, modelo de elevación digital, parcelas de escorrentía, sistema UAV.

Abstract

Costa Rica is a country with many natural resources, where the economic development is linked to the agricultural production. Therefore, the loss of nutrients and problems related to erosion has a high impact. Some of the causes of this phenomenon are weather conditions, poor agricultural practices, excessive fertilizer use and other factors affecting the productive potential of soils. Erosion not only affects the soil, also pollutes the water resources through sediments. One method to quantify the soil erosion is through runoff plots, which usually are bounded by walls of metal embedded in the ground and a system of receiving tanks that allow storing water and quantify sediments.

In our country, runoff plots are normally used to quantify the erosion, but its disadvantages in the cost of construction, maintenance, time, training, size and difficulties measuring make it a not effective method.

Therefore, an alternative to runoff plots is being explored with the technique of UAV photogrammetry for generation of three-dimensional maps as a solution to quantify erosion.

This project proposes the development of a methodology for generating three-dimensional maps from UAV photogrammetric data. This methodology will quantify erosion in a more systematic, accurate, and less invasive way in comparison to the utilization of runoff plots.

Keywords: Agisoft, digital elevation model, photogrammetry, runoff plot, three-dimensional map, Unmanned Aerial Vehicle.

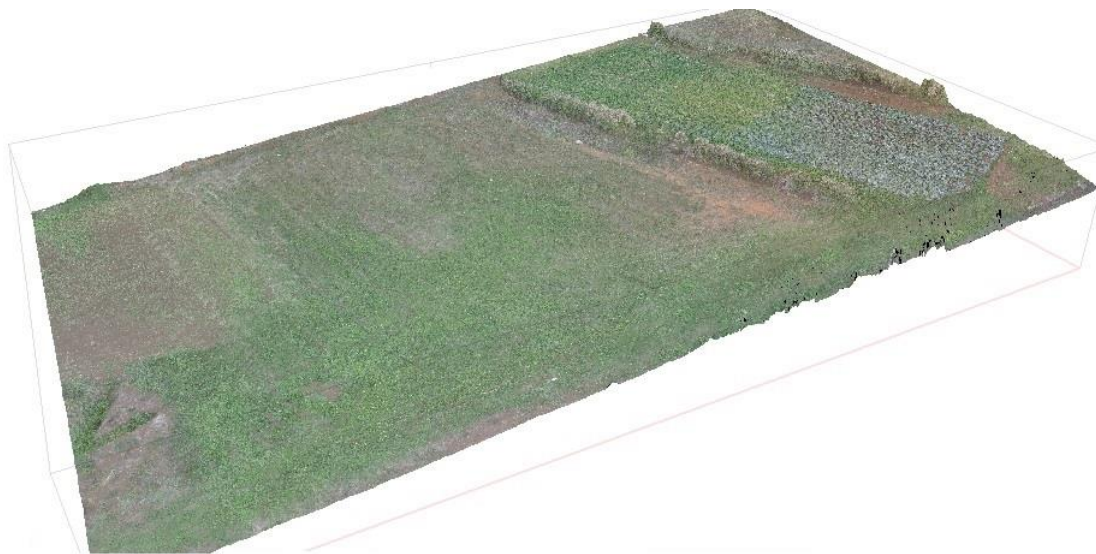
Dedicatoria

A mi madre Ruth, a mi padre Leonardo por el sacrificio de darme la oportunidad de estudiar, cumplir con una de mis metas académicas y el apoyo incondicional brindado en mi formación profesional. Son un ejemplo de esfuerzo y lucha.

A mi abuela Elda, Betsy, Daniela, Mario, Tere, Mau y su familia por el amor y cariño brindado.

A mis amigos de la universidad, Alina, José Paulo, Diego, Cristina, Andrés, Juan, Ricardo, Carlos, David y muchos más que estuvieron conmigo en este camino.

A todas esas personas que una o de otra forman estuvieron en mi formación personal y profesional les doy las gracias por todo.



*‘Solo una cosa vuelve un sueño imposible,
el miedo a fracasar.’*

Paulo Coelho.

Agradecimientos

Gracias a Dios y la Virgen de los Ángeles por permitirme compartir este momento.

Al Dr.Ing. Renato Rimolo-Donadio, por permitirme ser parte de este proyecto y la confianza brindada en mi persona, al igual que al Ing. Sergio Arriola-Valverde por la ayuda brindada y sus consejos en la elaboración del proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Agrícola y Escuela de Ingeniería Electrónica del TEC, por facilitarme los recursos para la elaboración del proyecto.

Al Ing. Braulio Umaña del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción del TEC.

Al grupo de colaboradores del PRIAS del CeNAT.

A cada una de esas personas que colaboraron y aportaron en mi formación personal y profesional a lo largo de mi vida como estudiante del Tecnológico de Costa Rica.

A la generación 2008-2011 de la Orquesta de Guitarras del TEC y al grupo Jam-TEC generación 2011-2012 por poder ser parte de ellos y vivir experiencias maravillosas.

Índice General

Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xiv
1 Capítulo 1: Introducción.	1
1.1 Objetivos y estructura del documento.....	4
2 Capítulo 2: Marco teórico.....	6
2.1 Sistemas UAV.....	6
2.1.1 Software para la estación en tierra.....	7
2.1.2 Sistema gimbal	8
2.2 Fotogrametría UAV	9
2.2.1 Fotografías aéreas.....	10
2.2.2 Parámetros de ajuste para un sensor de imagen	11
2.2.3 Georreferenciación	12
2.2.4 Distancia de muestreo.....	14
2.2.5 Altura de vuelo	14
2.2.6 Traslape de imágenes	16
2.2.7 Mapas y modelos 3D	21
2.3 Cámaras digitales.....	22
2.3.1 Sistemas de visión	23
2.3.2 Sistemas estéreos	23
2.3.3 Sistemas estéreos con una sola cámara	24
2.3.4 Parámetros extrínsecos e intrínsecos	25
2.4 Imágenes digitales.....	30
2.4.1 Imágenes en color.....	31
2.4.2 Filtro de Bayer	32
2.4.3 Distorsión de imágenes.....	33
2.4.4 Formatos de imágenes digitales.....	35
2.4.5 Tratamiento de imágenes.....	36

2.5	Software para procesamiento de imágenes	37
2.5.1	Software comercial.....	37
2.5.2	Software libre	38
3	Capítulo 3: Metodología para generación de mapas en 3D.....	39
3.1	Análisis y selección solución.....	40
3.1.1	Primera solución: Desarrollo full-custom	40
3.1.2	Segunda solución: Software comercial para fotogrametría con UAV	41
3.1.3	Tercera solución: Open software para fotogrametría con UAV.....	42
3.2	Selección de solución.....	43
3.2.1	Selección de software comercial	45
3.3	Metodología de reconstrucción en 3D	47
3.4	Descripción de módulos.....	47
3.4.1	Módulo planeamiento del vuelo	47
3.4.2	Módulo imágenes	48
3.4.3	Módulo procesamiento	48
3.5	Planeamiento de un vuelo fotogramétrico	49
3.6	Módulo de procesamiento.....	51
4	Capítulo 4: Validación de la metodología para generar en mapas 3D	54
4.1	Reconocimiento del campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola.....	54
4.1.1	Sistema UAV utilizado.....	55
4.1.2	Estación de trabajo	57
4.2	Resultados primer vuelo	57
4.2.1	Resultados procesamiento primer vuelo.....	60
4.2.2	Pruebas de automatización de modelos.....	63
4.3	Resultados segundo vuelo con puntos de control	65
4.3.1	Resultado de procesamiento segundo vuelo.....	69
4.3.2	Correcciones en procesamiento del segundo vuelo	73
5	Capítulo 5: Conclusiones	82
5.1	Conclusiones.....	82
5.2	Recomendaciones	83
6	Referencias.....	84

Apéndices	92
A. Selección de software para fotogrametría	92
B. Selección de cámara	101
C. Calibración y ajuste de cámara digital.....	102
D. Procesamiento de imágenes RAW	105
E. Hoja de cálculo de distancia de muestreo y altura de vuelo	106
F. Puntos de control con RTK y marcadores	107
G. Restricciones de operación para vehículos aéreos no tripulados.....	111
H. Scripts de Python	112

Índice de figuras

Figura 2.1	Ejemplo de mallado en Mission Planner, tomado de [17].	8
Figura 2.2	Sistema gimbal.	9
Figura 2.3	Precisión en los métodos de medición en relación al objeto/tamaño del área por Ph.D Henri Eisenbei [15].	10
Figura 2.4	Tiempo exposición, imagen de la izquierda tiempo corto, derecha tiempo largo, tomado de [23].	12
Figura 2.5	Ejemplo de distribución de puntos de control, adaptado de [26].	13
Figura 2.6	Representación altura de vuelo, adaptado de [27].	15
Figura 2.7	Traslape de imágenes, adaptada de [29].	17
Figura 2.8	Sistema UAV con ancho del sensor horizontal.	18
Figura 2.9	Sistema UAV con ancho del sensor vertical.	20
Figura 2.10	Modelo para generar mapas 3D.	21
Figura 2.11	Sensor de matriz, tomado de [31].	22
Figura 2.12	Sistema de coordenadas visión estéreo, adaptado de [34].	24
Figura 2.13	Captura correcta de imágenes para superficies o fachadas.	25
Figura 2.14	Movimiento axial de la cámara.	25
Figura 2.15	Ejemplo de patrón de ajedrez en 2D, tomado de [38].	26
Figura 2.16	Modelo de cámara de estenoscopio, adaptado de [39].	26
Figura 2.17	Sistema de coordenadas en 3D, adaptado de [41].	29
Figura 2.18	Representación de formación de imágenes, tomado de notas de clase PDI P.Alvarado [42].	31
Figura 2.19	Colores primarios, (a) aditivos, (b) sustractivos, tomado de [42].	32
Figura 2.20	Representación de filtro de Bayer con los colores rojo, verde y azul, adaptado de [31].	32
Figura 2.21	Tipos de distorsión radial, adaptada de [39].	33
Figura 2.22	Distorsión tangencial, adaptada de [39].	34
Figura 3.1	Diagrama para la metodología de generación de mapas 3D.	47
Figura 3.2	Secuencia para el planeamiento de vuelo UAV.	49

Figura 3.3	Secuencia módulo de procesamiento.	51
Figura 4.1	Campo de prácticas Escuela de Ingeniería Agrícola.	54
Figura 4.2	Puntos de control y marcadores utilizados.	55
Figura 4.3	Sistema UAV con cámara Gopro Hero 4.	56
Figura 4.4	Menú cámara Gopro Hero 4.	56
Figura 4.5	Configuración de cámara modo video.	58
Figura 4.6	Patrón de vuelo primera prueba.	59
Figura 4.7	Interfaz de Agisoft Photoscan.	60
Figura 4.8	Resultado nube dispersa de puntos primer vuelo.	61
Figura 4.9	Resultado nube densa de puntos del primer vuelo.	61
Figura 4.10	Resultado de vistas superior y lateral del modelo 3D.	62
Figura 4.11	Lógica de programación para proceso de automatización.	64
Figura 4.12	Ejecución del script en Python.	64
Figura 4.13	Configuración cámara Gopro en modo time lapse.	65
Figura 4.14	Sincronización de tiempos GOPRO y sistema UAV.	66
Figura 4.15	Ruta automática para parcela de agrícola.	67
Figura 4.16	Información del archivo de telemetría sistema UAV.	68
Figura 4.17	Georreferenciación mediante Mission Planner.	68
Figura 4.18	Interfaz de Agisoft Photoscan con imágenes georreferenciadas.	69
Figura 4.19	Establecimiento de puntos de control en el software Agisoft PhotoScan.	70
Figura 4.20	Nube dispersa de puntos segundo vuelo.	71
Figura 4.21	Vista frontal y superior del modelo 3D.	71
Figura 4.22	Nube dispersa de puntos correcta, vista frontal.	73
Figura 4.23	Interfaz del software Agisoft PhotoScan con marcadores del segundo vuelo.	74
Figura 4.24	Nube dispersa de puntos correcta, vista superior.	74
Figura 4.25	Nube densa de puntos con correcciones.	75
Figura 4.26	Propuesta de modelo 3D	76
Figura 4.27	Modelo de elevación digital final.	77
Figura 4.28	Informe de puntos de control.	78

Figura 4.29	Medición de área y volumen.	78
Figura 4.30	Medición de Volumen y área en modelo cerrado.	79
Figura A. 1	Precio de Licencia de software de fotogrametría.	100
Figura C. 1	Diagrama de flujo calibración de cámara.....	103
Figura C. 2	Ajustes de parámetros en el menú de la cámara digital.	104
Figura C. 3	Parámetros de calibración de cámara.	105
Figura E. 1	Hoja de cálculo distancia de muestreo y altura.	107
Figura F. 1	Sistema de posicionamiento con RTK, adaptada de[65].	108
Figura F. 2	Sistema de posicionamiento RTK de la Escuela de Ingeniería en Construcción, TEC.....	108
Figura F. 3	Utilización del sistema de posicionamiento RTK.....	109
Figura F. 4	Puntos de control suministrados por el sistema RTK.	109
Figura F. 5	Ortofoto con puntos de control en el campo de agrícola ubicado en las instalaciones del TEC.....	110
Figura F. 6	Marcadores como puntos de referencia, tomado de [66].	110

Índice de tablas

Tabla 2.1	Definición de parámetros para altura de vuelo.	15
Tabla 2.2	Definición de parámetros traslape de imágenes.	17
Tabla 2.3	Descripción de parámetros de traslape con anchura perpendicular.	18
Tabla 2.4	Descripción de parámetros intrínsecos.	28
Tabla 2.5	Descripción de parámetros extrínsecos.	28
Tabla 2.6	Descripción de parámetros distorsión radial.	34
Tabla 2.7	Descripción de parámetros distorsión tangencial.	35
Tabla 3.1	Requerimientos y restricciones mínimas.	39
Tabla 3.2	Comparación de soluciones planteadas.	43
Tabla 3.3	Comparación de soluciones comerciales.	45
Tabla 4.1	Especificaciones de hardware de la estación de trabajo.	57
Tabla 4.2	Resultados teóricos primer vuelo.	63
Tabla 4.3	Resultados del modelo 3D primer vuelo.	63
Tabla 4.4	Resultados teóricos segundo vuelo.	66
Tabla 4.5	Resultado del modelo 3D segundo vuelo.	72
Tabla 4.6	Tiempos de procesamiento segundo vuelo.	72
Tabla 4.7	Resultado con correcciones del procesamiento, segundo vuelo.	80
Tabla A. 1	Características de procesamiento Pix4D [45].	92
Tabla A. 2	Precios de licencia Pix4D [54].	93
Tabla A. 3	Especificaciones mínimas de hardware para Pix4D [55].	93
Tabla A. 4	Características de procesamiento Agisoft PhotoScan [46].	93
Tabla A. 5	Precios de licencia Agisoft PhotoScan [56].	94
Tabla A. 6	Especificaciones mínimas de hardware para Agisoft PhotoScan [57].	95
Tabla A. 7	Características procesamiento Erdas Imagine [47].	95
Tabla A. 8	Precios de licencia Erdas Imagine [47].	96
Tabla A. 9	Especificaciones mínimas de hardware para Erdas Imagine[58].	96
Tabla A. 10	Características de procesamiento PhotoModeler [48].	97
Tabla A. 11	Precio de licencia Photomodeler Scanner[59].	97
Tabla A. 12	Especificaciones mínimas de hardware para Photomodeler Scanner[59].	97

Tabla A. 13	Especificaciones mínimas de hardware VisualSFM [49].	98
Tabla A. 14	Sistemas operativos con capacidad de ejecutar Point Cloud Library [50].	98
Tabla A. 15	Sistemas operativos y arquitectura de hardware probados para OpenCV [60].	99
Tabla A. 16	Precios de Software para fotogrametría.	99
Tabla A. 17	Requisitos de hardware de software comercial.	100
Tabla A. 18	Sistemas operativos soportados por software comercial.	100
Tabla B. 1	Especificaciones de cámara.	101
Tabla B. 2	Resolución de Cámara GoPro Hero 4 Silver [61].	101
Tabla B. 4	Selección de cámara.	102

1 Capítulo 1: Introducción.

En Costa Rica, el desarrollo económico y social ha estado ligado a la producción agrícola como actividad generadora de divisas, fuente de trabajo y riqueza. La agricultura primaria está bien diversificada con cultivos de café, banano, de ciclo corto, ganado de carne, productos lácteos y plantaciones forestales que representan la gran mayoría del uso de la tierra [1]. Se estima que estas actividades se realizan en más de 70 cantones del país, principalmente en sus zonas altas [2].

La producción agrícola produce cambios físicos en la estructura del suelo. La pérdida de nutrientes, salinización, acidificación y contaminación son indicadores de procesos de degradación química que sufren los suelos como consecuencia de las prácticas agrícolas. La productividad puede, no obstante, recuperarse incorporando estrategias de manejo, caso contrario la problemática del suelo erosionado, donde es más difícil revertir la situación [3].

La provincia de Cartago, se identifica como una de las zonas con mayor generación de erosión, debido a factores como pendiente, clima, tipo de suelo, así como tecnologías de producción. Esto provoca una disminución del potencial productivo desde el punto de vista agrícola y ganadero. [2]

La erosión del suelo es un problema que no solo afecta la degradación de este, sino, implica una fuente de contaminantes no localizados que daña diversos sistemas, entre ellos la red hidrográfica; los sedimentos presentes en los ríos son uno de los principales contaminantes del agua a nivel nacional e inclusive impactan negativamente actividades conexas como la producción hidroeléctrica de energía [4].

Entre los principales factores que influyen en la erosión del suelo está la escorrentía, la cual sucede cuando la intensidad de lluvias excede la tasa de infiltración, es decir cuando el suelo está saturado y la precipitación fluye sobre la superficie del terreno. [5]. Por ejemplo, el problema de las inundaciones se relaciona con valores altos de escorrentía y dependen de la cantidad de lluvia, tipo de suelo, estado superficial, cobertura del suelo y la pendiente del mismo [1].

De acuerdo a [6], existen diversas metodologías para la cuantificación de la erosión en el suelo, que pueden ser divididas en métodos directos, realizados en la zona donde ocurre la erosión y métodos indirectos como el análisis estadístico en una zona. Las metodologías más empleadas para cuantificar la erosión son: medición de escorrentía con parcelas de escurrimiento, utilización de clavos o varillas metálicas graduadas y estaciones de aforo.

La utilización de clavos graduados de 50 cm y una pulgada de grosor, permite medir de una manera aproximada de la erosión del suelo. Esta técnica se caracteriza por ser una de las formas más sencillas y de menor costo, pero presenta las desventajas al no poder cuantificar la escorrentía causante de la erosión y errores de medición debido a alteraciones en la posición por efecto del hombre o animales[6].

Las estaciones de aforo consisten en la utilización de limnígrafos y muestreadores de sedimentos localizados en el curso del agua para registrar el caudal del agua y recolección de diferentes volúmenes de sedimentos en suspensión. Es utilizado normalmente en cuencas hidrográficas, pero tiene la desventaja de ocupar un registro de años anteriores para obtener información confiable [6].

Las parcelas de escorrentía es el método más empleados para cuantificar la erosión del suelo en Costa Rica, y por lo general están constituidas por un campo experimental de forma rectangular, donde varían desde 2 m x 2m hasta 4 m x 20 m, en sentido de la pendiente del terreno. Además, dichas parcelas se encuentran delimitadas por tabiques de metal incrustado en el suelo para impedir escorrentía de otros campos aledaños, y cuentan con un sistema receptor de tanques ubicado en el lado inferior del campo con las dimensiones que permitan almacenar una cantidad de agua y sedimentos [7].

En Costa Rica se utilizan normalmente las parcelas de escorrentía para cuantificar la erosión pero presentan la desventaja de su alto costo en construcción, mantenimiento, tiempo, trabajo manual no calificado, capacitación de personal o agricultores, personal inmediato, pérdida de datos, errores experimentales, dificultades para la obtención de información por los métodos manuales que se utilizan y cantidad de repeticiones para medir variaciones en los tratamientos [8].

Como solución alternativa a las parcelas de escorrentía se está explorando la fotogrametría con sistema UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle). Dicha técnica permite la captura y extracción de información por medio de fotografías georreferenciadas y mediante un postprocesamiento de la información del levantamiento se pueden generar mapas tridimensionales de alta resolución [9].

Por ejemplo, en [10], se utiliza la técnica de fotogrametría para generar modelos de elevación digital (por sus siglas en inglés, DEM) para determinar el volumen y áreas de tierra deslizada, usando cámaras digitales estándares montadas en un sistema UAV.

La fotogrametría UAV abre diferentes aplicaciones en dominio de corta distancia (zonas con tamaños entre m^2 y km^2 dependiendo del tamaño, peso y batería) combinando fotogrametría aérea y terrestre, lo que introduce a una técnica de bajo costo (entre \$600 y \$5000 que representa el costo de un sistema UAV comercial básico) en comparación con aviones tripulados o acceso a imágenes satelitales. Las imágenes adquiridas por un sensor a bordo de un sistema UAV pueden ser utilizadas para mapeo de texturas en alta resolución en modelos digitales de superficie (por sus siglas en inglés, DSM) y modelos en 3D, al igual que en rectificación de imágenes [11].

Por lo tanto, la fotogrametría UAV surge como una metodología alterna al estudio de la erosión, por ser portable, escalable, obtención de imágenes de alta resolución (5 Megapíxeles o mayores), en comparación con imágenes satelitales que podrían tener problemas por cobertura en ciertas regiones y brechas visuales por fenómenos atmosféricos como coberturas de nubes [11]. Las imágenes además no tienen suficiente resolución espacial (de hasta unos 20 cm/píxel) para la realización de estudios precisos de erosión.

El desarrollo de este proyecto de graduación tiene como objetivo general formular una metodología capaz de generar modelos de elevación digital a partir de imágenes georreferenciadas capturadas por un sistema UAV a baja altura.

Actualmente las Escuelas Ingeniería Electrónica e Ingeniería Agrícola del ITCR tiene a disposición un sistema UAV capaz de adquirir variables físicas, imágenes e información georreferenciada [12].

La metodología debe de servir de herramienta a Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR como una solución más precisa al método de parcelas de escorrentía para la cuantificación de la erosión. Por lo tanto, mediante la selección de una herramienta de software adecuada, se procederá a realizar un vuelo de prueba para recolectar información de variables físicas y a su vez capturar imágenes georreferenciadas con un sistema UAV, con el objetivo de generar de modelos de elevación digital para su posterior análisis en la cuantificación de la erosión a nivel temporal.

1.1 Objetivos y estructura del documento.

El proyecto tiene como objetivo general proponer una metodología capaz de generar mapas en 3D mediante el empleo de la técnica de fotogrametría UAV, aplicado a parcelas de escorrentía de bajo porte para cuantificar erosión. Para esto se debe seleccionar una plataforma de software adecuada para la creación de los modelos de elevación digital y además poder determinar de manera precisa los parámetros e información requerida por dicha plataforma para obtener productos fotogramétricos en el orden de unos pocos centímetros de resolución espacial.

Por último, se validará la metodología realizando una prueba de concepto donde se recolectarán imágenes georreferenciadas de una parcela del campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola mediante un vuelo de prueba con el sistema UAV que dispone la Escuela de Ingeniería Electrónica del ITCR. Dicha prueba permitirá, además de validar la metodología, generar un modelo de elevación digital y 3D el cual servirá para estimar la precisión y resolución espacial de sitio en estudio.

La estructura del documento se compone de los siguientes capítulos, en el capítulo 2, se encuentra el marco teórico el cual explica los conceptos teóricos relacionados al desarrollo de la solución. El capítulo 3, presenta el flujo de diseño de ingeniería para llevar a cabo la elaboración de la metodología para la generación de mapas en 3D. En el capítulo 4, se presentan los resultados y análisis obtenidos a partir del vuelo de prueba con el sistema UAV.

Y finalmente el capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones a posibles trabajos futuros en la línea de investigación del proyecto desarrollado.

2 Capítulo 2: Marco teórico

Para plasmar un entendimiento general en la temática del presente proyecto es necesario comprender los principios de la técnica de fotogrametría UAV, cámaras, imágenes y software para la generación de un modelo 3D. Con esto al lector le será más sencillo relacionarse con los términos utilizados y se comprenda las etapas para llevar a cabo un modelo de elevación digital. Si se desea profundizar más en el tema de investigación se recomienda consultarlas referencias bibliográficas que van desde [\[12-40\]](#).

2.1 Sistemas UAV

Los vehículos aéreos no tripulados (por sus siglas en inglés, UAV) son conocidos también bajo el nombre de sistemas aéreos no tripulados (por sus siglas en inglés, UAS), adoptado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica y la Autoridad de aviación civil del Reino Unido, llamados también sistemas aéreos pilotados de forma remota (por sus siglas en inglés, RPAS) por la Organización Internacional de Aviación Civil, al igual que ‘robots aéreos’ o simplemente el término más popular ‘*drones*’[\[13\]](#).

Los sistemas UAVs deben de entenderse como vehículos reutilizables capaces de ser controlados de forma remota, semi-autónoma, autónoma o una combinación de esas capacidades para llevar a cabo ciertas tareas específicas, así como transportar cargas útiles (ente 1kg a 5 kg).Por lo tanto, son una alternativa de bajo costo para la captura de datos de aplicaciones con alta resolución espacial, donde es necesario un sistema UAV, sistemas de control y una cámara digital normal [\[14\]](#).

Dichos sistemas pueden ser utilizados para la adquisición de datos en zonas de difícil acceso sin poner en riesgo la vida humana, a bajas altitudes, con condiciones de nubosidad, cerca de objetos donde sistemas tripulados no pueden volar, puede ser utilizado por ejemplo en montañas, volcanes, zonas de desastre, llanuras de inundación y zonas desérticas [\[15\]](#).

2.1.1 Software para la estación en tierra

Existen diversas herramientas de software que permiten llevar a cabo la planificación la ruta de vuelo en sistemas UAVs, las mismas se han desarrollado aplicaciones militares, de robótica, visión por computador e inteligencia artificial, considerando la prevención de colisiones, rastreo de objetos y maniobras de vuelo. El vuelo con piloto automático se sustenta en puntos definidos por sistemas de posicionamiento global (por sus siglas en inglés, GPS), estableciendo coordenadas definidas como punto de casa (*home*), puntos de inicio, final, de paso, límites y zonas prohibidas [15].

Mission Planner es un software abierto disponible para el trabajo en el proyecto que permite la planificación de una misión en una base o estación de control en tierra para sistemas UAV. Puede ser utilizado como una herramienta para configuración o como un control de vuelo autónomo para el vehículo aéreo no tripulado. El programa es de descarga gratuita, bajo los términos de la licencia general pública *GNU* donde se permite la redistribución y modificación (*Versión 3 GNU License*) [16].

La figura 2.1 muestra un ejemplo de mallado en el software Mission Planner, el cual permite establecer un punto de despegue definido por la posición geográfica del sistema UAV, una ruta de puntos de control o de paso, recorridos en un orden determinado para la obtención de fotografías georreferenciadas traslapadas por medio de una cámara digital.



Figura 2.1 Ejemplo de mallado en Mission Planner, tomado de [17].

2.1.2 Sistema Gimbal

Los sistemas UAV necesitan normalmente sistemas gimbals o sistemas de suspensión de Cardán para el montaje de una cámara digital. Este tipo de monturas presentan un mecanismo de suspensión consistente en estructuras concéntricas cuyos ejes forman un ángulo recto, lo cual permite mantener la orientación de la cámara, aunque su soporte se mueva por vibraciones de la estructura del sistema UAV durante el vuelo o debido a golpes o turbulencia [18].

En la figura 2.2 se observa un sistema gimbal en conjunto a una cámara digital, el sistema presenta 3 motores sin escobillas los cuales corresponden al “pitch”, “roll” y “yaw”.

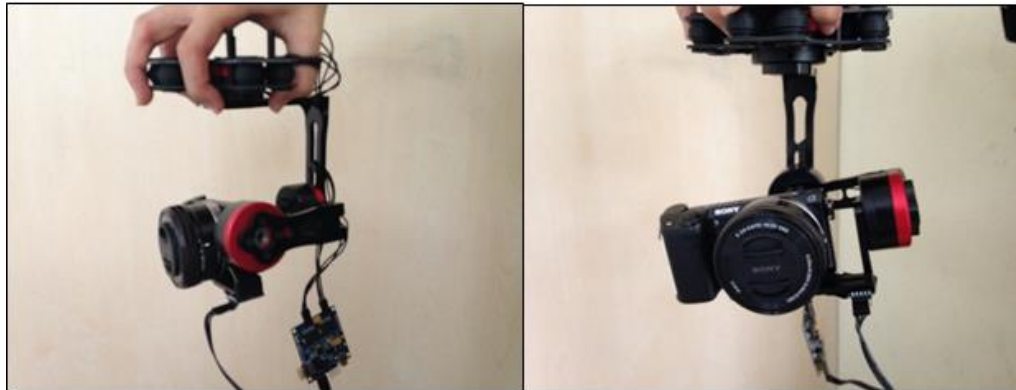


Figura 2.2 Sistema gimbal para una cámara Sony NEX 5.

2.2 Fotogrametría UAV

La fotogrametría UAV permite la reconstrucción tridimensional utilizando la posición, orientación, forma y tamaño de objetos a partir de imágenes bidimensionales, lo cual, facilita el análisis sin estar en contacto físico con el entorno. Por lo tanto, la fotogrametría está relacionada con sistemas de visión por computador, donde el reconocimiento de patrones es un punto importante [19].

En [20] se habla que la fotogrametría de corto alcance aplica para objetos en el rango de 1m a 200 m en tamaño, con una precisión debajo de 0.1 mm en industria de manufactura y 1cm de precisión en industria de arquitectura y construcción. En [15] se presentan la figura 2.3 como una modificación al trabajo presentado por [20] donde introduce una categorización en la técnica de medición y agregan la categoría fotogrametría UAV, aunque con resoluciones menores a las alcanzables en la actualidad.

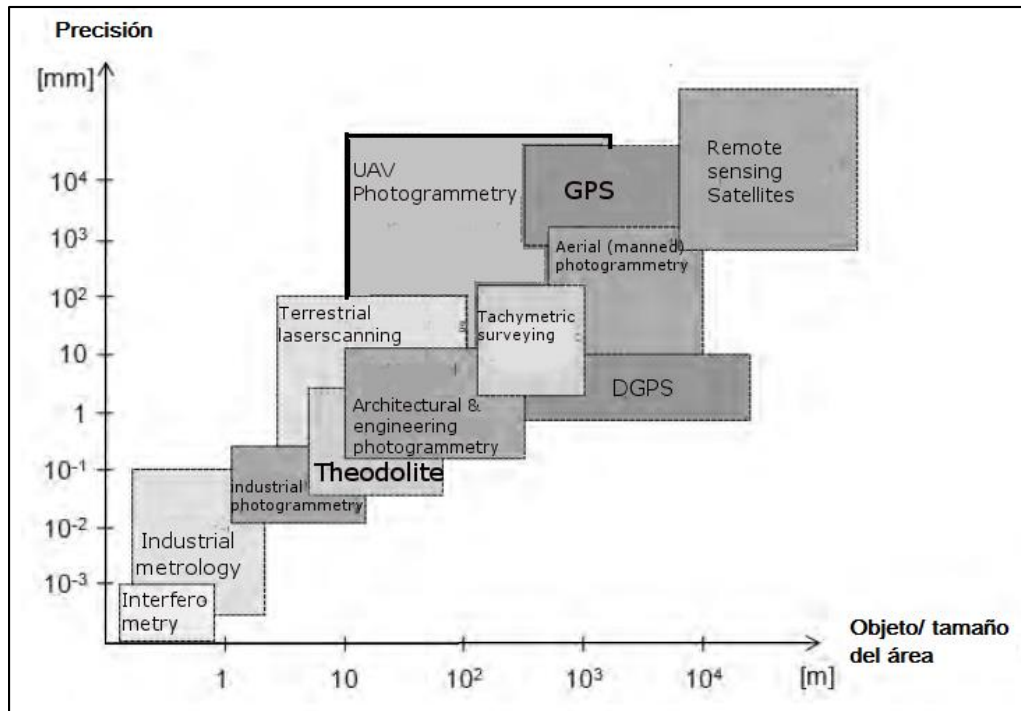


Figura 2.3 Precisión en los métodos de medición en relación al objeto/tamaño del área por Ph.D Henri Eisenbei [15].

2.2.1 Fotografías aéreas

La primera fotografía aérea fue tomada por Gaspard Tournachon en 1858 en un globo tripulado en París y durante los siguientes años fueron puestos a prueba cometas, palomas y cohetes para espionaje durante las pasadas guerras mundiales. En 1979 se llevó a cabo uno de los primeros experimentos de sistemas UAV con un ala fija y en 1980 Wester-Ebbinghaus fue el primero en utilizar un sistema UAV de ala rotatoria con propósitos fotogramétricos [11].

Los estudios aéreos pueden dividirse en dos grupos:

- **Vertical:** el eje óptico de la cámara está lo más cercano a la vertical, una regla importante para considerar las fotografías aceptables para fotogrametría es que tengan menos de 5 grados de inclinación paralelo al terreno. Las fotografías verticales para cartografía topográfica se toman en sucesión según bandas, que por lo general corren a lo largo del área por fotografiar. Las bandas o líneas de vuelos tienen comúnmente una superposición o traslape lateral de aproximadamente 30 % y una superposición

longitudinal de 60%, esto para asegurar que todos los puntos del terreno aparezcan por lo menos en 2 fotografías [21].

- **Oblicuas:** se toman con un ángulo de inclinación respecto a la vertical, por lo tanto, el eje de la cámara no es perpendicular al plano horizontal. Se caracterizan por ser oblicuas altas si el horizonte aparece en la foto, para el caso de oblicuas bajas si no aparece el horizonte. Las imágenes presentan deformaciones de los objetos y de la escala debido al efecto de perspectiva, por lo que el área fotografiada tendrá una forma trapezoidal [22].

2.2.2 Parámetros de ajuste para un sensor de imagen

El sensor de imagen para fotogrametría UAV debe de cumplir diferentes requisitos en cuanto a calidad, resolución, y posibilidades de ajustes [18], a continuación, se define el ISO, velocidad de obturación y apertura de lente.

- **Sensibilidad ISO:** Se define como la sensibilidad en cada una de las celdas que componen el sensor o chip CCD o CMOS. Con una misma exposición, las imágenes difieren en función del ajuste ISO. Por ejemplo, una sensibilidad alta, las imágenes se capturan con un brillo adecuado, aunque la exposición sea insuficiente. Al aumentar el ISO producirá imágenes con mayor ruido. Una sensibilidad ISO baja alargará el tiempo de exposición [23].
- **Velocidad de obturación:** Referente al tiempo de exposición o al periodo de tiempo durante el cual está abierto el obturador de la cámara fotográfica, la velocidad de obturación por lo general se expresa en segundos y en fracciones de segundo [18]. Cuando se utiliza un tiempo de exposición corto, los objetos que se encuentran en movimiento se capturan estáticos, cuando el tiempo de exposición es más largo, se captura una imagen con una estela de movimiento del objeto para que la imagen sea más natural y dinámica, esto se ilustra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Tiempo exposición, imagen de la izquierda tiempo corto, derecha tiempo largo, tomado de [23].

- **Apertura de la lente:** la apertura está controlada por el dispositivo llamado diafragma, el cual cumple la función de regular la cantidad de luz que entra a la cámara. El tamaño de apertura regula el grado de la exposición a la luz del filme o sensor, determinando así el valor de exposición [18].
- **Distancia Focal:** es la distancia entre el centro del objetivo y el plano del sensor cuando se enfoca al infinito. Cuanto menor es la distancia focal mayor es el ángulo de visión a través del lente. Los lentes con pequeña distancia focal entran en el grupo de gran angular y son útiles para para fotografiar un objeto de gran tamaño a corta distancia, los de gran distancia focal entran en el grupo de teleobjetivos. [24]

Según [18] una buena estrategia para la configuración de la cámara en la adquisición de imágenes aéreas se fundamenta en utilizar una sensibilidad ISO acorde a la iluminación de la escena que por lo general se recomienda emplear un valor lo suficientemente pequeño, así como una velocidad de obturación entre 1/300 y 1/1800 segundos.

2.2.3 Georreferenciación

Los sistemas UAVs están equipados con unidades de posicionamiento global (GPS) y tecnologías de comunicación, con el propósito de permitir georreferenciar las imágenes que son capturadas por la cámara a bordo del sistema UAV [25]. Sin embargo, los gps tradicionales que normalmente se encuentra en los sistemas de control tienen una precisión relativamente mala (en el orden de los metros).

Es por esto que para levantamientos de alta precisión se requiere de puntos de control en tierra. Llamados GCP (por sus siglas en inglés, Ground Control Point), son un método alternativo de referenciación de fotos para la generación de mapas 3D, a partir de puntos donde previamente se conoce su localización. Un ejemplo de esto sería colocar diversos receptores GPS de alta precisión en diferentes puntos estratégicos en tierra. El uso de puntos de control expone una alternativa a la integración de GPS's con precisiones milimétricas en el sistema UAV[18].

Los puntos de control en tierra deben de ser colocados homogéneamente en el área de interés, además siempre se recomienda colocar uno en el centro del área de estudio para incrementar la calidad y precisión de la reconstrucción. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de un área delimitada de color verde, con los diferentes puntos de control de color rojo [26].

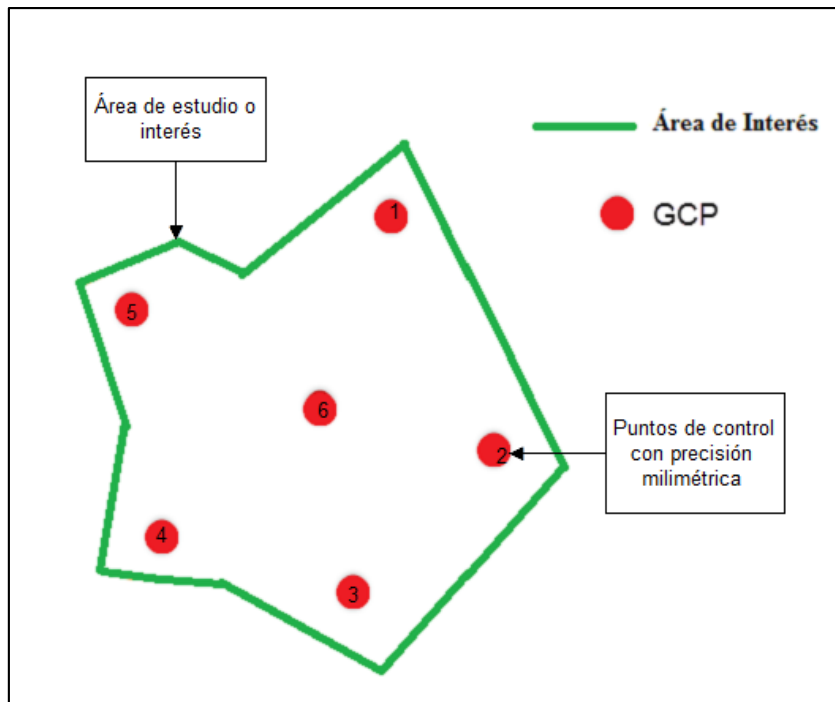


Figura 2.5 Ejemplo de distribución de puntos de control, adaptado de [26].

2.2.4 Distancia de muestreo

La distancia de muestreo llamado en inglés Ground Sampling Distance (GSD), es usado en fotografía digital para hacer referencia a la distancia entre el centro de píxeles adyacentes medido desde tierra. Con un valor alto de distancia de muestreo, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles en la imagen serán menos visibles. Por lo tanto el valor de la distancia de muestreo está relacionado a la altura del vuelo [26].

Por ejemplo, un valor de GSD de 5 cm significa que un pixel en la imagen representada linealmente 5 cm en el suelo ($5 * 5 = 25 \text{ cm}^2$).

Debido a que un pixel es cuadrado, el área que cubrirá cada pixel se puede representar mediante la ecuación (2.1).

$$Area = GSD \times GSD \quad (2.1)$$

Cuando se vuela a una altura constante, las imágenes no pueden tener el mismo valor de distancia de muestreo, debido a diferencias de elevación del terreno y cambios en el ángulo de la cámara. Para la generación de los ortomosaicos y la nube de puntos 3D generalmente se utiliza un valor promedio de GSD [27].

2.2.5 Altura de vuelo

La altura a la que se toman las imágenes con sistemas UAV depende de la distancia focal de la cámara, las dimensiones del sensor de la cámara y la distancia de muestreo (GSD). En la figura 2.6 se ilustra un esquema básico para el cálculo de la altura de vuelo.

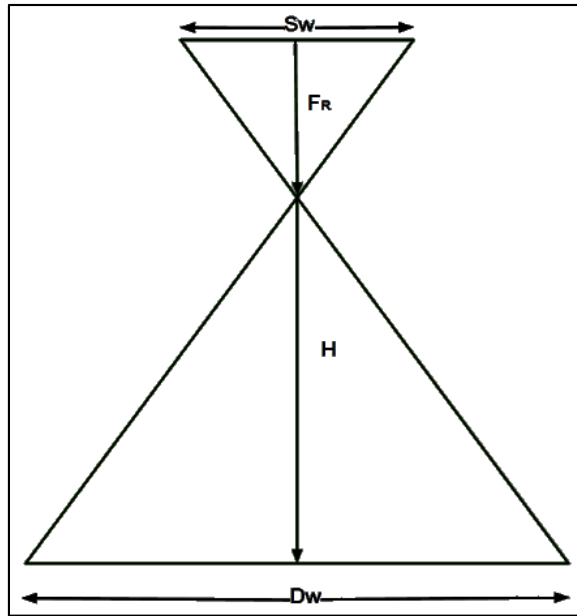


Figura 2.6 Representación altura de vuelo, adaptado de [28].

En la tabla 2.1 se muestra la descripción de los parámetros asociados a la figura 2.6 los cuales son útiles para determinar la altura de vuelo [18].

Tabla 2.1 Definición de parámetros para altura de vuelo.

Parámetro	Definición
S_w	Anchura del sensor óptico
F_R	Distancia focal [mm]
H	Altura de vuelo [m]
D_w	Distancia cubierta en el suelo por una imagen [m]

Con base en lo presentado en la figura 2.6 se deduce en la ecuación (2.2) aplicando un teorema de semejanza de triángulos, lo siguiente:

$$H = \frac{F_R \times D_w}{S_w} \quad (2.2)$$

La distancia cubierta en el suelo por una imagen captada desde el aire viene dada por la ecuación (2.3):

$$D_w = GSD \times IM_{width} \quad (2.3)$$

Donde:

GSD = Distancia de muestreo [cm/pixel]

IM_{width} = Ancho de la imagen [pixel]

Combinando las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene (2.4)

$$H = \frac{F_R \times IM_{width} \times GSD}{S_W \times 100} \quad (2.4)$$

Del procesamiento matemático anterior se deduce la ecuación (2.4) la cual relaciona la altura máxima de vuelo para llevar a cabo la captura de fotografías cumpliendo requisitos de resoluciones por pixel. En vuelos programados en alturas de 80 hasta 200 metros se pueden obtener modelos en 3D con una resolución espacial de aproximadamente 1,10cm/pixel [18].

Es importante que, a una altura definida, si se incrementa la distancia focal el área capturada será menor es por ello que la distancia de muestreo disminuirá y cada pixel capturará un área más pequeña consecuencia a ello se tendrá una mayor resolución espacial. Además, con una altura baja y una distancia focal grande se ocupará al menos contar con una alta velocidad de obturación configurada en la cámara esto para garantizar que en todo momento exista un traslape de imágenes adecuado [27].

2.2.6 Traslape de imágenes

Para obtener imágenes con traslape, es importante considerar la velocidad de disparo de la cámara, además de la velocidad del sistema UAV, la distancia de muestreo y la cámara utilizada [29]. En la figura 2.7 se muestra el esquema básico para llevar a cabo el cálculo del traslape de imágenes, velocidad de vuelo y área cubierta.

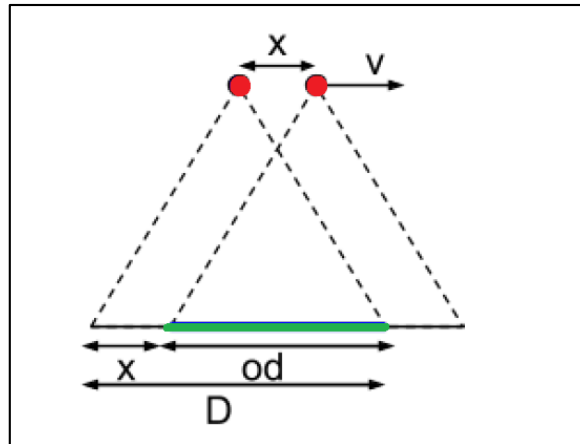


Figura 2.7 Traslape de imágenes, adaptada de [30].

A partir de la figura 2.7 se deducen las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7).

$$od = \text{traslape} \times D \quad (2.5)$$

$$x = D - od \quad (2.6)$$

$$t = x/v \quad (2.7)$$

Con base lo mostrado en la figura 2.7, en la tabla 2.2 se definen las variables utilizadas en las ecuaciones (2.5) a (2.7) para el cálculo de traslape de imágenes y velocidad de obturación de la cámara.

Tabla 2.2 Definición de parámetros traslape de imágenes.

Parámetro	Definición
D	Distancia cubierta en tierra por una imagen en la dirección de vuelo [m]
traslape	Porcentaje frontal deseado entre dos imágenes
od	Distancia traslapada entre dos imágenes en la dirección de vuelo [m]
x	Distancia entre dos posiciones de la cámara en la dirección de vuelo [m]
v	Velocidad de vuelo [m/s]
t	Tiempo transcurrido entre dos imágenes [s]

Ahora bien la cámara del sistema UAV puede tener dos orientaciones según su desplazamiento, en la primera el ancho del sensor se encuentra en posición horizontal y es perpendicular a dirección del vuelo y la segunda el ancho del sensor se encuentra en posición vertical respecto a la dirección de vuelo [29]. En la figura 2.8 se muestra la vista superior de un sistema UAV, donde la flecha verde representa la dirección de vuelo del sistema, y el ancho del sensor de la cámara se encuentra en posición horizontal y es perpendicular a la dirección de vuelo, además el lente de la cámara se encuentra en posición perpendicular a la superficie.

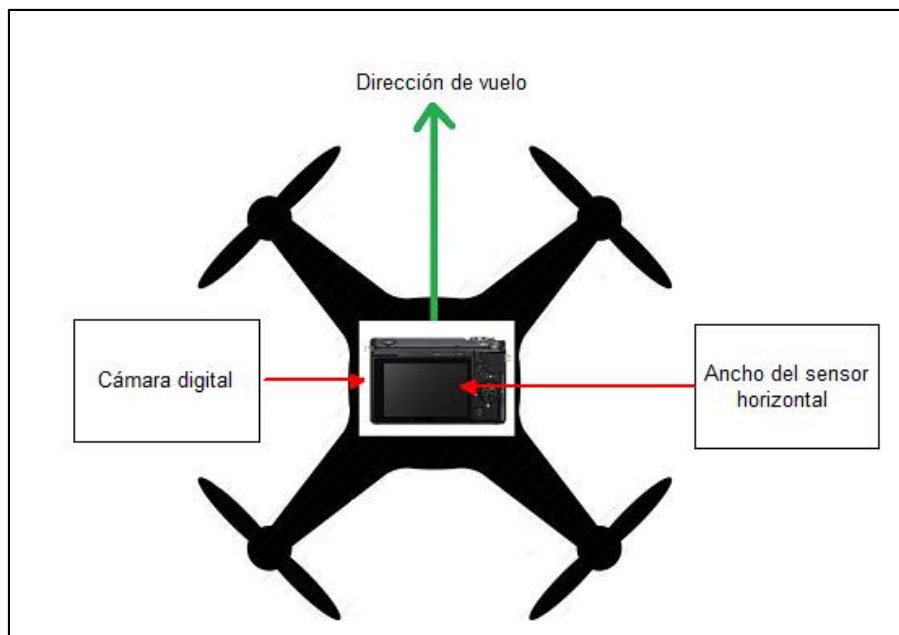


Figura 2.8 Sistema UAV con ancho del sensor horizontal.

Con base a la figura 2.8 se puede calcular el traslape de las imágenes con el ancho del sensor en posición horizontal. En la tabla 2.3 se describen los parámetros utilizados para el cálculo de los tiempos de obturación con la cámara en la posición descrita anteriormente.

Tabla 2.3 Descripción de parámetros de traslape con anchura perpendicular.

Parámetro	Descripción
D_h	Distancia cubierta en el suelo por una imagen en la dirección de la altura [m]
imH	Altura de la imagen [píxeles]
GSD	Distancia muestreada deseada [cm/píxel]

A continuación, se presentan las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) y (2.12) con el ancho del sensor horizontal a la dirección de vuelo para cálculo del tiempo de obturación de la cámara.

$$D = D_h = (imH \times GSD)/100 \quad (2.8)$$

$$x = D_h - \text{traslape} \times D_h \quad (2.9)$$

$$x = D_h(1 - \text{traslape}) \quad (2.10)$$

$$x = \left(\frac{imH \times GSD}{100}\right) \times (1 - \text{traslape}) \quad (2.11)$$

$$t = \frac{x}{v} = \left(\frac{imH \times GSD}{100}\right) \times \frac{1 - \text{traslape}}{v} \quad (2.12)$$

En la figura 2.9 se muestra la vista superior de un sistema UAV, donde la flecha verde representa la dirección de vuelo del sistema, el ancho del sensor de la cámara se ubica en posición paralela a la dirección de vuelo y por lo general el lente se encuentra perpendicular a la superficie.

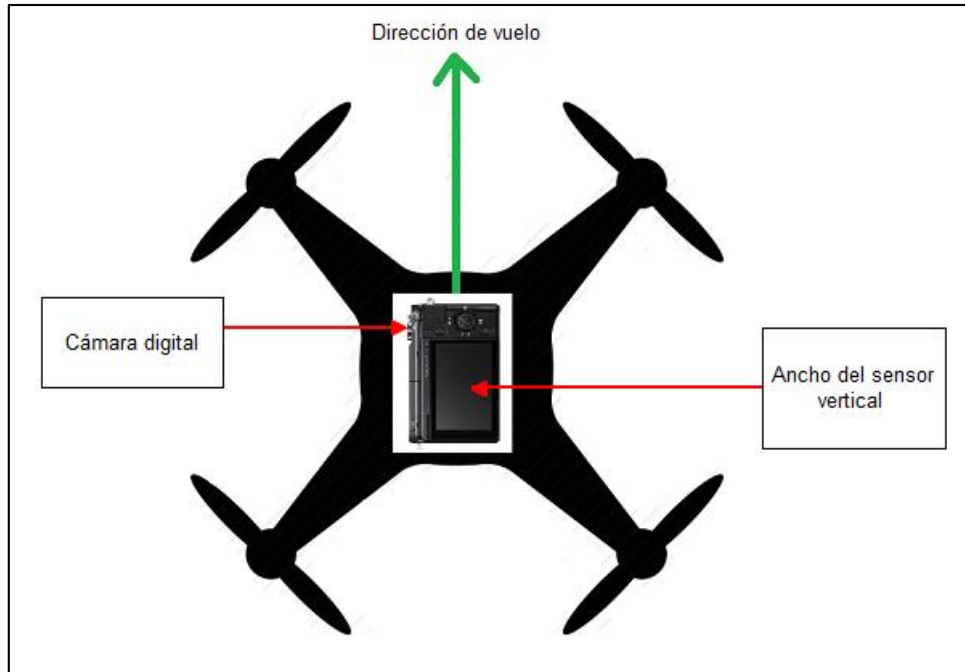


Figura 2.9 Sistema UAV con ancho del sensor vertical.

Con base a la figura 2.9 se puede calcular los tiempos de obturación de la cámara colocada paralela a la dirección del vuelo y utilizando las mismas ecuaciones de (2.8) a (2.12) se lleva a cabo una sustitución de la ecuación (2.13) en (2.8) se obtiene el cálculo de tiempo de obturación de la cámara.

$$D = D_w = (imW \times GSD)/100 \quad (2.13)$$

Donde imW es el ancho de la imagen.

Por lo tanto, para calcular el intervalo de tiempo para la toma de la imagen se utiliza la ecuación (2.14)

$$t = \frac{x}{v} = \left(\frac{imW \times GSD}{100} \right) \times \frac{1 - \text{traslape}}{v} \quad (2.14)$$

Para el caso de imágenes aéreas, se debe de realizar un plan de vuelo acorde al lugar para obtener un solapamiento entre imágenes de aproximadamente 75 % en la dirección de vuelo y un 50 % lateral, dependiendo de las zonas [18].

2.2.7 Mapas y modelos 3D

Con imágenes georreferenciadas obtenidas por un sistema UAV, se puede dar paso a la reconstrucción de objetos tridimensionales. En la figura 2.10 se muestra un esquema base para la generación de mapas 3D, como bloque de entrada al procesamiento están las imágenes georreferenciadas, parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, los cuales, son procesados creando nube de puntos, modelos digitales de superficie y modelos de elevación digital.

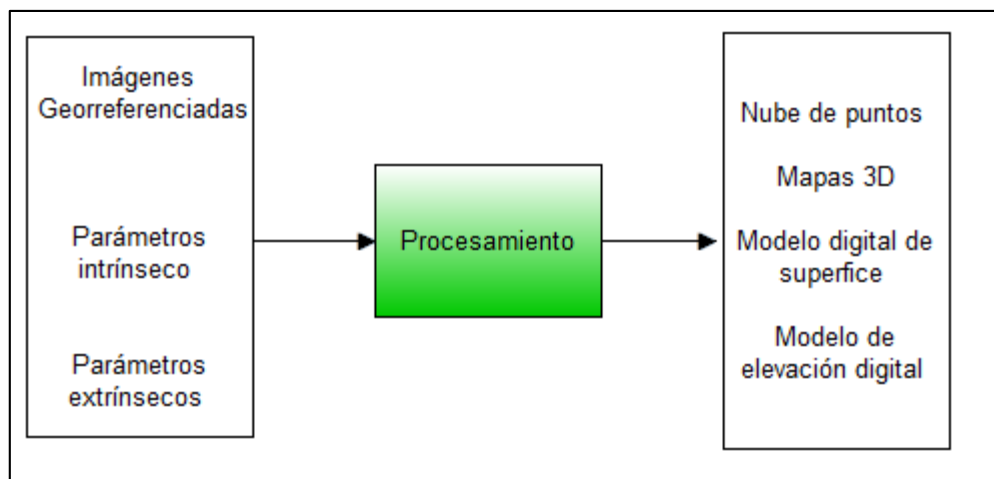


Figura 2.10 Modelo para generar mapas 3D.

Los mapas 3D se reconstruyen a partir del establecimiento de la correspondencia entre imágenes con sus datos georreferenciados, [18]. La nube de puntos, representa un modelo digital de superficie llamado en inglés por sus siglas DSM (Digital Surface Model), de la cual se puede generar una superficie cerrada por medio de triangulación. En [20] se menciona la triangulación de Delaunay como el método apropiado para crear una malla triangular.

El modelo de elevación digital, llamado DEM en inglés (Digital Elevation Model) es una representación de valores de altitud, que permiten caracterizar formas del relieve, elementos u objetos presentes [31].

Normalmente en el proceso de correspondencia se utiliza el algoritmo llamado SIFT en inglés (Scale-Invariant Feature Transform) para hacer coincidir diferentes imágenes de un objeto u escena, presenta la característica de ser invariante ante la escala, rotaciones y parcialmente invariante ante cambios de iluminación y puntos de vista en 3D [32].

Además, se utiliza el método llamado en inglés Bundle adjustment (ajuste de paquetes), el cual es un procedimiento para mejorar la reconstrucción de estructuras en 3D y parámetros de la cámara [33].

2.3 Cámaras digitales

Las cámaras digitales utilizan uno o varios sensores de matriz para la grabación de una imagen proyectada. En la figura 2.11 se ilustra un sensor de matriz el cual tiene N columnas por N filas de sensores (fototransistores) los cuales son producidos con la tecnología CCD (charge-coupled device) o CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) [34].

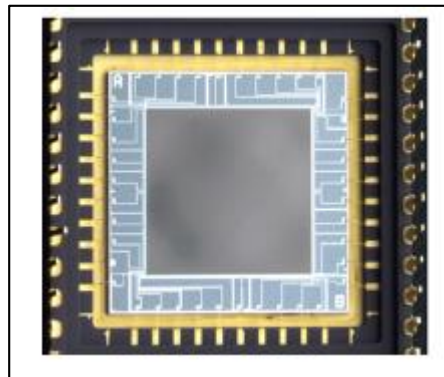


Figura 2.11 Sensor de matriz, tomado de [34].

Ambos sensores tienen características semejantes y son usados en la gran mayoría en cámaras comerciales. Las cámaras que se encuentran en el mercado actualmente utilizan tecnología CMOS debido a consideraciones en la manufactura [35].

2.3.1 Sistemas de visión

Los sistemas de visión tienen como objetivo el uso de cámaras digitales para el análisis o comprensión de las escenas del mundo real. En sistemas de visión por computadora es posible saber la distancia de un edificio a la cámara, la cantidad de personas en una escena, reconocimiento facial, aplicaciones para teléfono celular, procesos de control y calidad por lo que existe gran cantidad de áreas para satisfacer diferentes necesidades [34].

2.3.2 Sistemas estéreos

La visión estereo se ha convertido en una técnica para la detección de información tridimensional, se han desarrollado aplicaciones para robots de navegación, misiones espaciales, detección de obstáculos y vehículos autónomos [36].

El sistema está conformado por dos cámaras cuyos ejes ópticos son mutuamente paralelos encontrándose separadas a una distancia llamada línea base. Cuando se tienen dos imágenes del mismo objeto (I_L, I_D) por cámaras diferentes y dado un punto izquierdo (PI) en la imagen izquierda (II) y un punto derecho (PD) en la imagen derecha (ID), existe una correspondencia si la línea recta comprende ambos puntos y se denomina línea epipolar [37].

La Figura 2.12 representa un sistema de coordenadas estereo, es importante tener en cuenta que las cámaras se encuentran paralelas y separadas sobre el eje horizontal solo difieren en esas componentes.

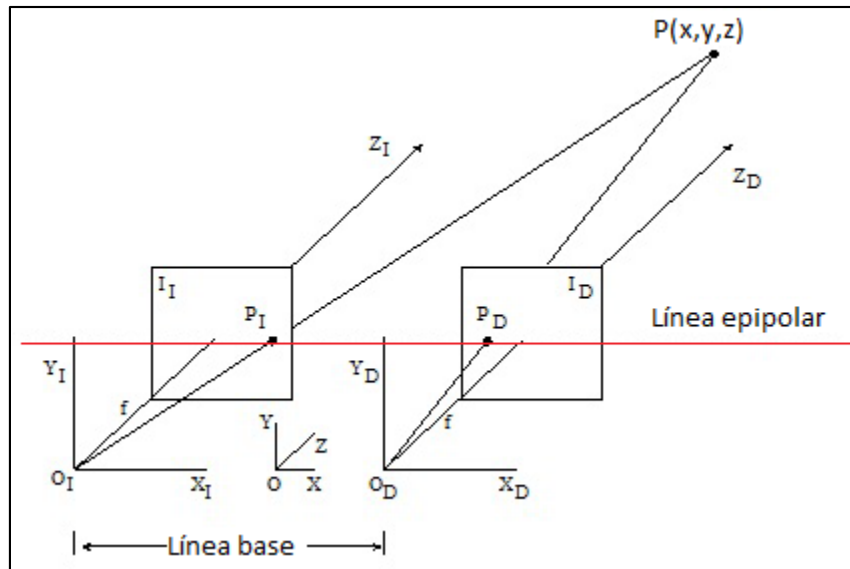


Figura 2.12 Sistema de coordenadas visión estéreo, adaptado de [37].

Según [18] debido a la distancia de los objetos, la separación de las cámaras, problemas de implementación, los sistemas estéreos convencionales no son recomendados en aeronaves pequeñas o sistemas UAVs, por lo tanto se utiliza la técnica estéreo con una cámara (*motion stereo*).

2.3.3 Sistemas estéreos con una sola cámara

Los sistemas estéreo con una sola cámara, llamados *motion stereo* en inglés extraen la información 3D de un objeto o escena a partir de imágenes 2D de una cámara en movimiento utilizando relaciones geométricas y puntos correspondientes entre ellas, el método ha sido utilizado en reconocimiento en 3D, navegación y rastreo de objetos [38].

Los métodos de movimiento típicos en un sistema estéreo donde se emplea únicamente una sola cámara fotográfica son:

- **Lateral:** adquiere imágenes moviendo la cámara en la dirección perpendicular a su eje óptico. En la figura 2.13 se ilustra el desplazamiento de una sola cámara la cual captura una superficie o fachada cubriendo toda la zona de interés.

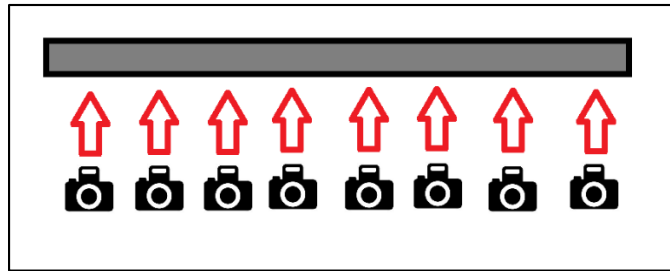


Figura 2.13 Captura correcta de imágenes para superficies o fachadas.

- **Axial:** adquiere imágenes moviendo la cámara a lo largo de su eje óptico, como se muestra en la figura 2.14. Según [39] el movimiento axial presenta varias ventajas respecto al lateral, tales como baja probabilidad de perder puntos con características semejantes en un pequeño rango de búsqueda, sin embargo presenta errores sobre la región central de una imagen.

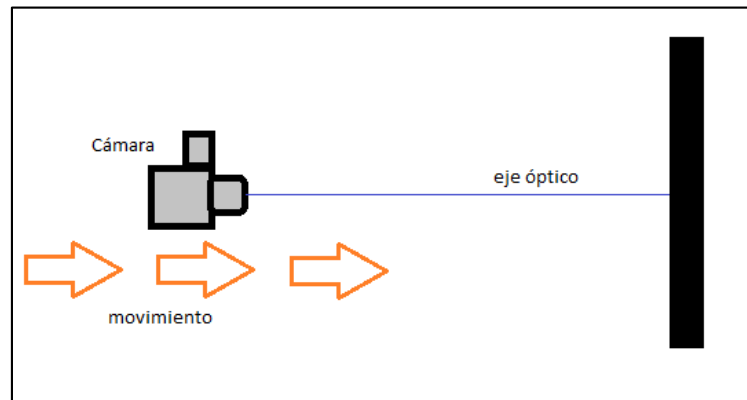


Figura 2.14 Movimiento axial de la cámara.

2.3.4 Parámetros extrínsecos e intrínsecos

El objetivo de la calibración es determinar una serie de parámetros que describen el mapeo de las coordenadas de referencia de la imagen 3D a las coordenadas de una imagen 2D [39]. Normalmente el objeto de calibración corresponde al patrón de ajedrez en la mayoría de los casos. En la figura 2.15 se muestra un patrón de calibración, con una forma de tablero el cual posee cuadrados con dimensiones idénticas [40].

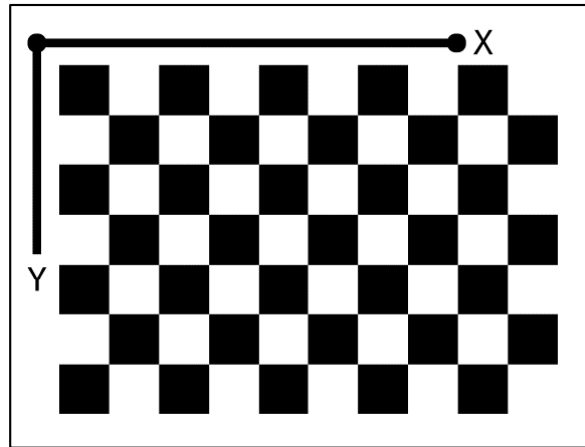


Figura 2.15 Ejemplo de patrón de ajedrez en 2D, tomado de [41].

Utilizar el patrón de calibración mostrado en la figura 2.15 permite conocer el modelo de distorsión de la lente de la cámara de estenoscopio, el cual se basa en los parámetros intrínsecos y extrínsecos. Este modelo simplifica consideraciones geométricas y asume un rendimiento ideal de la cámara. Los errores se pueden presentar si se utiliza óptica de video de bajo costo, tales como lentes de pez o gran angular [40].

La figura 2.16 representa el modelo de la cámara de estenoscopio, el cual es una cámara simple sin lente y con una pequeña apertura, los rayos de luz pasan a través de la apertura y proyectan una imagen invertida en el lado opuesto de la cámara [42].

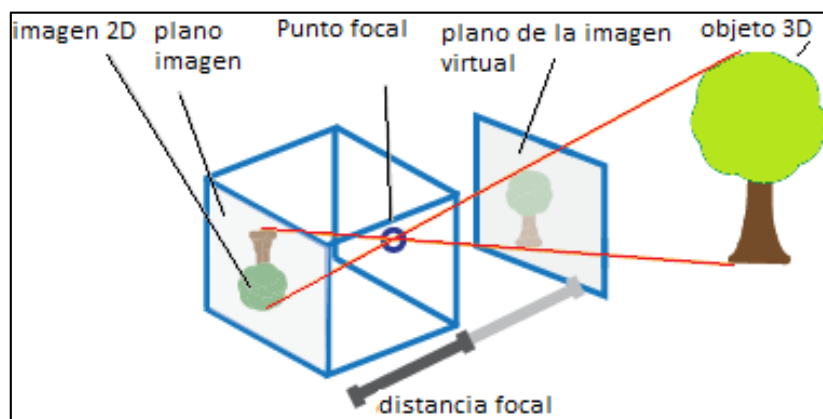


Figura 2.16 Modelo de cámara de estenoscopio, adaptado de [42].

Según [43] los parámetros del modelo de estenoscopio son representados por una matriz 4×3 , llamada matriz de cámara (P). La matriz P mapea una representación 3D en una imagen plana. En la ecuación (2.15) la variable W es un factor de escala, el vector $[x \ y \ 1]$ son puntos de la imagen, y el vector $[X \ Y \ Z]$ son los puntos del mundo real.

$$W[x \ y \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] P \quad (2.15)$$

Donde P es igual a vector de parámetros extrínsecos $\begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix}$ por la matriz de parámetros intrínsecos K , como lo muestra la ecuación (2.16).

$$P = \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad (2.16)$$

Los parámetros intrínsecos están definidos por la matriz K , y es representado en la ecuación (2.17), dicha relación matemática se encuentra conformada por valores de: distancia focal (F), sesgo (s), centro óptico (C_x, C_y), número de pixeles por unidad en el mundo real (s_x, s_y). Las ecuaciones (2.18) y (2.19) representan la distancia de coordenadas de la cámara al plano de la imagen.

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$$f_x = F \times s_x \quad (2.18)$$

$$f_y = F \times s_y \quad (2.19)$$

En la tabla 2.4 se presenta una breve descripción de los de los parámetros intrínsecos asociados a la matriz K .

Tabla 2.4 Descripción de parámetros intrínsecos.

Parámetro intrínseco	Descripción
f_x, f_y	Distancia focal efectiva, distancia del origen de coordenadas de la cámara al plano de la imagen, expresado ambos en pixeles.
S	Factor de sesgo.
C_x, C_y	Representan el centro óptico (punto principal) en pixeles.
F	Distancia focal, expresada en milímetros.
S_x, S_y	Número de pixeles por unidad en el mundo real con dirección x,y.

Ahora bien, los parámetros extrínsecos relacionan los sistemas de referencia del mundo real y los de la cámara digital. En la tabla 2.5 se describen los parámetros extrínsecos, con estos datos es posible definir las matrices de traslación y rotación, para llevar a cabo esto se necesita generar la matriz de proyección P representada en la ecuación (2.20).

Tabla 2.5 Descripción de parámetros extrínsecos.

Parámetro Extrínseco	Descripción
R_x, R_y, R_z	Ángulos de rotación para la transformación del sistema de referencia global al de la cámara.
T_x, T_y, T_z	Componentes de traslación para transformación del sistema de referencia global de cada imagen.

$$P = \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

El vector tridimensional:

$$T = (T_x \quad T_y \quad T_z) \quad (2.21)$$

La ecuación (2.21) puede ser reescrita usando cuatro coordenadas homogéneas:

$$t = (T_x \quad T_y \quad T_z \quad 1)^T \quad (2.22)$$

Para definir una rotación en el espacio se hace uso de tres ángulos de Euler, estos ángulos corresponden con los ángulos convencionales de navegación. En la figura 2.17 se ilustran los ángulos de navegación “roll (ϕ)”, “pitch (θ)” y “yaw (ψ)” [44].

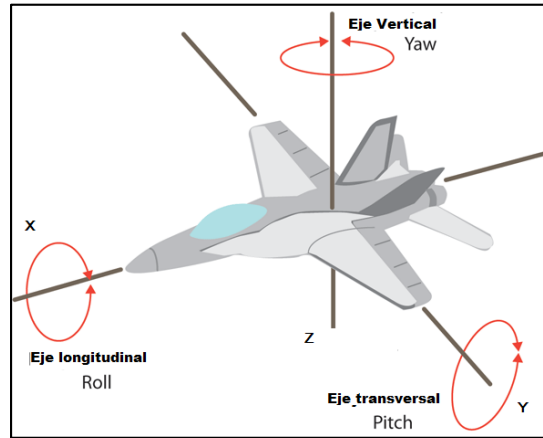


Figura 2.17 Sistema de coordenadas en 3D, adaptado de [44].

Tomando en cuenta lo representado en la figura 2.17, cada ángulo de giro tiene asociado una matriz de rotación, mostradas en las ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25):

$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$R_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Para encontrar un resultado más general, se lleva a cabo un producto de matrices en donde se aplican los giros en siguiente orden “yaw”, “pitch” y “roll” se obtiene la ecuación (2.26)

$$R_n = R_{\psi} \cdot R_{\theta} \cdot R_{\phi} \quad (2.26)$$

Ahora reescribiendo la ecuación (2.26), se obtiene (2.27) de forma que:

$$R_n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Y por último simplificando (2.27) se obtiene (2.28)

$$R_n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta + \sin \theta \sin \psi \sin \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \theta & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Por lo tanto, a cada imagen se le debe de asignar los ángulos de Euler proporcionados por los sensores (IMU/GPS) a bordo del sistema UAV [18], para lograr obtener una representación espacial más precisa.

2.4 Imágenes digitales

Es importante conocer el proceso de formación de las imágenes, debido a que las selecciones de algoritmos a utilizar para una aplicación en particular dependen usualmente del proceso en que se producen las imágenes y los elementos involucrados en él. Por lo tanto entre menos variabilidad en la formación de una imagen, más sencillo es la secuencia de pasos de procesamiento para extraer la información deseada [45].

En la figura 2.18 se observan al menos cuatro elementos que intervienen en el proceso de formación de una imagen, los cuales se conforman por una fuente de energía, (luz visible o alguna onda electromagnética entre otras) objeto a ser capturado en la imagen, (puede interactuar con la fuente de energía, reflexión, transmisión, refracción, absorción, difracción) cámara y el sistema de captura de la imagen.

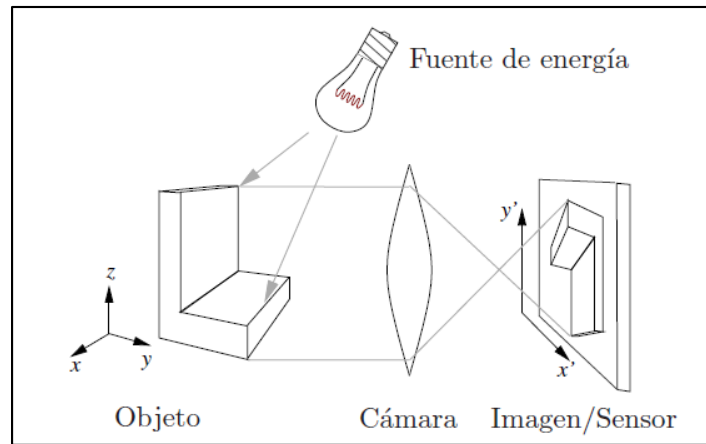


Figura 2.18 Representación de formación de imágenes, tomado de notas de clase PDI P.Alvarado [45].

2.4.1 Imágenes en color

El color es una cualidad perceptiva asociada a la composición espectral de la luz visible que incide en la retina. En el ojo humano, la percepción de color es posible por la presencia de tres tipos de conos, para longitudes de onda largas (rojo, 65%), medias (verde, 33%) y cortas (azul, 2%). Las tres componentes rojas (R), verde (G) y azul (B) engendran un espacio de color conocido como el espacio RGB .

En la figura 2.19 se observa cómo se producen los colores secundarios cian, magenta y amarillo combinando dos colores primarios aditivos. Los colores primarios sustractivos son cian, magenta y amarillo, sus mezclas producen colores secundarios sustractivos al rojo, verde y amarillo. La mezcla de los 3 colores primarios sustractivos produce el color negro. Las componentes cian (C), magenta (M) y amarillo (Y) generan el espacio de color CMY [45].

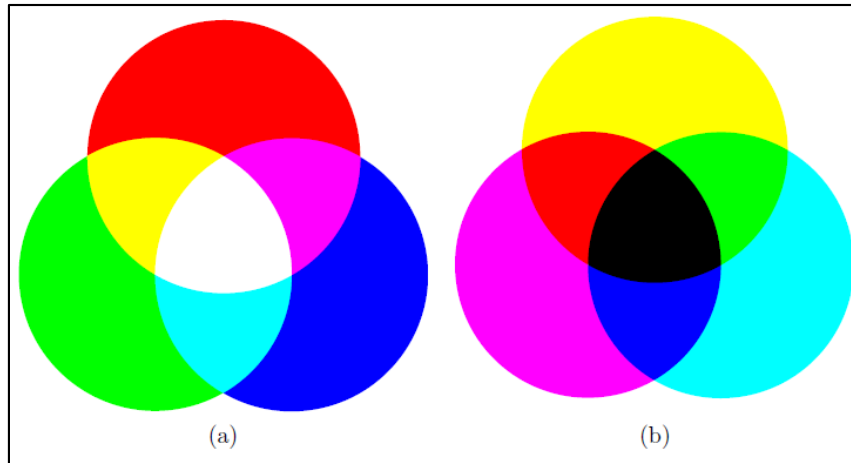


Figura 2.19 Colores primarios, (a) aditivos, (b) sustractivos, tomado de [45].

2.4.2 Filtro de Bayer

El filtro de Bayer, también llamado máscara o mosaico está compuesto por una matriz de filtros con los colores rojo, verde y azul, al situarlo sobre un sensor digital de imagen, como el CDD o CMOS, hace llegar la información de luminosidad a la cámara digital, por lo tanto es el responsable de codificar la información de capa pixel a través de los 3 colores [30]. En la figura 2.20 se puede observar un filtro de Bayer, un pixel de color es capturado por cuatro sensores, dos para el verde, uno para el rojo y otro para el azul [34].

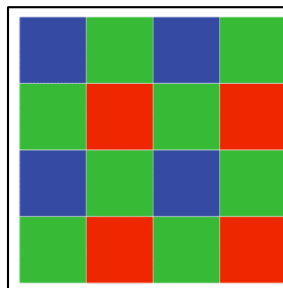


Figura 2.20 Representación de filtro de Bayer con los colores rojo, verde y azul, adaptado de [34].

Gran mayoría de los sensores de imagen utilizados producen comúnmente 8 bits por cada color *RGB*, al utilizar mayor cantidad de bit ya sea 12, 16, ofrecen la oportunidad de alto rango dinámico (*HDR*) en las imágenes, con colores más precisos y oportunidades de

procesamiento de color. Las imágenes *HDR* combinan múltiples imágenes de la misma escena tomada a diferentes niveles de iluminación en una imagen compuesta con mayor rango dinámico. El ojo humano por el contrario solo tiene una resolución de 10 bits de color para cada *RGB* (8 bits por cada color *RGB* son aproximadamente 16 millones de colores) que es aproximadamente 10 millones de colores a 600 ppp (puntos por pulgada) en una hoja de película, por lo que 8 bit de color para *RGB* brinda una adecuada resolución en la mayoría de los casos [35].

2.4.3 Distorsión de imágenes

El conjunto de lentes (parte de la cámara que dirige los rayos de luz hacia el sensor) de una cámara digital se le denomina objetivo, estos presentan imperfecciones que producen distorsiones geométricas de mayor o en menor medida en las fotografías, es por ello que las distorsiones se pueden clasificar en radial y tangencial [46].

La distorsión radial ocurre cuando los rayos de luz se doblan a una mayor cantidad cerca de los bordes de la lente que en su centro óptico, entre más pequeño el lente, mayor distorsión [42]. En la figura 2.21 se ilustra una imagen con distorsión radial de cojín, una imagen sin distorsión y una con distorsión radial de barril. Una imagen con distorsión cojín presenta las curvas convexas con respecto al centro de la fotografía, y por último una imagen con distorsión de barril sus curvas son cóncavas respecto al centro de la foto.

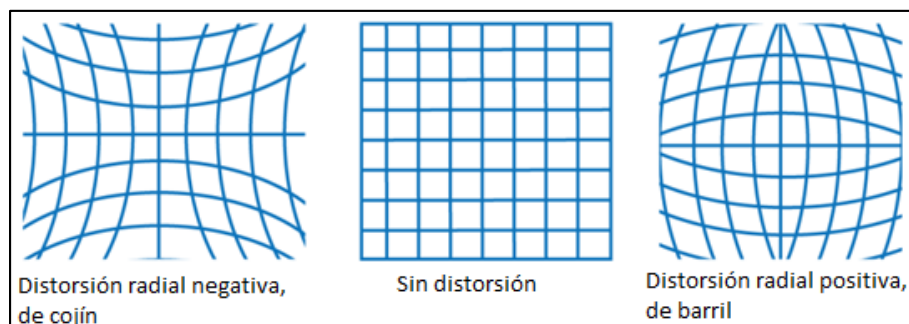


Figura 2.21 Tipos de distorsión radial, adaptada de [42].

Según lo expuesto en [30] se puede plantear un modelo teórico de distorsión radial, tal como lo describen matemáticamente las ecuaciones (2.29), (2.30) y (2.31).

$$X_{dist} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (2.29)$$

$$y_{dist} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (2.30)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (2.31)$$

En la tabla 2.6 se presenta una descripción de los coeficientes utilizados en las ecuaciones (2.29),(2.30) y (2.31) que describen los parámetros involucrados en la distorsión radial.

Tabla 2.6 Descripción de parámetros distorsión radial.

Parámetro	Descripción
x,y	Píxeles sin distorsión, coordenadas normalizadas de la imagen
k_1,k_2,k_3	Coefficientes de distorsión radial de la lente

La distorsión tangencial ocurre cuando la lente y el plano de la imagen no son paralelos. En la figura 2.22 se muestra la distorsión tangencial la cual se debe a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes.

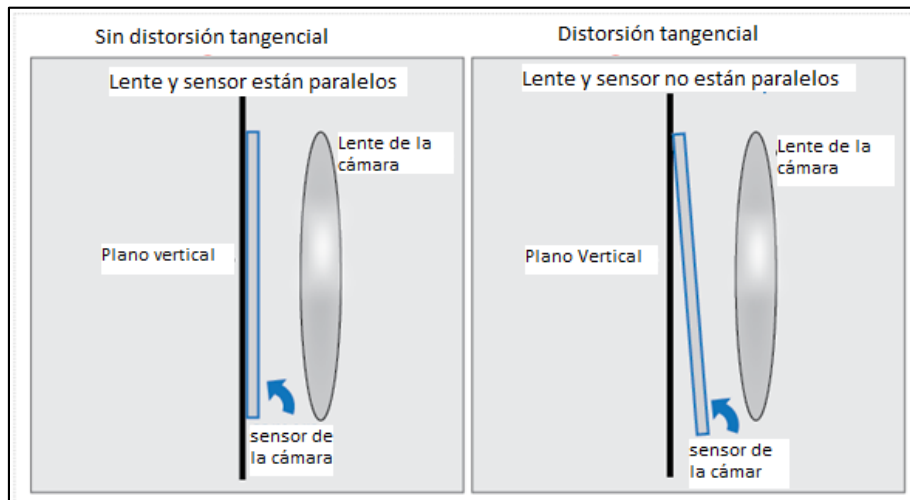


Figura 2.22 Distorsión tangencial, adaptada de [40].

Según se expone en [39] el modelo teórico de distorsión tangencial, se describe mediante las ecuaciones (2.32), (2.33) y (2.34).

$$X_{dist} = x + [2 * p_1 * x * y + p_2 * (r^2 + 2 * x^2)] \quad (2.32)$$

$$y_{dist} = y + [p_1 * (r^2 + 2 * y^2) + 2 * p_2 * x * y] \quad (2.33)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (2.34)$$

En la tabla 2.7 se presenta una descripción de los coeficientes utilizados en las ecuaciones (2.32) y (2.33) que describen los parámetros involucrados en la distorsión tangencial.

Tabla 2.7 Descripción de parámetros distorsión tangencial.

Parámetro	Descripción
x,y	Píxeles sin distorsión, coordenadas normalizadas de la imagen
p_1,p_2	Coefficientes de distorsión tangencial de la lente

2.4.4 Formatos de imágenes digitales

Una imagen es una representación de una señal por medio de funciones, matrices, grafos o conjuntos con los diferentes métodos y técnicas de almacenamiento. Por lo tanto, se explicará sobre su formato de almacenamiento a continuación.

- **Imágenes vectoriales**

La creación sintética de imágenes vectoriales puede permitir resoluciones infinitas, esto quiere decir que puede aumentarse el número de píxeles por unidad de área arbitrariamente, manteniendo un tamaño constante [45]. Para esto se almacenan primitivas geométricas que puedan re expresarse en forma de una nueva imagen. Se emplean para almacenar textos y figuras regulares, esquemas con alta calidad visual y poco espacio de almacenamiento.

Algunos de los estándares para el almacenamiento de imágenes vectoriales son: SVG Wmf, Emf. Xfig, Odf.

- **Imágenes raster**

Son el resultado del proceso de captura de escenas reales, y son utilizadas cuando se requiera extraer información de las escenas [45].

Para el almacenamiento de imágenes raster se puede utilizar alguno de los siguientes formatos: libres de pérdidas como: BMP, PNG, TIFF, GIF, con pérdida: JPEG, JPG200, PNG con pérdida

2.4.5 Tratamiento de imágenes

El formato de archivo *RAW* en fotografía digital es equivalente al negativo de la película de la fotografía analógica, contiene información la cual no está comprimida por el sensor. Debido a esto la imagen es de muy alta calidad, por lo tanto el archivo debe de ser procesado con algún programa para su posterior uso [47].

La idea de utilizar archivos *RAW* es convertirlo hacia una imagen rasterizada, donde se pueden llevar a cabo ajustes en la imagen de manera irreversible. La utilización del archivo *RAW* brinda la flexibilidad necesaria para ajustar blancos, corrección gamma, saturación de color y compensación de exposición.

En la figura 2.23 se observa un diagrama del procesamiento de un archivo *RAW* a formato de imagen *TIFF* o *JPG*, dependiendo del uso que se le quiera dar a las imágenes se ocuparan en un formato u otro.

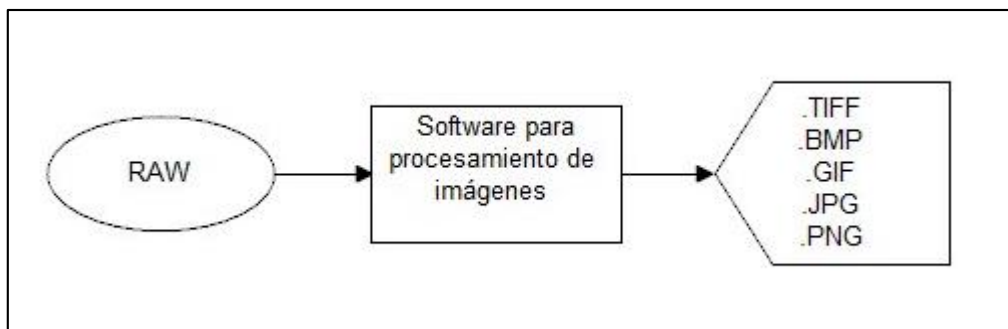


Figura 2.23 Representación de procesamiento para archivos RAW.

2.5 Software para procesamiento de imágenes

Existen diferentes herramientas de software tanto abiertas como comerciales capaces de la reconstrucción total o parcial de mapas en 3D.

2.5.1 Software comercial

En el mercado existen diferentes empresas dedicadas no solo a la venta de sistemas UAVs, cámaras y accesorios, sino también al desarrollo de software especializado para fotogrametría, capaz de reconstruir modelos en 3D a partir de un conjunto de fotografías digitales georreferenciadas. Si se desea ampliar más sobre el tema consultar el apéndice A.

A continuación, se presentan un listado de cuatro diferentes opciones en el mercado.

- **Pix4D**

Es un paquete de software capaz de convertir las imágenes tomadas por un sistema UAV y generar mapas georreferenciados, mosaicos y modelos 3D. Permite la importación de puntos de control y el procesamiento sin conocimiento de la posición [48].

- **Agisoft PhotoScan**

Es una plataforma de software que permite resultados precisos (3cm aéreo y 1mm corto alcance) en modelos 3D, así como mediciones de áreas y volúmenes. Permite la utilización de lenguaje de alto nivel para la automatización del proceso. [49].

- **Erdas Imagine**

El software permite realizar análisis de imágenes y extraer información del terreno, además, proporciona herramientas que incluyen triangulación, visualización estéreo creación de ortomosaicos, balance de colores y compresión [50].

- **Photomodeler Scanner**

Software desarrollado por la empresa Eos Systems Inc capaz de brindar las herramientas necesarias para la creación de un modelo 3D de alta calidad a partir de fotografías y scanner laser [51].

2.5.2 Software libre

Debido al gran auge de fotogrametría UAV y softwares especializados, se han desarrollado herramientas de código libre (open source) para la manipulación de imágenes georreferenciadas, nubes de puntos en imágenes 2D y 3D.

- **VisualSFM**

Es un software con interfaz gráfica de usuario, utilizado para la reconstrucción 3D usando la técnica de estructura de movimiento (SFM). El sistema de reconstrucción integra diferentes códigos para realizar SIFT en GPU (SiftGPU), ajuste de paquetes múltiples. VisualSFM explota el paralelismo multi-núcleo para la detección de características, ajuste de paquetes y emparejamiento [52].

- **Point Cloud Library (PCL)**

PCL es un proyecto de código abierto para el procesamiento de nubes de puntos en imágenes 2D /3D. Las nubes de puntos es una estructura para la representación de puntos multi-dimensionales que se utilizan para recrear datos tridimensionales, generalmente una nube de puntos 3D, constituyen las coordenadas geométricas X , Y , Z , de una superficie muestreada [53].

- **Open CV**

Es una biblioteca de visión por computadora de código abierto escrita en $C/C++$ capaz de ser ejecutada desde de Linux, Windows y Mac OSX. Fue diseñada con eficiencia computacional y con enfoque en aplicaciones en tiempo real. Contiene más de 500 funciones entre ellas: inspección de productos, imágenes médicas, seguridad, calibración de cámaras, visión estéreo, robótica. Se ha utilizado para aplicaciones de como construcción de imágenes satelitales, mapas web, alineación de imágenes, reducción de ruido en imágenes médicas, análisis de objetos, seguridad y detección de intrusos, control automático, sistemas de inspección de fabricación, aplicaciones militares, aplicaciones para vehículos no tripulados aéreos, terrestres y submarinos [54].

3 Capítulo 3: Metodología para generación de mapas en 3D.

En esta sección se desarrollará la selección de la solución mediante el diseño de ingeniería, el cual permite generar mapas en 3D mediante técnicas de fotogrametría UAV. Mediante un análisis comparativo de soluciones se pretende seleccionar la plataforma de software y proponer una metodología para la generación de modelos de elevación digital por medio de sistemas UAV.

La solución tiene que satisfacer las necesidades del proyecto de investigación establecida por los investigadores a cargo. Es por ello que se debe seleccionar una plataforma de software la cual permita llevar a cabo la generación de modelos de elevación, por lo tanto, en la tabla 3.1 se presentan los requerimientos y restricciones que debe contemplar el diseño de la solución.

Tabla 3.1 Requerimientos y restricciones mínimas.

Requerimientos	Indicador	Restricción	Indicador
Alta resolución en sensor de imagen	Resolución de imagen mayor a 7 a Megapíxeles.	Cámara portátil.	Larga duración > 1 hora.
Precisión en puntos de control georreferenciados.	Resolución altitud, longitud y altura con precisión < 1 cm.	Equipo RTK	Registro de posición que sea < 3 meses.
Formato de almacenamiento de imagen libre de pérdidas.	Formato de almacenamiento <i>RAW</i> .	Cámara con capacidad de adquisición libre de pérdidas.	Costo de cámara < a \$700 .
Velocidades de obturación de la cámara.	Ajuste de velocidades mayor a 1/300 s.	Cámara portátil.	Obturador electrónico de hasta 1/4000 s.

Lente ajustable de cámara .	Capacidad de ajuste del lente de 10 a 70 mm.	Bajo peso del lente.	Menor a 300 gramos.
Información de orientación espacial (<i>pitch, roll, yaw</i>).	Orientación espacial (<i>pitch, roll, yaw</i>) con precisión de $\pm 1^\circ$.	Sistema gimbal.	Soporte una cámara < 600 g.

3.1 Análisis y selección solución.

Respecto a la problemática de cuantificación de erosión, se formularon tres posibles soluciones que involucren los requerimientos y restricciones planteados y permita generar modelos de elevación digital con suficiente precisión.

3.1.1 Primera solución: Desarrollo a la medida (full-custom)

Dicha solución conllevaría la programación y desarrollo de cada uno de los algoritmos, rutinas y librerías de software necesarias para la creación de los mapas en 3D. Además, se deberá programar una interfaz de usuario la cual sea capaz de mostrar todos los procesos que dan origen a un modelo de terreno en 3D y su a vez facilite la edición del mismo.

Esta propuesta brindará un control total en la generación de modelos de elevación digital (DEM), mayor flexibilidad en el uso del hardware y requisitos del sistema. Cabe mencionar que se podría pensar en procesamiento paralelo o utilización de un clúster, donde el procesamiento es distribuido en diferentes nodos de computadoras conectadas a una red local, y el desarrollo del software debe permitir incorporar mejoras a futuro, y a su vez permitir el acceso libre y completo a los investigadores.

La implementación de esta solución llevaría un tiempo de varios años; esto se debe principalmente a que se debe realizar todo el desarrollo desde un punto inicial sin reutilización de material disponible en repositorios. Además, incluye temas avanzados sobre procesamiento digital de imágenes y reconocimiento de patrones, por lo que el factor tiempo se ve principalmente como una limitante para la ejecución del presente proyecto.

En resumen, dicha solución proporciona suficiente flexibilidad al contar con un control total en el flujo de desarrollo, pero presenta muchas actividades complejas para la implementación de algoritmos de orto-rectificación y generación de nube de puntos, donde posiblemente pueda extenderse a temas de investigación de posgrado o doctorado, y no es el objetivo para un proyecto de pregrado.

3.1.2 Segunda solución: Software comercial para fotogrametría con UAV

Existen soluciones comerciales con precios que oscilan entre los \$59 dolares y los \$8700, con licencias educativas y comerciales (ver Tabla A.12). Los softwares comerciales tienden a ser cerrados generalmente, debido a esa limitante el usuario no puede realizar modificaciones en algoritmos que disponen dichos paquetes de software para llevar a cabo labores de procesamiento de información y señales, es por ello que la escalabilidad del mismo se encuentra limitada, debido a estos factores esta solución no ofrece una flexibilidad necesaria.

La plataforma debe tener la capacidad suficiente para incorporar algoritmos que estén descritos preferiblemente en lenguajes de alto nivel mediante scripts. Se estima que el empleo de incluir al software diversos algoritmos permitirá automatizar todos los pasos necesarios para llevar a cabo labores de procesamiento. La plataforma de software deberá contar con la capacidad de ser configurado en un clúster de computadoras donde el proceso pueda ser distribuido en los diferentes nodos y ejecutado en paralelo con el fin de reducir tiempos de procesamiento en la generación de modelos 3D. Es importante que dicho paquete software este en la capacidad de generar reportes con información trascendental tales como: resolución espacial, área cubierta, error promedio de escalas, porcentajes de solapamiento, distorsión de cámara, densidad de puntos por metro cuadrado y tiempo de ejecución de procesamiento.

En cuanto a requisitos de hardware que deberá contar el computador donde será instalado el paquete de software, el mismo tiene que garantizar compatibilidad con diversos sistemas operativos, y que pueda dar una utilización al máximo de la unidad de procesamiento de grafico para garantizar un tiempo de procesamiento menor respecto a un sistema GPU integrado.

3.1.3 Tercera solución: Open software para fotogrametría con UAV

Revisando los diferentes precios de licencia de software comerciales (tabla A.16 del apéndice) surge la opción de utilizar librerías disponibles de open software, tales como: OpenCV, Point cloud o VisualSFM las cuales proporcionan algoritmos para elaborar nubes densas de puntos o reconstrucción de imágenes en 3D.

La solución open source plantea la búsqueda y el análisis de los diferentes algoritmos relacionados al procesamiento digital de imágenes y a la generación de mapas 3D con todos los procesos intermedios. Por ejemplo, se deberá trabajar en la detección, descripción y emparejamiento de las características en el set de imágenes, utilizando algún algoritmo como detección de esquinas de Harris, SIFT (scale-invariant feature transform), SURF (speeded up robust features). Luego, de manera exhaustiva se deberán desarrollar algoritmos que sean capaces de orientar fotos, generar nube de puntos en 3D, y librerías para la construcción de superficies, polígonos, mallado y generación de texturas. Cada uno de estos apartados consumen gran cantidad de tiempo debido al estudio, evaluación y validación de los resultados de cada una de las partes y reducción de los errores luego de la verificación de software, por lo tanto, el tiempo de diseño e implementación excede el tiempo de ejecución del proyecto de un semestre, por lo cual no sería una solución lo suficientemente viable debido a su naturaleza iterativa, pero a nivel funcional sería muy exitosa

Una vez que se cuenten con los algoritmos específicos para la generación de mapas 3D se deberán combinar de manera específica para obtener un modelo de elevación digital ofreciendo mediaciones de área y volumen, entre otros datos importantes.

Por último, esta solución permite cierta flexibilidad debido a la selección y estudio de los algoritmos, pero presenta actividades de alta complejidad en el tema de procesamiento digital de imágenes como ortorectificación, triangulación en la nube de puntos, y creación de texturas entre otros.

3.2 Selección de solución

Con base en las soluciones planteadas, se realizará una tabla comparativa para evaluar la selección de la solución en función de los requisitos del proyecto. En la tabla 3.2 se muestra una rúbrica que coteja y permite dar selección de la solución de la siguiente manera, muy bueno (4), bueno (3), regular (2), malo (1).

Tabla 3.2 Comparación de soluciones planteadas.

Características	1-Desarrollo completo	2-Software Comercial	3-Open Source
Tiempo de desarrollo	Malo(1)	Muy bueno(4)	Malo(1)
Costo implementación	Malo(1)	Muy bueno(4)	Regular(2)
Flexibilidad	Malo (1)	Muy bueno(4)	Bueno(3)
Funcionalidad	Regular(2)	Muy bueno(4)	Regular(2)
Requisitos del sistema	Regular(2)	Regular(2)	Regular(2)
Ponderado	7	18	10

Según lo presentado en la tabla 3.2, en cuanto al tiempo de desarrollo que se necesita para la implementación total de un software para fotogrametría y modelado de 3D se evidencia que la opción propuesta en la solución 1 y la solución 3 sobrepasan en al menos más de un semestre, esto se debe a que la opción 1 su desarrollo parte de cero y en la opción 3 se deberá llevar a cabo un proceso de validación de software muy extenso lo cual sobrepasa 6 meses de trabajo. Debido a esas limitantes la opción 2 es la que se ajusta de manera considerable a nivel de tiempo de desarrollo, debido a su baja complejidad en cuanto al procesamiento de imágenes, generación de modelos 3D y reportes técnicos en un periodo de 6 meses puede estar madurado sin ninguna limitante.

Según el costo de implementación, la solución 2 presenta la ponderación más elevada, debido a que las empresas proveedoras de software para fotogrametría tienen vasta experiencia en la construcción de modelos 3D, proporcionan actualización constante de versiones, incorporación de nuevas funcionalidades y el precio de las licencias está sujeto al empleo de academia o con fines de lucro. Debido a lo encontrado en la solución 2, la solución 1 presenta un costo de implementación sumamente complejo al llevar a cabo el desarrollo de todos los algoritmos, librerías desde cero y a su vez la validación de todo el bloque sería un

proceso muy exhaustivo para lograr obtener una versión estable para realizar la generación de un modelo de elevación digital. No obstante, la opción 3 presenta un valor regular debido a la utilización de código abierto, pero el tiempo de validación es muy extenso lo cual lleva a que se vuelva un proceso iterativo para obtener resultados a largo plazo.

Respecto a la flexibilidad la opción 1 presenta un valor sumamente malo, debido a que se necesita un conocimiento muy amplio en temas relacionados a procesamiento digital de imágenes y reconocimiento de patrones. Ahora bien, la opción 3 permite cierta flexibilidad, por los algoritmos y librerías ya desarrollados por la comunidad *open source*, repositorios entre otros medios de información, pero para llevar a cabo la integración de los algoritmos se deberá llevar a cabo un entrenamiento previo para analizar la funcionalidad y leer toda la documentación que exista de los algoritmos. Por último, la opción 2 presenta una flexibilidad muy buena debido a que existen paquetes de software que permiten utilizar scripts desarrollados en lenguaje de alto nivel para llevar a cabo tareas relacionadas a la generación del mapa 3D dentro del software, al igual que la edición en puntos intermedios del modelado y automatización de todo el proceso en la generación de modelos de elevación.

En cuanto a funcionalidad, las opciones 1 y 3 son capaces de desarrollar mapas o modelos en 3D, para eso se deberá elaborar librerías, algoritmos o utilizar código abierto de propósito general agregando características específicas como medición de áreas, volúmenes, orientación de fotografías, generación de modelos de elevación y validar los resultados para comprobar su funcionalidad. La opción 2 proporciona una herramienta de trabajo más rápido y accesible, debido a que la plataforma de software proporciona ciertas capacidades ya integradas para llevar a cabo generación de mapas 3D, lo que permite obtener resultado de manera más expedita y con una precisión aceptable.

Respecto a los requisitos del sistema donde va ser ejecutado el software, las 3 opciones pueden presentar diferentes requerimientos para las estaciones de trabajo, por ejemplo: memoria RAM, procesador, unidad de procesamiento gráfico (GPU), espacio en disco duro, sistema operativo donde el software va ser utilizado. Debido a que las opciones 1 y 3 hasta que no se concluya su implementación y desarrollo de software no se podrán realizar cálculos de tiempos de ejecución de algoritmos y consumo de recursos

computacionales. La solución 2, exige ciertas características mínimas definidas por las empresas para el apto desempeño en las estaciones de trabajo en la generación de mapas 3D.

Según las comparaciones realizadas a las tres propuestas de solución, se seleccionará la propuesta número 2 para llevar a cabo la generación de mapas 3D. Para ello será necesario seleccionar una plataforma de software comercial que mejor se adapte al problema propuesto, dicha plataforma debe contar al menos con un licenciamiento accesible a la academia, que proporcione la flexibilidad necesaria para la edición de los mapas 3D generados y permita mediante el desarrollo de scripts llevar a cabo procesos de automatización en el flujo de trabajo.

3.2.1 Selección de software comercial

Según la propuesta de solución seleccionada en la sección 3.2 se deberá escoger un software comercial capaz de llevar a cabo técnicas de fotogrametría para generar mapas en 3D. Por lo tanto, en la tabla 3.3 se muestra una rúbrica que permiten seleccionar el software comercial que se utilizará. La ponderación para la selección se da de la siguiente manera, muy bueno (4) bueno (3), regular (2), malo (1).

Tabla 3.3 Comparación de soluciones comerciales.

Características	1-Agisoft Photoscan	2- PIX4D	3-ERDAS Imagine	4- PhotoModeler Scanner
Sistemas Operativos soportados	Muy bueno (4),	Malo (1).	Malo (1).	Malo (1).
Costo (licencia)	Muy bueno (4),	Regular (2).	Bueno (3).	Regular (2).
Flexibilidad	Bueno (3)	Regular (2)	Regular (2)	Regular (2)
Funcionalidad	Bueno (3)	Bueno (3)	Bueno (3)	Bueno (3)
Requisitos estación de trabajo	Bueno (3)	Malo (1).	Regular (2)	Regular (2)
Ponderado	17	9	11	10

Con base en la tabla 3.3 se muestran 4 soluciones comerciales generalmente utilizadas para procesamientos fotogramétricos y generación de modelos 3D a partir de fotografías. En cuanto a los sistemas operativos donde puede ser ejecutados la solución 1 presenta soporte

para los sistemas operativos Windows, Linux y Mac OSX, y las demás soluciones 2,3 y4 solo se están disponibles para la plataforma de Windows.

En cuanto a costo, la solución 2 representa el costo más elevado en licencias educativas o con fines de lucro, la solución 4 presenta costo relativamente alto y solo ofrece licencias con fines de lucro y sin opciones a la academia. No obstante, la solución 3 presenta un valor medio para opciones académicas y la solución 1 presenta el valor más bajo de costo en licencia educativa profesional y en licencia con fines comerciales.

En cuanto a flexibilidad, las soluciones 2,3 y 4 presentan un valor medio, por tener características semejantes en el proceso de reconstrucción. Es por ello que la solución 1 brinda la opción de realizar diferentes scripts para la ejecución y automatización de proyectos en lenguaje de programación al alto nivel al igual que programar tareas secuencialmente.

En funcionalidad, las cuatro soluciones propuestas presentan opciones muy semejantes en cuanto a la generación de modelos 3D, creación de nube de puntos, exportación de formatos, pero la opción 1 proporciona características para medición de área y volúmenes.

En la sección requisitos de la estación de trabajo, la solución 4 no acepta unidades de procesamiento gráfico en comparación con todas las demás soluciones propuestas. La opción 2 es la que requiere mayor capacidad en la unidad de procesamiento y la opción 1 es la que requiere una menor capacidad de memoria RAM en comparación con las demás soluciones (consultar tabla apéndice [A.17](#)).

Según lo discutido con anterioridad, se selecciona la opción número 1 la cual involucra el empleo del software de fotogrametría Agisoft Photoscan para realizar la metodología para la generación de mapas 3D, el cual permite llevar a cabo diferentes procesos en la generación de modelos de elevación y se caracteriza por su bajo costo económico para academia en versión profesional, facultad en realizar scripts en Python, permite utilizar la unidad de procesamiento gráfico y permite el uso en un servidor o clúster en los diferentes sistemas operativos. En la sección de Apéndices se encuentran en detalle los requisitos de hardware y costo económico que fundamenta la selección del software (Apéndice [A](#)).

3.3 Metodología de reconstrucción en 3D

Seleccionado el software comercial Agisoft PhotoScan como solución a la generación de modelos de elevación digital. En la figura 3.1 se muestra el diagrama general para la metodología de generación de mapas en 3D mediante, mediante el uso de la plataforma de software AgiSoft PhotoScan para la etapa de procesamiento. Presenta en la entrada un conjunto de información sobre la orientación espacial (*yaw*, *pitch* y *roll*), puntos georreferenciados e información proveniente del operador de vuelo, como salida un el reporte técnico, un modelo 3D y un modelo de elevación digital.

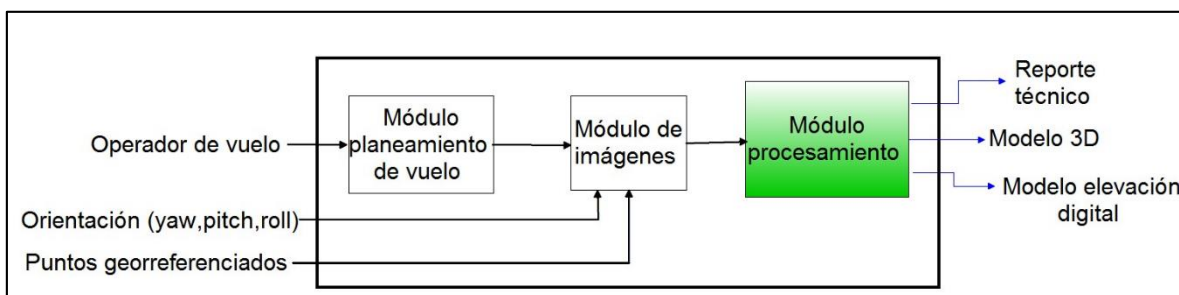


Figura 3.1 Diagrama para la metodología de generación de mapas 3D.

3.4 Descripción de módulos

A continuación, se explican los módulos generales que componen la solución, donde se detallan con su objetivo, entradas, salidas y explicación general de cada uno.

3.4.1 Módulo planeamiento del vuelo

El modulo tiene como entrada al operador de vuelo, encargado de velar por el correcto funcionamiento del sistema UAV, así como la planificación de la misión para la adecuada adquisición de imágenes.

Objetivo: Sistematizar los procedimientos en tierra por parte del operador de vuelo antes de efectuar la adquisición de imágenes con el sistema UAV.

Entrada:

- Revisión de condiciones ambientales.
- Cálculos teóricos de distancia de muestreo, altura de vuelo.
- Reconocimiento e inspección de parcela.

- Establecimiento de puntos de control y marcadores en tierra.
- Ajuste de parámetros de la cámara.
- Planificación de la misión.

Salida: Adquisición de imágenes por sistema UAV.

3.4.2 Módulo imágenes

Se alimenta principalmente de fotografías capturadas por un sensor de imagen, para fines de este proyecto las imágenes utilizadas provienen de un sensor de imagen a bordo de un sistema UAV.

Objetivo: Proporcionar fotografías georreferenciadas libre de pérdidas al módulo de procesamiento Agisoft.

Entradas: Las imágenes adquiridas por el sistema UAV deben de ir en un formato libre de pérdidas, preferiblemente tipo *RAW*, con un número de píxeles en el sensor de imagen mayor a 7 megapíxeles, con los ángulos de orientación “*roll*”, “*pitch*” y “*yaw*” desde el punto de toma de la imagen, con visualización en la imagen de los puntos de control y georreferenciadas.

Salidas: El módulo presenta una única salida, la cual es una imagen georreferenciada libre de pérdidas, la imagen rasterizada de ser convertida en *TIFF*.

3.4.3 Módulo procesamiento

El software Agisoft Photoscan realiza el procesamiento en la construcción del modelo de elevación digital, generación de reportes técnicos, así como el modelo 3D a partir de fotografías.

Objetivo: Generar un modelo de elevación digital y 3D mediante un conjunto de imágenes georreferenciadas realizando un proceso de alineación de fotografías, posicionamiento de marcadores, reconstrucción de malla, optimización de cámara, definición de área de trabajo, generación de nube densa de puntos, generación de texturas, medición de área y volumen.

Entrada: Imágenes georreferenciadas libre de pérdidas.

Salida: El módulo presenta como salida un reporte técnico del proceso, un modelo 3D y un modelo de elevación digital.

A continuación, se detallan los aspectos importantes en la ejecución de cada uno de los módulos que conforman la metodología.

3.5 Planeamiento de un vuelo fotogramétrico

La metodología para la generación de mapas tridimensionales a partir de fotogrametría UAV inicia con el módulo planeamiento de vuelo. A continuación, se presenta la secuencia lógica para realizar el planeamiento del vuelo para la cuantificación de la erosión por medio de fotogrametría UAV. En la figura 3.2 se describe la secuencia a realizar por el operador del sistema UAV.

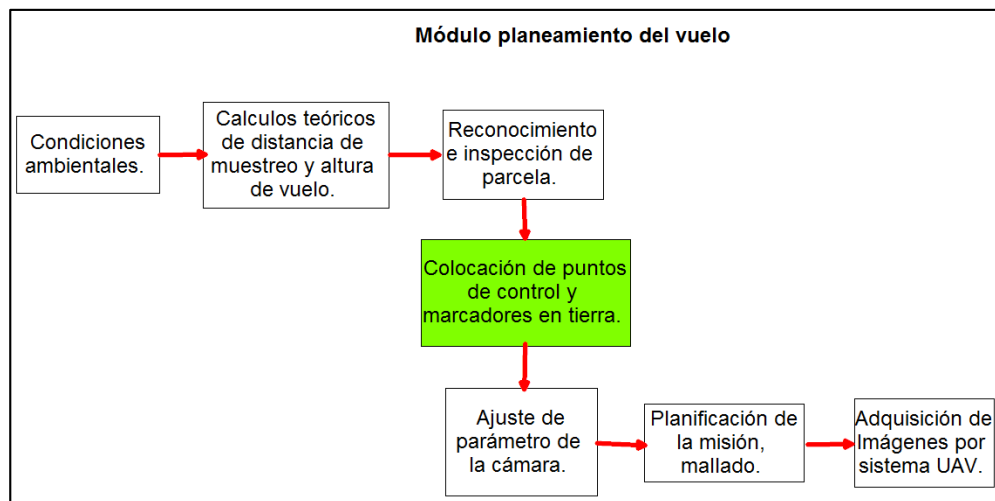


Figura 3.2 Secuencia para el planeamiento de vuelo UAV.

El módulo planeamiento de vuelo, proporciona los parámetros de inicio para una reconstrucción de un modelo 3D para una parcela de baja cobertura para la cuantificación de la erosión en ciertos lapsos de tiempos. El primer punto antes de realizar cualquier estudio de fotogrametría UAV es evaluar la condición climática debido a que los sistemas UAV en condiciones de lluvia y viento intenso no se debe operar por cuestiones de seguridad a nivel operativo.

Los cálculos teóricos de distancia de muestreo y altura de vuelo brindan al investigador una herramienta previa a la planificación del vuelo y posibles valores de

resolución en el modelo que se pueden conseguir en la práctica. Por medio de una hoja de cálculo en Excel programada (apéndice D) se obtiene: resolución espacial esperada dada una altura de vuelo, traslape de imágenes, tiempo de obturación de la cámara entre 2 fotografías, velocidad del sistema UAV y distancia cubierta en el suelo por una imagen.

El reconocimiento e inspección del sitio de estudio, brinda al operador del sistema UAV un perímetro limitado a la hora de realizar el despegue. Para ello se debe tener siempre en consideración los límites de altura de vuelo, estructuras que puedan presentar un peligro para el “*drone*” y definir zonas seguras de despegue y aterrizaje. En el apéndice H se presentan las consideraciones propuestas por la Dirección General de Aviación Civil de Costa Rica a la fecha de conclusión de este trabajo [55].

El bloque más importante y esencial en la generación del modelo de elevación para la cuantificación de la erosión, es el empleo de puntos de control en tierra los cuales se encuentran georreferenciados con precisión milimétrica. El objetivo de utilizar marcadores en tierra permite alcanzar resoluciones en el modelo de elevación digital y 3D en orden de cm/pixel para tener resultados científicamente válidos para cuantificar erosión. Por lo tanto, la aparición de marcadores en las imágenes y los puntos de control en tierra es fundamental en la etapa de procesamiento. En el apéndice E se explica la obtención de puntos de control con el sistema de posicionamiento RTK.

Se cuenta con dos cámaras fotográficas una marca SONY modelo NEX-5TL y la otra marca GOPRO modelo HERO4 para realizar el proceso de fotogrametría (revisar apéndice B). Las cámaras deben ser ajustadas en su menú de configuración antes de realizar el vuelo, entre los parámetros de ajuste se encuentran: el formato de archivo, valor ISO, velocidad de obturación, apertura de lente. Los ajustes se realizan con el sistema UAV en tierra debido a que no se cuenta con la capacidad de acceder a ningún parámetro de configuración de la cámara con el sistema UAV volando, validado el ajuste se coloca una de las cámaras en el sistema gimbal del sistema UAV.

La planificación de la misión se realiza por medio del software Mission Planner y el controlador de vuelo PixHawk. Estos permiten la automatización del vuelo, asegurando un desplazamiento por los puntos de control, a una altura y velocidad del sistema estable y constante, en contraste con el modo manual donde se pueden inducir errores en llevar a cabo

la trayectoria por los puntos de control. El programa permite generar un archivo de registro-telemetría capaz de ser utilizado en la etapa de procesamiento del modelo 3D, cuenta con información de orientación de la cámara, altura, latitud, longitud.

Dada la recolección de fotografías georreferenciadas por el sistema UAV, se tienen todos los parámetros de entrada al módulo de imágenes, el archivo *RAW* es convertido en una imagen rasterizada en formato libre de pérdidas (*TIFF*) empleando un programa de procesamiento de archivo crudo. Para más información se recomienda consultar el apéndice C.

El archivo libre de pérdidas permite la inicialización del módulo de procesamiento para la generación de los parámetros necesarios en el módulo generación de reporte.

3.6 Módulo de procesamiento

El objetivo principal del módulo de procesamiento por medio del software Agisoft Photoscan es realizar la construcción del modelo de elevación digital, generación de reportes técnicos, así como el modelo 3D a partir de fotografías. En la figura 3.3 se presenta el diagrama de la secuencia a realizar para la obtención de los reportes técnicos, así como el cálculo de área y volúmenes.

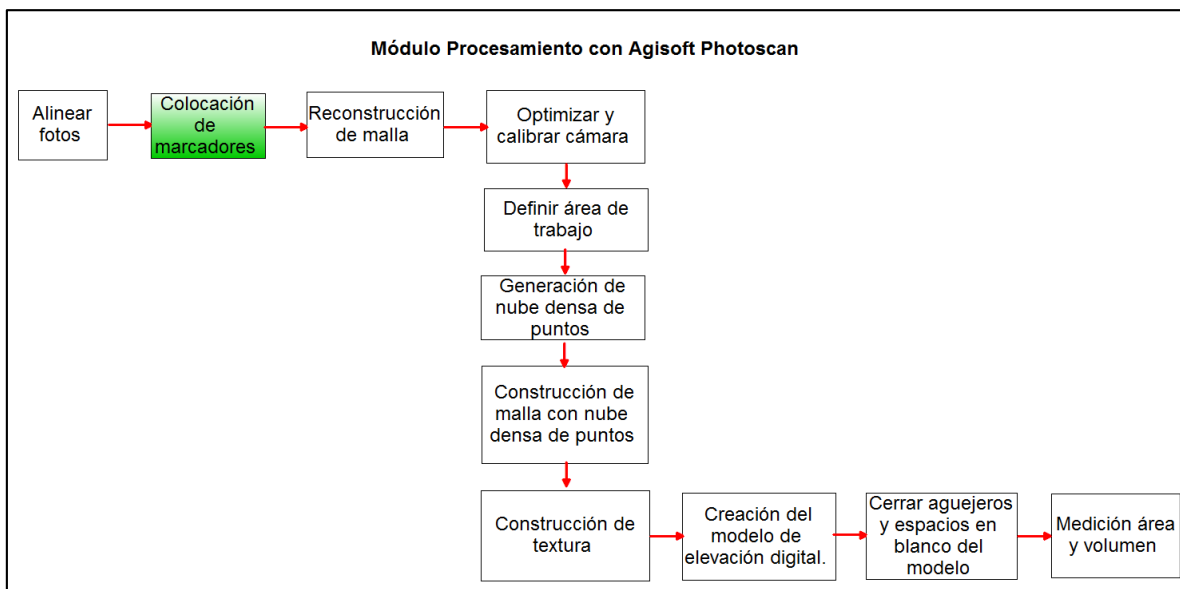


Figura 3.3 Secuencia módulo de procesamiento.

El módulo de procesamiento es el encargado de generar el modelo 3D, modelo de elevación digital a partir de la entrada de imágenes georreferenciadas y puntos de control.

El procesamiento inicia con la alineación de fotografías buscando la posición y orientación de cada imagen utilizando diferentes algoritmos de correspondencia generando una nube escasa de puntos.

La señalización de los puntos de control o marcados en el software Agisoft le da validez al modelo generado debido a la precisión milimétrica que se tiene. Por lo tanto, una visualización completa de los puntos en las imágenes adquirida favorece a la identificación por parte del software.

La reconstrucción de la malla define el tipo de superficie a reconstruir, realizando el procesamiento para modelar superficies de relieve o terreno. Optimizar la cámara permite seleccionar el tipo de lente con el que se cuenta y definir parámetros como distorsiones aportadas por el lente. Se recomienda consultar el apéndice C para más detalles.

Definir el área de trabajo limita el espacio de trabajo donde se va efectuar el procesamiento de la nube densa de puntos, así enfocando el procesamiento únicamente en el en área de interés. Por su parte la nube densa de puntos permite ver un modelo más detallado basado en la posición de la cámara. Realizando el proceso de mallado y textura posteriormente brinda un modelo con una mejor calidad visual.

Generar el modelo de elevación digital permite la representación de una superficie con valores de altitud para caracterizar formas del relieve. El proceso de cerrar ‘huecos’ genera una reconstrucción completa del área cubierta debido a falta de imágenes y permite la medición de área y volumen del modelo de la parcela delimitado.

El objetivo de concluir el procesamiento es la generación de los reportes de modelos 3D, mediciones de áreas y volúmenes en diferentes instantes de tiempo, brindando la posibilidad de evaluar cambios de volumen en el suelo, con esta información el investigador está en capacidad de generar un plan de control para evitar pérdida de suelo, lo cual dicha

metodología faculta un análisis más expedito y menos invasivo respecto a métodos tradicionales.

Se realizó un manual para la generación de modelos de elevación y mapas 3D, se recomienda revisar la referencia [56], donde se explica el proceso de importación de los archivos y las herramientas utilizadas para generar el modelo el modelo 3D, modelo de elevación y mediciones de áreas y volúmenes.

4 Capítulo 4: Validación de la metodología para generar en mapas 3D

En este capítulo se validará la metodología propuesta, desarrollando un mapa tridimensional y un modelo de elevación digital con la plataforma de software seleccionada, esto mediante un vuelo de prueba en una parcela ubicada en el campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Antes de realizar el estudio, se realizaron diferentes ejercicios con imágenes para controlar y configurar la herramienta de procesamiento adecuadamente.

4.1 Reconocimiento del campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola

Se realizó el reconocimiento de la parcela de la escuela de Ingeniería Agrícola ubicada dentro del campus central del ITCR, con el fin de visualizar y considerar normas para realizar un vuelo seguro. En la figura 4.1 se observa el campo de prácticas destinado a realizar los vuelos para la generación del modelo 3D y el modelo de elevación digital. La parcela está constituida por un sembradío de repollos y un área sin cultivar.



Figura 4.1 Campo de prácticas Escuela de Ingeniería Agrícola utilizado para los estudios.

Dicho campo de prácticas cuenta con 5 puntos de control distribuidos en el terreno, los puntos fueron obtenidos con el sistema RTK del Centro de Investigaciones en Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Se recomienda revisar el

apéndice E donde se muestran los datos obtenidos por los Ingenieros de Construcción del TEC que tomaron los puntos.

En la figura 4.2 se observa uno de los cinco puntos de control representado por una estaca de madera clavada en la tierra y un marcador impreso con su centro a 11,5 cm de la estaca. La utilización del marcador impreso tiene como objetivo ser visto durante el vuelo.

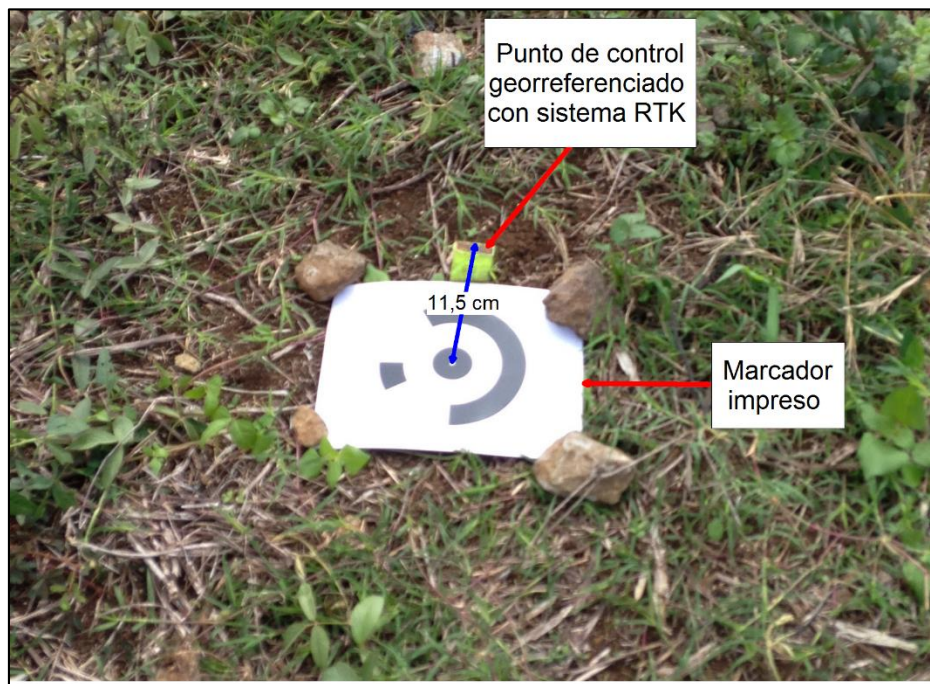


Figura 4.2 Puntos de control y marcadores utilizados.

4.1.1 Sistema UAV utilizado

Los vuelos se realizaron utilizando el sistema UAV de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, en la figura 4.4 se muestra el sistema UAV, que es un octocóptero con cámara marca GoPro modelo Hero 4 instalada en el sistema gimbal de la empresa 3D Robotics.

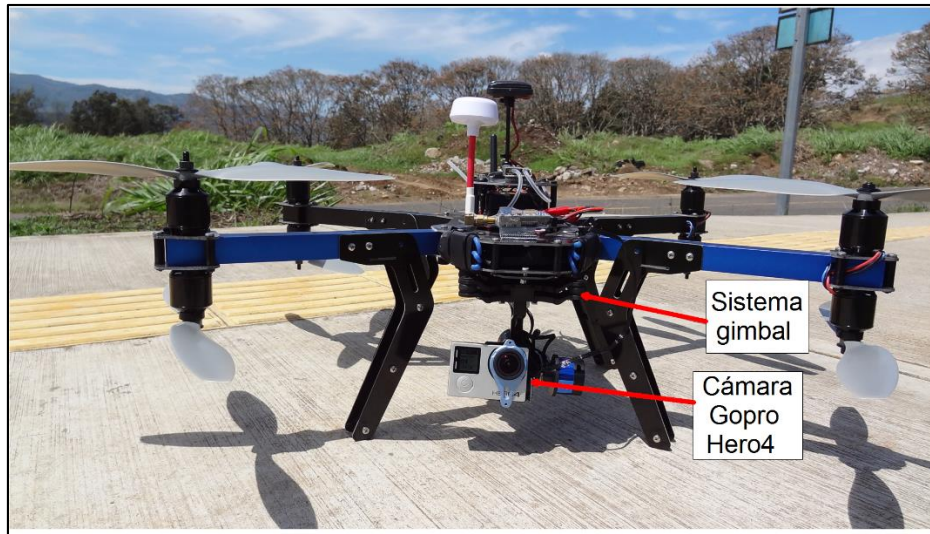


Figura 4.3 Sistema UAV con cámara GoPro Hero 4.

La cámara marca GoPro modelo Hero4 no cuenta con un sistema de obturación remota por medio de infrarrojo u otro método que pueda ser controlado desde el sistema UAV, por lo que se debe de configurar el disparo de obturación en el menú de opciones en la pestaña “*time lapse*”. En la figura 4.4 se observa el menú de la cámara con las opciones de configuración.



Figura 4.4 Menú cámara GoPro Hero 4.

4.1.2 Estación de trabajo

Para realizar todas las etapas de procesamiento con Agisoft Photoscan se utilizó una computadora marca *Asus* modelo *U31S*. En la tabla 4.1 se muestran las características de la estación de trabajo utilizada.

Tabla 4.1 Especificaciones de hardware de la estación de trabajo.

Especificaciones de hardware estación de trabajo	
Sistema operativo	Windows 7, 64 bits
CPU	Intel Core i3-2330M, 2.20 GHz
Memoria RAM	8 GB
Unidad de procesamiento gráfico (GPU)	Nvidia GT 520M, 1 GB a 1480 MHz

4.2 Resultados primer vuelo

Esta prueba se realizó con el fin de comprender la herramienta de software Agisoft Photoscan y ver su flujo de trabajo en la construcción de modelos de elevación.

En la figura 4.5 se muestra la pantalla de configuración de la cámara marca GoPro modelo Hero 4, la cual se configuró en modo Video, con una resolución de 1080 píxeles a 24 cuadros por segundo, con un valor ISO de 400 y un campo de visión tipo *narrow*.

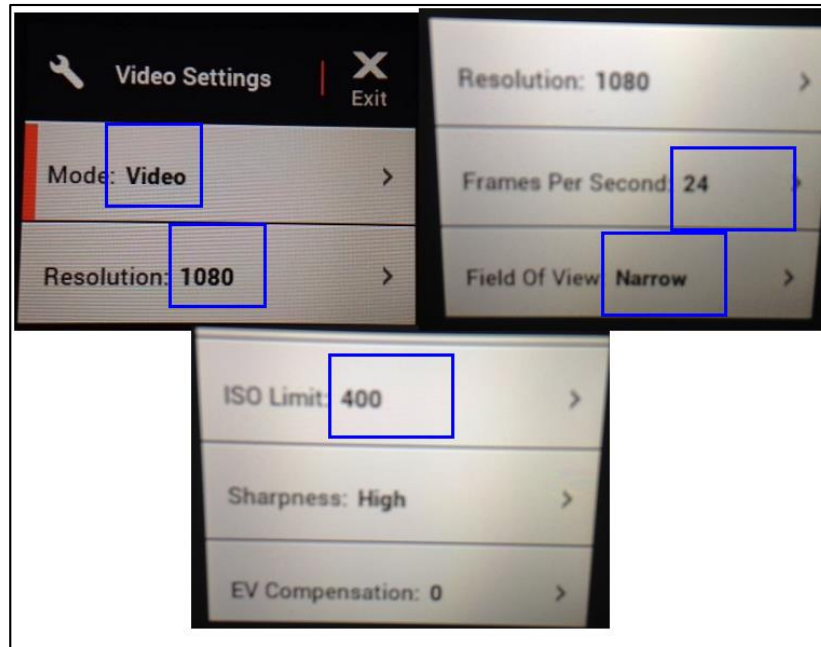


Figura 4.5 Configuración de cámara modo video.

Se creó una ruta de vuelo autónoma para grabar la parcela en el programa Mission Planner. En la figura 4.6 se muestra el patrón de vuelo realizado por el sistema UAV de forma autónoma a una altura de 40 metros.

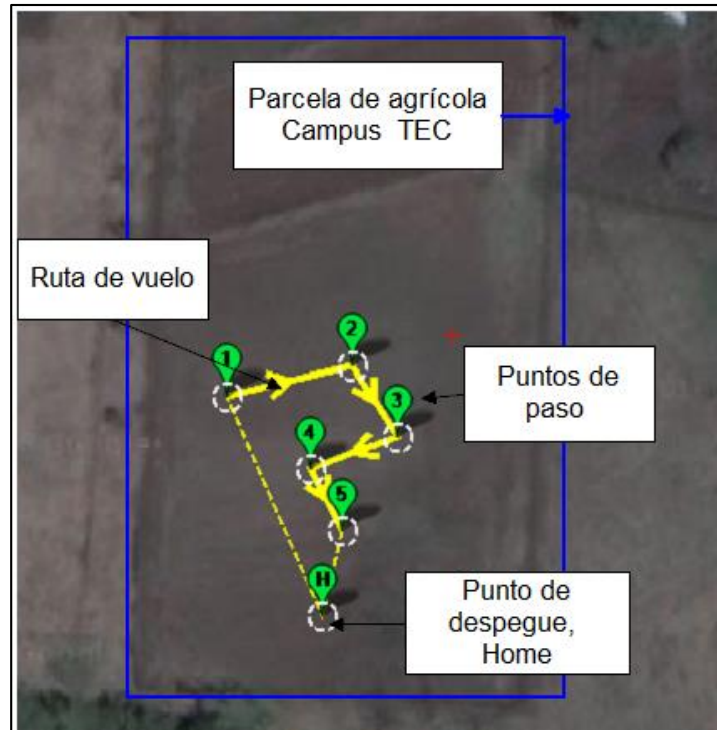


Figura 4.6 Patrón de vuelo primera prueba.

En el video realizado se obtuvieron 72 imágenes fijas en formato *JPG* de la parcela usando los 72 diferentes cuadros por segundo. La utilización de un video para la obtención de imágenes limita la resolución final de la fotografía y además no se cuenta con la georreferenciación respectiva

4.2.1 Resultados del procesamiento del primer vuelo

Se abrió Agisoft Photoscan y se cargaron las 72 imágenes sin georreferenciar. La figura 4.7 muestra la interfaz del programa para la generación de modelos 3D. Se recomienda revisar el manual de generación de modelos de elevación [57] para mayor información sobre la parte de manipulación de la herramienta de software.



Figura 4.7 Interfaz de Agisoft Photoscan.

Primero se realizó la orientación de fotos, donde se busca entre las imágenes traslapadas la posición de cada fotografía y la construcción de una nube dispersa de puntos. Para esta primera prueba de construcción de un modelo 3D no se colocaron los marcadores o puntos de control en tierra, esto con el objetivo de analizar la capacidad de procesamiento del software en estas condiciones.

En la figura 4.8 se muestra el resultado de la alineación de las imágenes y la nube dispersa de puntos. Cada cuadro azul representa una fotografía orientada.

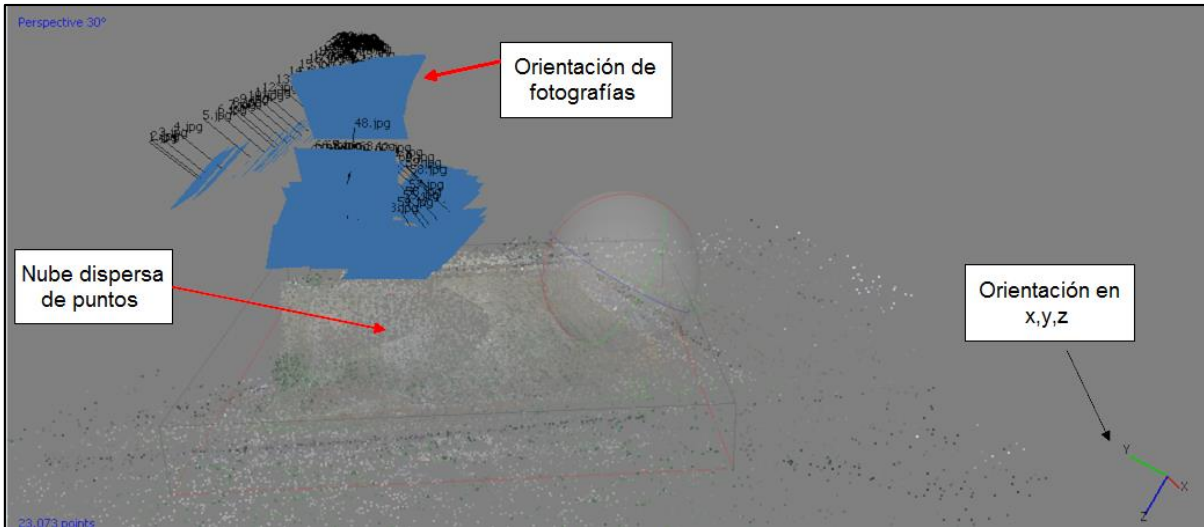


Figura 4.8 Resultado nube dispersa de puntos primer vuelo.

Se procedió a limitar el área de trabajo donde se generó la nube de puntos. La línea roja en el modelo representa el plano de tierra o piso. En la figura 4.9 se muestra el resultado del procesamiento de la nube densa de puntos.

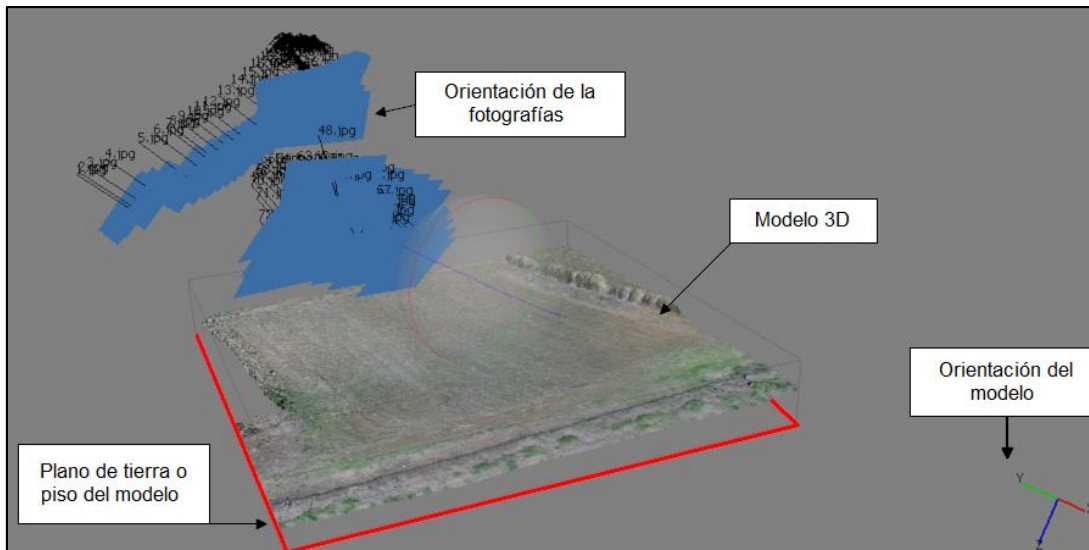


Figura 4.9 Resultado nube densa de puntos del primer vuelo.

Por último, se realiza el modelo tridimensional de la parcela, en la figura 4.10 se muestra la vista lateral y superior del modelo de elevación digital. Para realizar el modelo de

elevación digital se debe de contar con imágenes georreferenciadas y puntos de control utilizados en el software. Por lo tanto, en el primer vuelo no fue posible realizar el modelo.

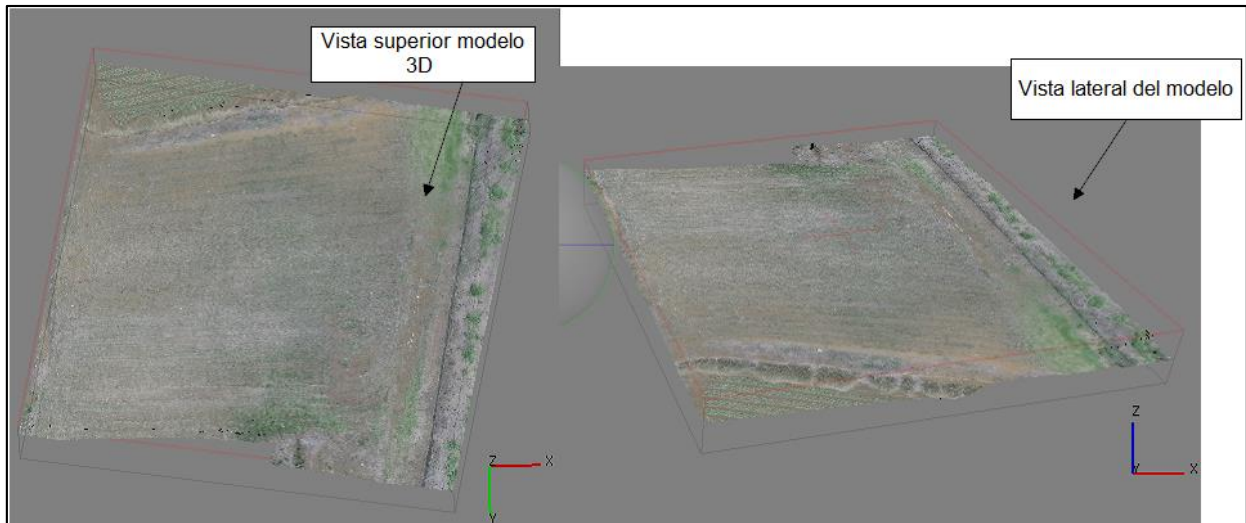


Figura 4.10 Resultado de vistas superior y lateral del modelo 3D.

El desarrollo del modelo anterior comprobó el procesamiento del software sin contar con puntos de control ni georreferenciación de imágenes, creando un modelo llano sin altura y desniveles. Este modelo no es útil para la cuantificación de la erosión, por lo que usando datos georreferenciados en el procesamiento deben de verse cambios en los modelos generados, sin embargo, los resultados pueden ser de interés para otras aplicaciones donde la resolución no deba ser tan elevada.

Los resultados teóricos para el cálculo de la distancia de muestreo del primer vuelo se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados teóricos primer vuelo.

Parámetros	
Ancho del sensor (mm)	5,37
Distancia focal de la cámara (mm)	3
Altura de vuelo (m)	40
Ancho de la imagen (píxeles)	3000
Alto de la imagen(píxeles)	2250
Resultado: distancia de muestreo (cm/píxel)	2,38

Entre los resultados no se obtiene la generación de un reporte del modelo 3D, esto sucede principalmente a que Agisoft ocupa datos georreferenciados y marcadores para su creación, además no fue posible la medición de áreas ni volúmenes.

A continuación, se presenta la tabla 4.3 con los resultados más importantes generados en el primer vuelo de prueba para su posterior comparación con los diferentes vuelos.

Tabla 4.3 Resultados del modelo 3D primer vuelo.

Parámetro	Resultado
Área cubierta	No generado
Cantidad de imágenes utilizadas	72 de 72
Altura de vuelo	No reportada
Distancia focal de la cámara	3 mm
Errores en puntos de control	No generado
Errores de distancia	No generado
Resolución del modelo de elevación	No generado
Densidad de puntos del modelo de elevación	No generado

4.2.2 Pruebas de automatización de modelos

Se realizaron una serie de pruebas simples para validar el funcionamiento de los scripts de Python en el software Agisoft, con el objetivo de automatizar todo el proceso en la generación de modelos 3D. La figura 4.11 muestra el flujo del script desarrollado.

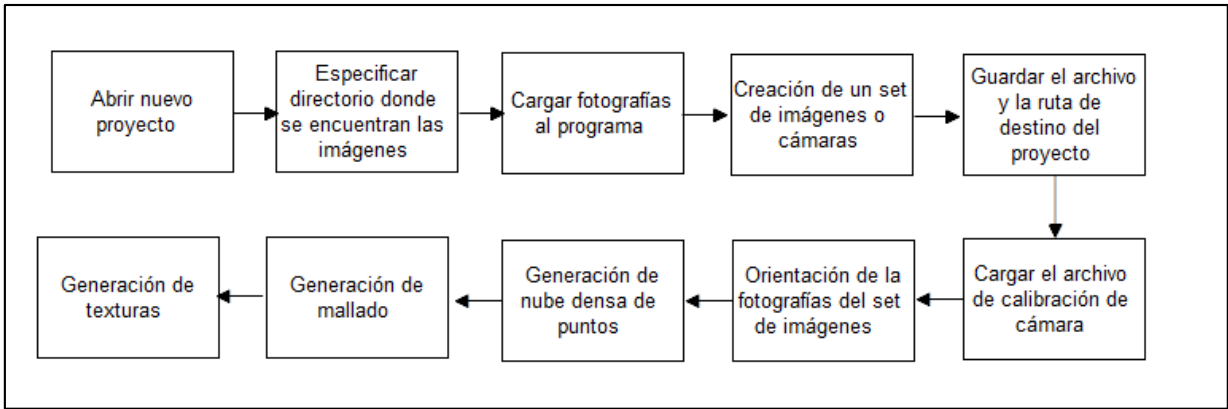


Figura 4.11 Lógica de programación para proceso de automatización.

En el apéndice G se encuentra el script realizado en Python, en la figura 4.12 se muestra el resultado en la consola del software Agisoft Photoscan al correr el script para llevar el proceso de generación de un modelo 3D

```

01:07:24 Inicio del Script
01:07:24 Especificar el nombre del archivo donde se encuentran las fotos:
01:07:37 Escribir el nombre del archivo y la dirección donde guardar el proyecto:
01:07:47 Loading photos...
01:07:47 Finished processing in 0.016 sec (exit code 1)
01:07:47 Saving project...
01:07:47 saved project in 0.016 sec
01:07:47 Finished processing in 0.016 sec (exit code 1)
01:07:47 Carga de imágenes finalizada

01:12:57 photo 69: 13405 points
01:12:58 photo 70: 13056 points
01:12:58 photo 71: 12775 points
01:12:59 photo 72: 12838 points
01:12:59 points detected in 58.163 sec
01:12:59 Selecting pairs...
01:16:07 1133817 matches found in 188.217 sec
01:16:08 matches combined in 0.312 sec
01:16:41 matches filtered in 33.146 sec
01:16:41 2000 of 2017 pairs selected in 0 sec
01:16:41 Matching points...
01:18:34 Finished processing in 392.867 sec (exit code 0)
  
```

Figura 4.12 Ejecución del script generado en Python.

Con los resultados obtenidos se puede decir que el software Agisoft Photoscan permite la reconstrucción de un modelo 3D por medio de scripts permitiendo la automatización del proceso en un futuro.

4.3 Resultados segundo vuelo con puntos de control

En el segundo vuelo de prueba se utilizó la cámara GOPRO modelo Hero 4, se escoge la configuración “time lapse” con una resolución de 7 Megapixels, la apertura del lente de la cámara es de 3 mm y presenta un campo de visión de alcance medio que produce distorsión radial en la imagen, el valor ISO seleccionado fue 100 y el formato de almacenamiento de la imagen es *JPG*. En la figura 4.13 se muestra la configuración realizada a la cámara.

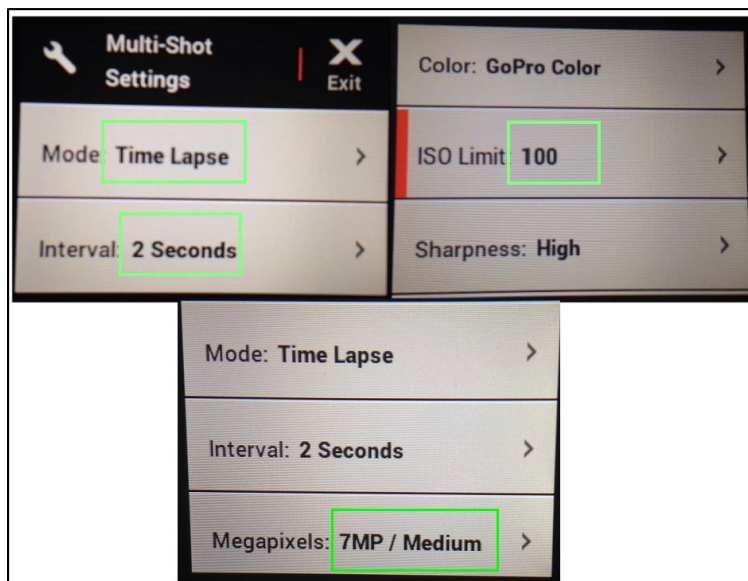


Figura 4.13 Configuración cámara Gopro en modo time lapse.

Un aspecto importante a la hora de realizar fotografías con la cámara marca GOPRO es la configuración de su reloj interno, el cual deberá estar en sincronía con el reloj GPS del sistema UAV, esto con el fin de realizar posteriormente el proceso de georreferenciación que registra el sistema de control a bordo. En la figura 4.14 se configura en el menú de la cámara GOPRO la fecha y hora con la del GPS del sistema UAV.



Figura 4.14 Sincronización de tiempos GOPRO y sistema UAV.

Los cálculos teóricos esperados para la resolución de la distancia de muestreo se observan en la tabla 4.4

Tabla 4.4 Resultados teóricos segundo vuelo.

Parámetros	
Ancho del sensor (mm)	5,37
Distancia focal de la cámara (mm)	3
Altura de vuelo (m)	17
Ancho de la imagen (pixeles)	3000
Alto de la imagen(pixeles)	2250
Resultado: distancia de muestreo (cm/pixel)	1,01

Según los resultados teóricos se espera a una altura de 17 metros y usando la cámara GOPRO una resolución final de 1,01 cm/pixel

Para llevar el planeamiento de la ruta de vuelo se utilizó el programa Mission Planner y se programó una ruta automática en el sistema UAV que abarcara la parcela de prueba en el campo de prácticas de la Escuela de Agrícola. En la figura 4.15 se muestra el mallado de la parcela recorrido por el sistema UAV.



Figura 4.15 Ruta automática para parcela de agrícola.

La ruta abarca por completo el campo de estudio de agrícola y cubre aproximadamente un área de 4103 m² según lo mostrado por el programa cuenta con 84 puntos de paso y una altura de 17 metros.

Una vez terminado el vuelo, se procedió en extraer las imágenes de la cámara, el formato de las imágenes viene por defecto en formato *JPG*, por lo que no se realizó ningún preprocesamiento a la imagen.

Para obtener todos los datos de georreferenciación se utilizaron los datos de telemetría que proporciona en el controlador del sistema UAV para realizar el proceso de georreferenciación debido a que la cámara no posee un sistema de obturación controlado por infrarrojo. En la figura 4.16 se muestra el contenido de un archivo de telemetría donde se observa la fecha y hora del sistema UAV, datos de *roll*, *pitch*, *yaw*, latitud, longitud y altura.

Hora y fecha del sistema UAV		Datos de roll, pitch, yaw		Información latitud, longitud y altura	
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	9 CE FF BE 0	mavlink_heartbeat_t	custom
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1C 25 1 1	mavlink_attitude_t	time_usec
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	18 26 1 1	mavlink_ahrs2_t	roll
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	14 27 1 1	mavlink_vfr_hud_t	airspeed
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1A 28 1 1	mavlink_raw_imu_t	time_usec
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	16 29 1 1	mavlink_scaled_imu2_t	time_boot_ms
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	E 2A 1 1	mavlink_scaled_pressure_t	time_boot_ms
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1F 2B 1 1	mavlink_sys_status_t	onboard_control_sensors_present
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	6 2C 1 1	mavlink_power_status_t	vcc
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	4 2D 1 1	mavlink_meminfto_t	brkval
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	2 2E 1 1	mavlink_mission_current_t	seq
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1E 2F 1 1	mavlink_gps_raw_int_t	time_usec
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1A 30 1 1	mavlink_nav_controller_output_t	nav_roll
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	8 31 1 1	mavlink_fence_status_t	breach_time
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1C 32 1 1	mavlink_global_position_int_t	time_boot_ms
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	15 33 1 1	mavlink_servo_output_raw_t	time_usec
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	16 34 1 1	mavlink_rc_channels_raw_t	time_boot_ms
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1C 35 1 1	mavlink_attitude_t	time_boot_ms
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	18 36 1 1	mavlink_ahrs2_t	roll
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	14 37 1 1	mavlink_vfr_hud_t	airspeed
20/05/2016	09:54:34 a.m.	FE	1C 38 1 1	mavlink_ahrs_t	omegaqx

Figura 4.16 Información del archivo de telemetría sistema UAV.

Se utilizó el software de Mission Planner en el proceso de georreferenciación de imágenes, para esto se utilizó el archivo de telemetría generado y la carpeta de imágenes de la cámara. En la figura 4.17 se muestra el programa de referencia de imágenes, el proceso que se realizó fue una comparación de tiempos de obturación del sistema UAV con los tiempos de obturación de las imágenes.

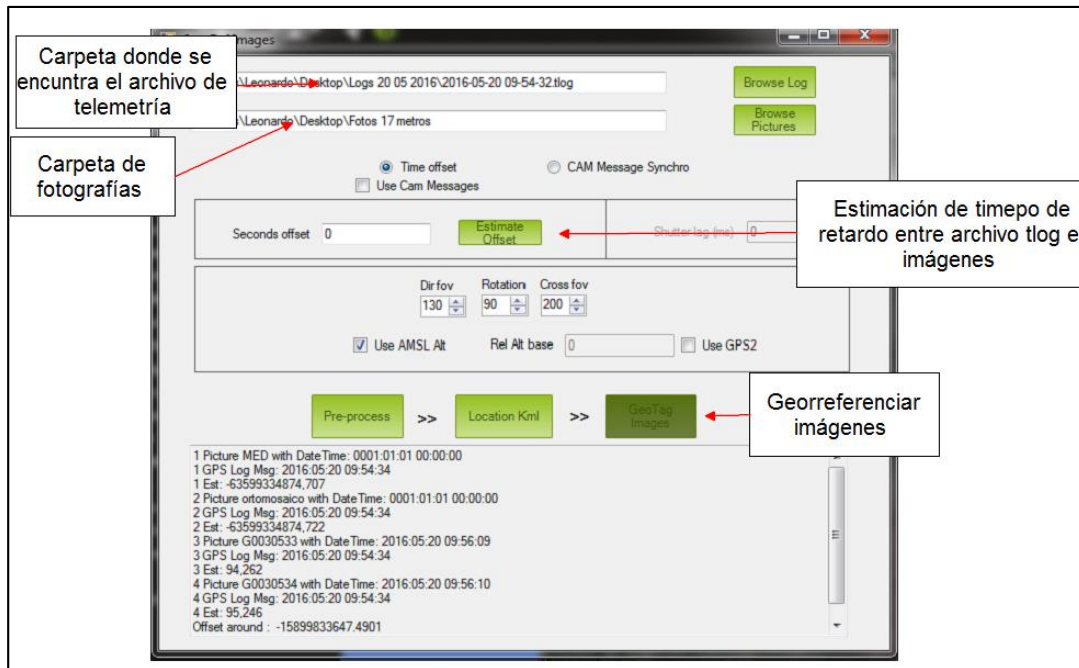


Figura 4.17 Georreferenciación mediante Mission Planner.

El programa para georreferenciar escribió la información de latitud, longitud y altura en cada imagen de la carpeta. Este procedimiento para georreferenciar imágenes no es el más recomendado debido a los errores que se pueden presentar entre los tiempos del sistema UAV y el tiempo de la cámara UAV, igualmente este proceso posee poco control para el usuario.

4.3.1 Resultado de procesamiento segundo vuelo

Se importaron las imágenes georreferenciada a Agisoft Photoscan, en la figura 4.18 se muestra la interfaz de usuario del programa, con las imágenes cargadas.

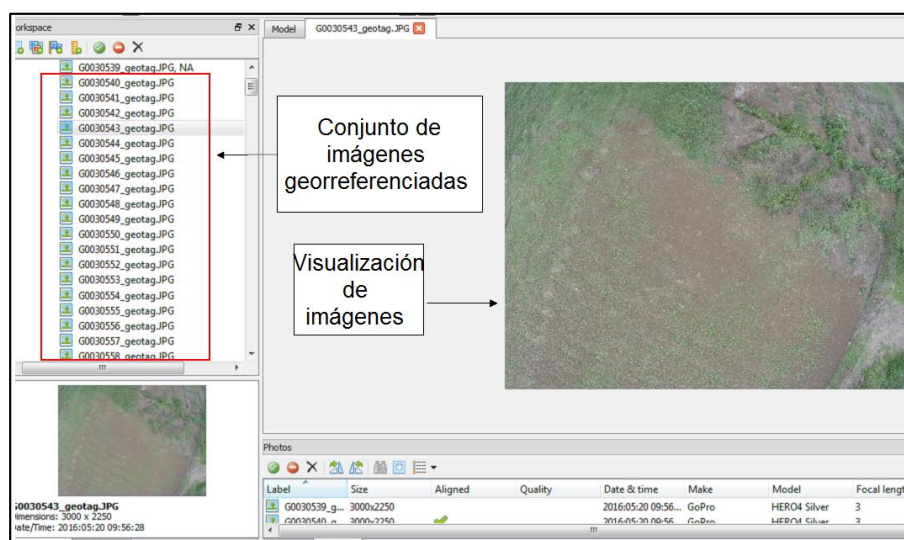


Figura 4.18 Interfaz de Agisoft Photoscan con imágenes georreferenciadas.

Con las imágenes en el programa se realizó la búsqueda de los puntos de control para la importación datos georreferenciados en tierra con precisiones milimétricas. En la figura 4.19 se muestra los datos de posicionamiento de las imágenes como de los puntos de control en tierra y las distancias entre ellos.

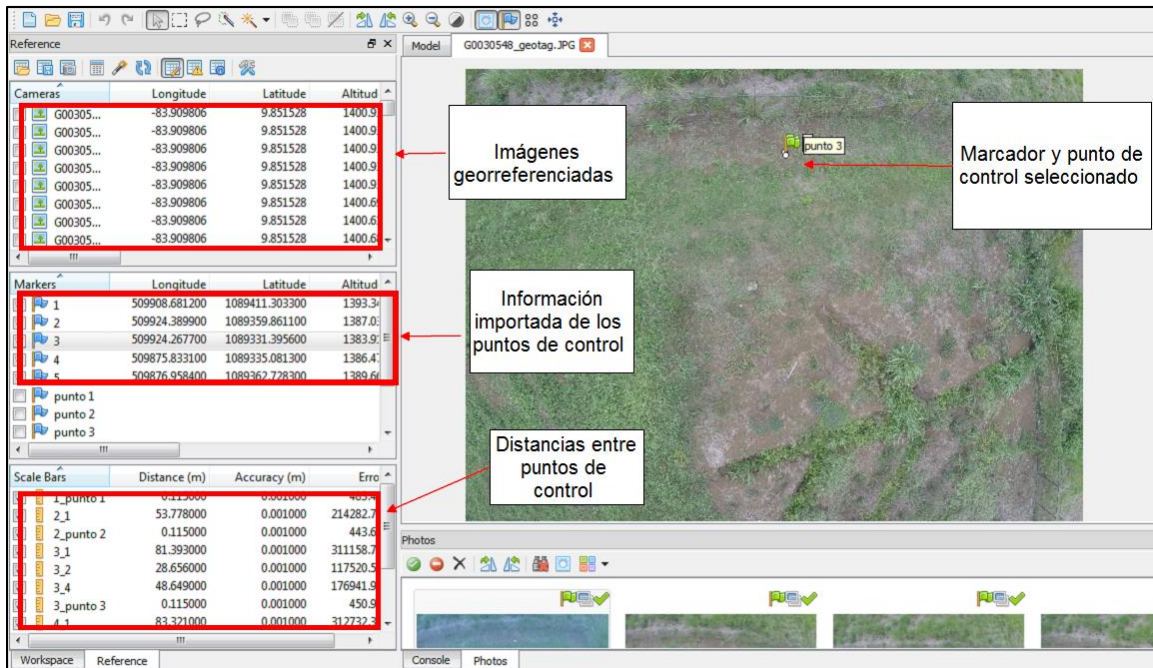


Figura 4.19 Establecimiento de puntos de control en el software Agisoft PhotoScan.

Seguidamente se llevó a cabo el proceso de alineación de imágenes para la construcción de la nube dispersa de puntos. En la figura 4.20 se muestra el resultado del proceso junto con los marcadores georeferenciados en tierra.

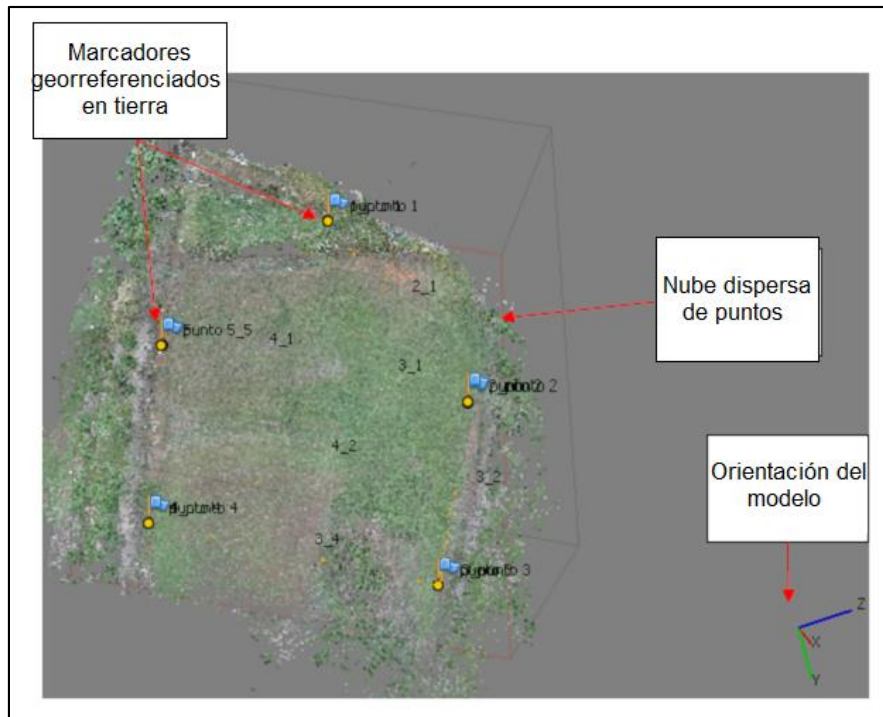


Figura 4.20 Nube dispersa de puntos segundo vuelo.

En la nube dispersa de puntos se ven problemas de orientación en el modelo, se realizó la construcción en 3D para visualizar mejor el modelo. En la figura 4.21 se muestra el resultado de las vistas frontal y superior del modelo 3D con los marcadores en tierra.

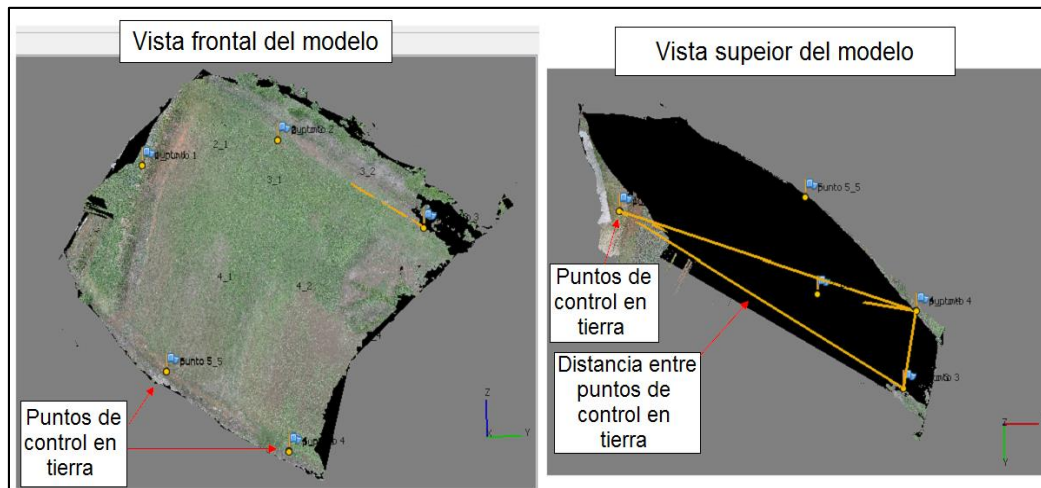


Figura 4.21 Vista frontal y superior del modelo 3D.

Una vez generado el modelo se evidenciaron problemas en la orientación del modelo, por lo cual se deben de realizar correcciones en el procesamiento, se generó el reporte y se presentan los resultados más importantes en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultado del modelo 3D segundo vuelo.

Parámetro	Resultado
Área cubierta	2.47229e+11
Cantidad de imágenes utilizadas	218 de 242
Altura de vuelo	87.5 km
Distancia focal de la cámara	3 mm
Errores en puntos de control (xy,z)	(3.73e06 , 1.16e06) m
Errores de distancia entre puntos de control	173,65 km
Resolución del modelo de elevación	128 m/pix
Densidad de puntos del modelo de elevación	6.114e-05 puntos/m ²

La nube dispersa está constituida por 282,272 puntos, por cada punto en la nube hay un traslape efectivo de 2,71 fotos. La nube densa en calidad media está compuesta por 13,555,670 puntos.

Según los datos teóricos, la resolución esperada es de 1,01 cm/pixel, el experimental fue de 128 m/pixel, por lo tanto, el error experimental es de 126,72 metros.

En la tabla 4.6 se presentan los tiempos de procesamiento de las diferentes etapas en la generación del modelo 3D.

Tabla 4.6 Tiempos de procesamiento segundo vuelo.

Parámetro	Porcentual %	Tiempo (min,ss)
Nube dispersa de puntos ,calidad alta	40,46	40:11
Nube densa de puntos, calidad media	54,82	54:27
Modelo, calidad media	4,72	04:41
Tiempo total	100	99:19

Se observa que el proceso que requiere más tiempo es la generación de la nube densa de puntos la cual consume un 54,8% del proceso de reconstrucción con una calidad media y el tiempo total de reconstrucción fue de 99 minutos con 19 segundos.

4.3.2 Correcciones en procesamiento del segundo vuelo

Las correcciones en el procesamiento del modelo se deben a errores en la orientación, la mala optimización y calibración de la cámara utilizando todo el conjunto de fotografías generando errores en el posicionamiento, se recomienda realizar la optimización de la cámara sólo con las imágenes de los puntos de control. El proceso se inició con la alineación de fotografías para la construcción de la nube dispersa de puntos. En la figura 4.22 se muestra la nube dispersa con la orientación de las imágenes.

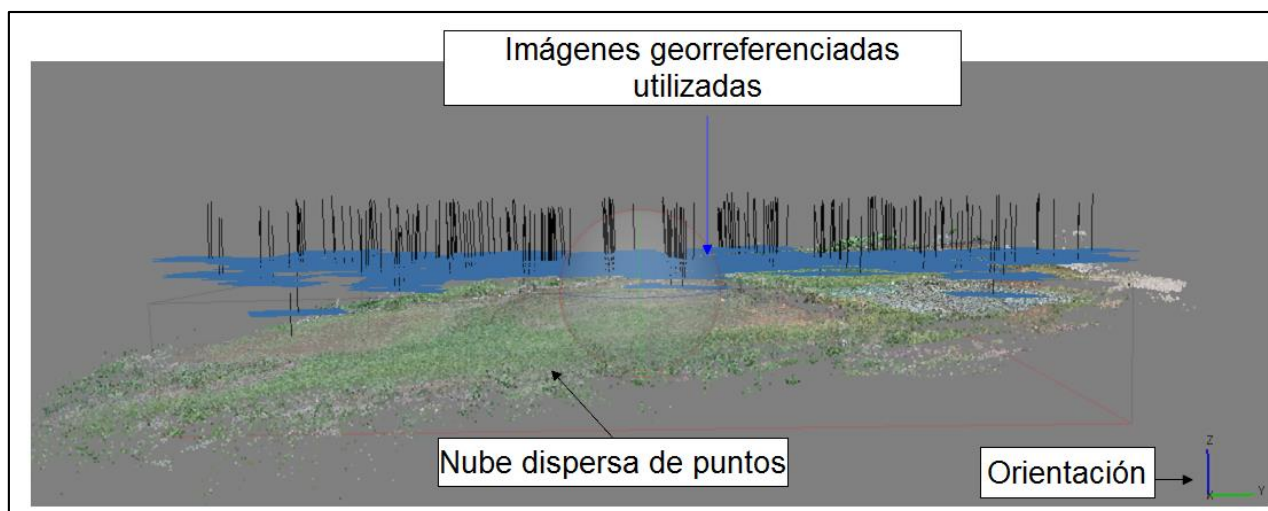


Figura 4.22 Nube dispersa de puntos correcta, vista frontal.

Se seleccionaron los marcadores en las fotografías georreferenciadas y se establecieron las distancias entre puntos de control en tierra. En la figura 4.23 se muestran la interfaz del programa con los puntos de control colocados.

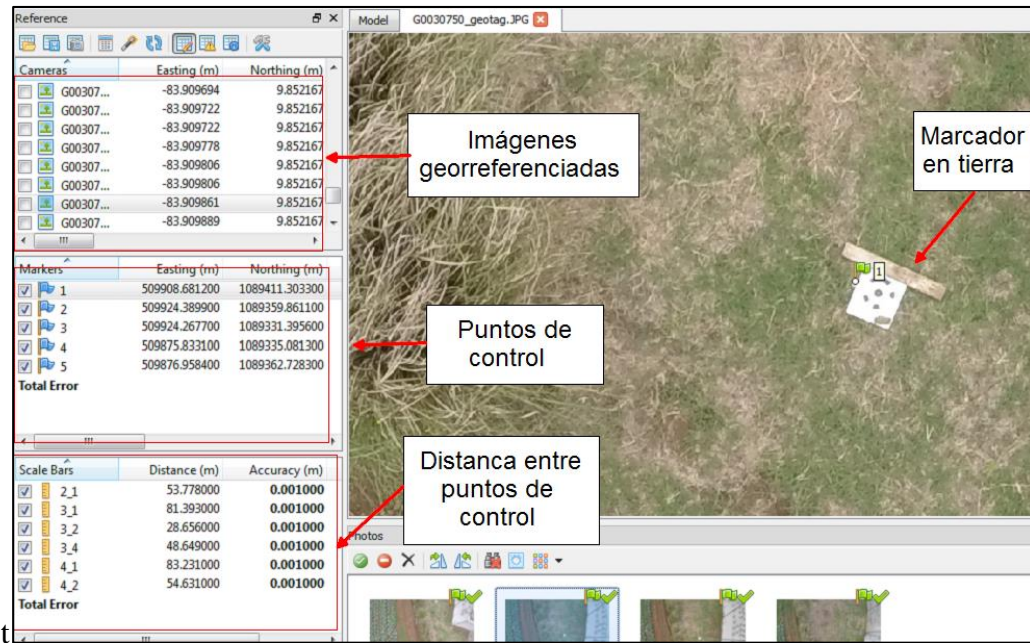


Figura 4.23 Interfaz del software Agisoft PhotoScan con marcadores del segundo vuelo.

Se generó la construcción del mallado con los marcadores para verificar el posicionamiento de los puntos de control en tierra. En la figura 4.24 se muestran los resultados del procesamiento del mallado.

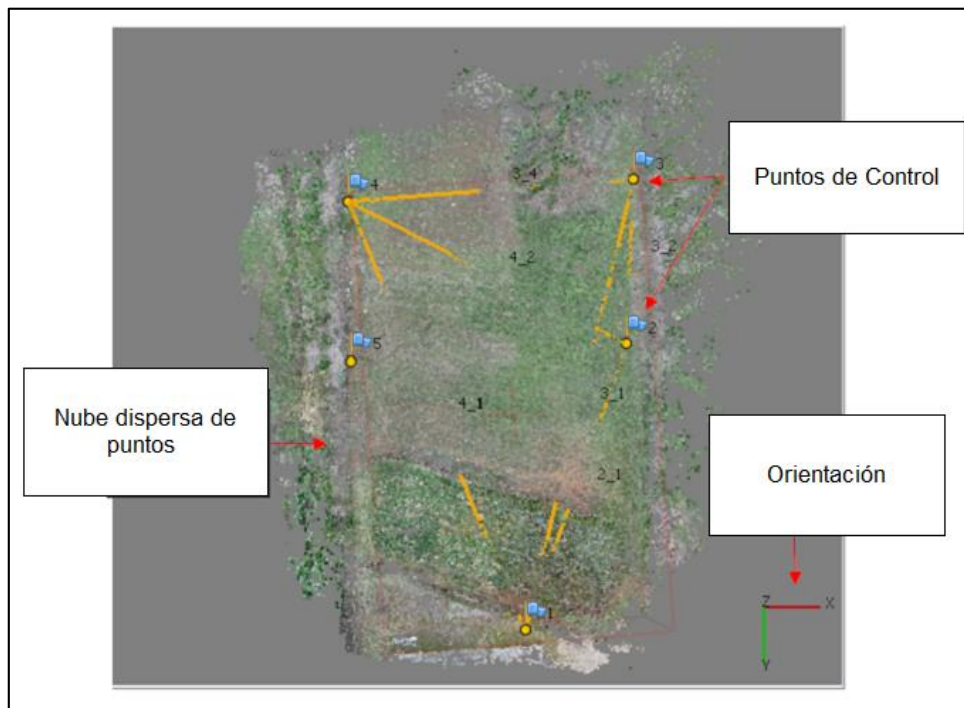


Figura 4.24 Nube dispersa de puntos correcta, vista superior.

Con el resultado obtenido de la nube dispersa de puntos se debió optimizar y calibrar las cámaras únicamente con los cinco marcadores colocados, generando la nube densa de puntos. En la figura 4.25 se muestra la construcción de la nube densa de puntos con los marcadores colocados correctamente.

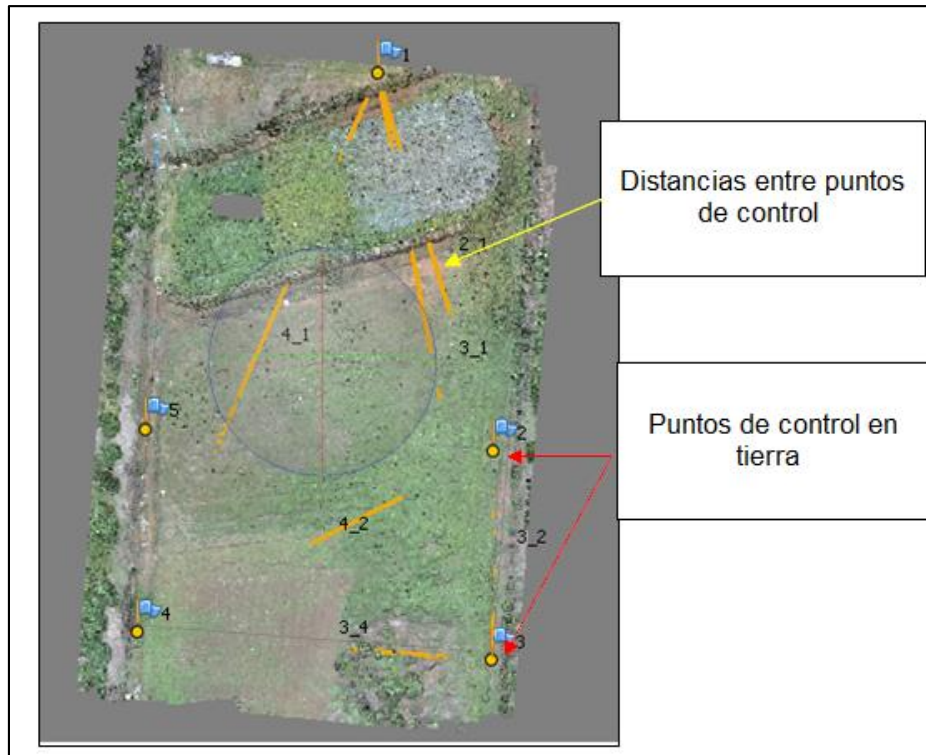


Figura 4.25 Nube densa de puntos con correcciones.

Posteriormente se debió de realizar el proceso de mallado nuevamente, pero con la utilización de la nube densa de puntos seleccionada y la creación de texturas para la obtención de un modelo 3D más detallado. En la figura 4.26 se muestra la nube densa de puntos con la orientación correcta.

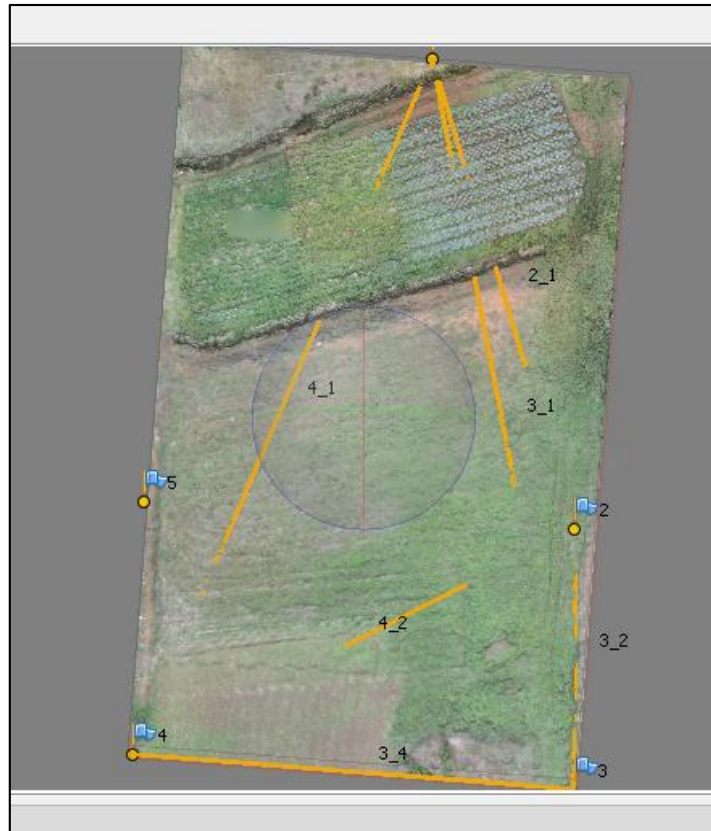


Figura 4.26 Propuesta de modelo 3D

Con el modelo 3D finalizado se continuó el procesamiento para la obtención de un modelo de elevación digital donde se evidencia que conforme la altura cambia se le asigna una tonalidad de color específica para su detección. En la figura 4.27 se muestra el resultado generado por software Agisoft Photoscan.

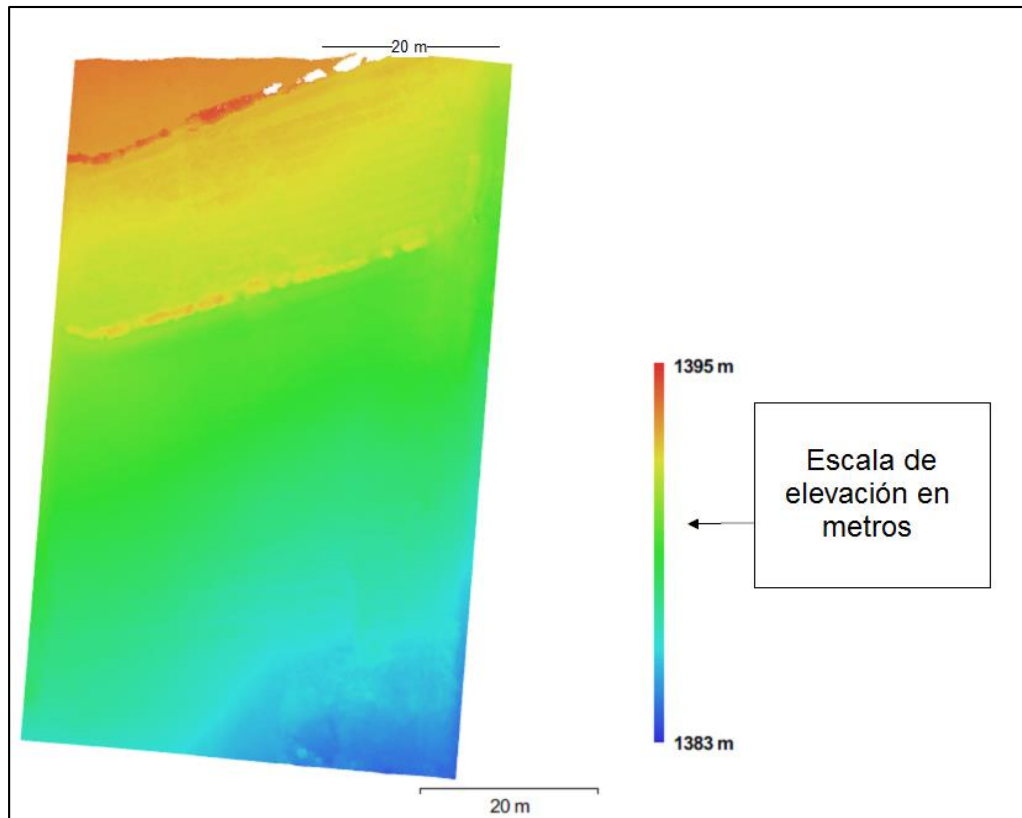


Figura 4.27 Modelo de elevación digital final.

El modelo de elevación digital generado presenta una resolución espacial de 2,56 cm/pix cumpliendo uno de los requerimientos del proyecto, se puede apreciar las diferencias de alturas de 1383 m y 1395 m.

La figura 4.28 muestra en detalle los resultados de la incorporación de los puntos de control, obteniendo un error total de aproximadamente 1,2 mm, revisando el número de proyecciones de los marcadores, se observa que el punto de control 1 solo aparece en 4 fotografías, contrastando con los demás marcadores que aparecen más de 10 veces. El quinto punto de control presenta mayor error en pixeles, esto puede ser debido a la poca resolución del marcador en la fotografía y su establecimiento en las 19 proyecciones no es la misma.

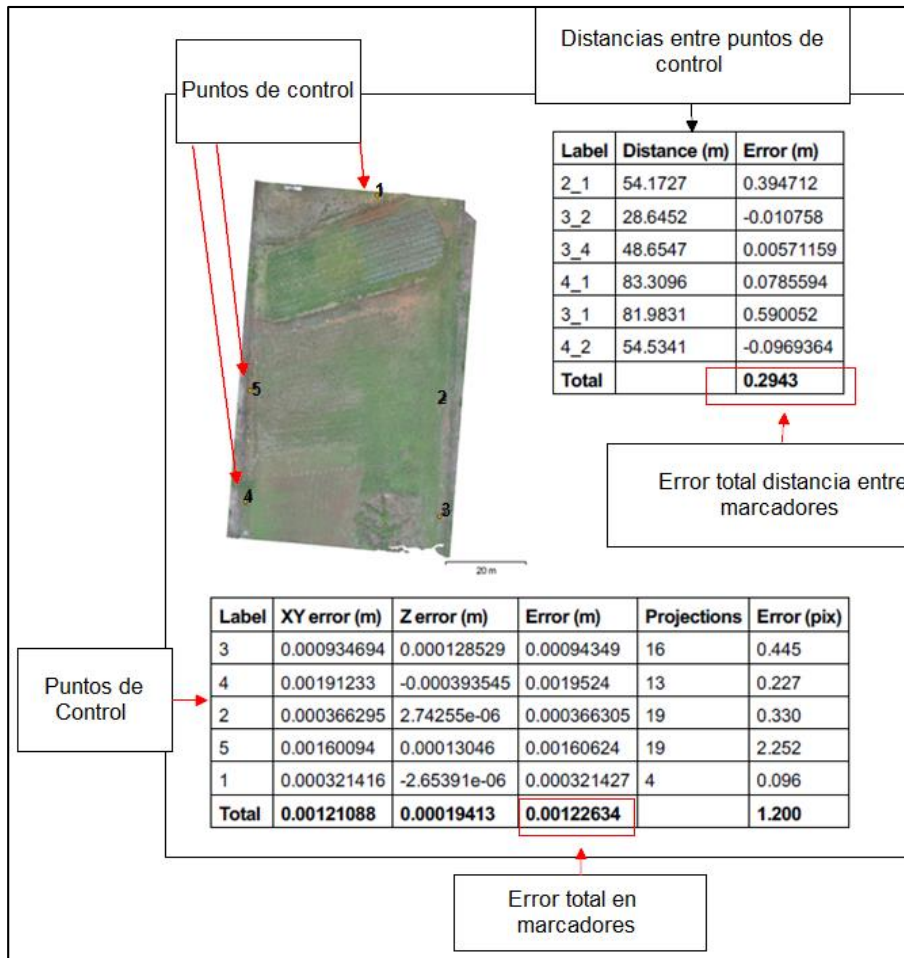


Figura 4.28 Informe de puntos de control.

Con los modelos generados se realizó el proceso de medición de área del modelo 3D, en la figura 4.29 se muestra un área de 4442.04 m², comparando con el resultado brindado por Mission Planner de 4301 m² existe una diferencia de 141 metros cuadrados.

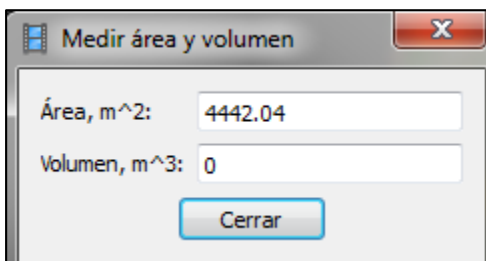


Figura 4.29 Medición de área y volumen.

Según lo mostrado en la figura 4.29 el volumen fue de 0 m³, esto se debió a que el software Agisoft PhotoScan solo puede realizar cálculos de volúmenes en un modelo que se encuentre en su totalidad cerrado o reconstruido a partir de fotografías. Por lo tanto, fue necesario realizar un cierre de “*huecos*” o secciones del modelo donde no hay una cantidad suficiente de puntos debido a la falta de imágenes traslapadas.

Se efectuó el cierre de huecos en el proceso del mallado y realizó las mediciones nuevamente. Los resultados se muestran en la figura 4.30, el área cubierta es de 7333,38 m² y un volumen de 570.809 m³, contrastando con los datos anteriores de área.

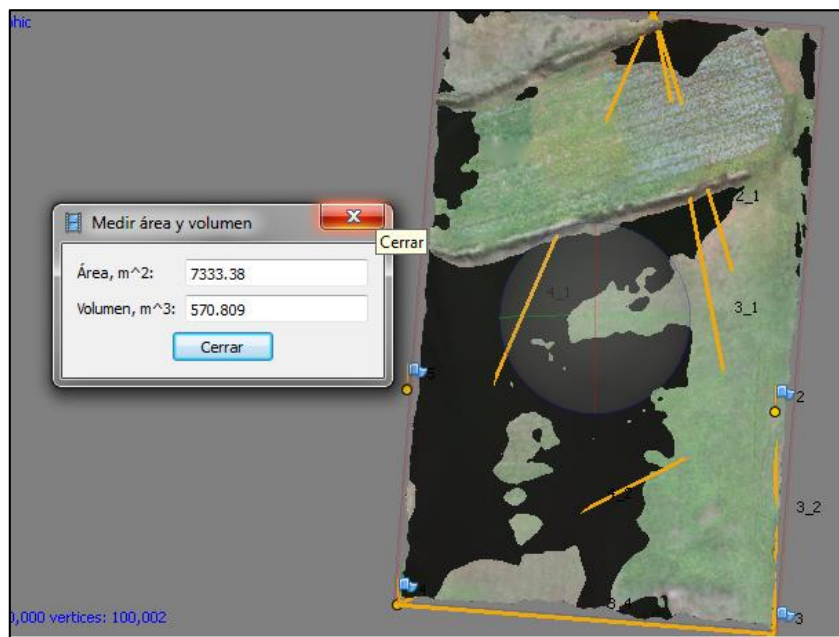


Figura 4.30 Medición de Volumen y área en modelo cerrado.

El modelo presentó gran cantidad de partes negras en la reconstrucción, esos lugares en específicos fue donde el software cerró los huecos del modelo 3D, por lo que se recomienda tener mayor cantidad de imágenes traslapadas en esas áreas y generar el modelo en todos los sub procesos con una precisión más alta, por lo que se requerirá la realización de misiones a futuro para poder contrastar estos resultados.

Generado el reporte, se utilizaron 218 fotografías de 242, con 5 puntos de control y 6 distancias entre ellos, se utilizó una alineación de fotografías con una precisión alta. En la tabla 4.7 se describen ciertos resultados importantes del procesamiento del modelo 3D.

Tabla 4.7 Resultado con correcciones del procesamiento, segundo vuelo.

Parámetro	Resultado
Área cubierta	4442.04 m ²
Cantidad de imágenes utilizadas	218 de 242
Altura de vuelo	12,9 m
Distancia focal de la cámara	3 mm
Errores en puntos de control (xy,z)	(0.086 , 0.014) m
Errores de distancia entre puntos de control	29,43 cm
Resolución del modelo de elevación	2.55 cm/pix
Densidad de puntos del modelo de elevación	1538.49 puntos/m ²

Analizando los resultados de las correcciones del procesamiento, se obtuvo una nueva resolución de 2,55 cm/pix, contrastando con su valor teórico de 1,01 cm/pix. el error experimental es de 1,57 y se mejoró en más de 5 mil veces el resultado con respecto a los primeros resultados del segundo vuelo.

La nube escasa está constituida por 282,272 puntos, por cada punto en la nube hay un traslape efectivo de 2,71 fotos, la nube densa en calidad media está compuesta por 11,126,085 puntos.

La altura de vuelo calculada en el procesamiento es 12,9 m, existiendo una diferencia de 4.1 metros respecto a la altura de vuelo real, dando un error experimental de 0.24.

En la tabla 4.8 se muestran los tiempos de procesamiento de las diferentes etapas en la generación del modelo 3D a partir de las correcciones del segundo vuelo.

Tabla 4.8 Tiempos de procesamiento correcciones segundo vuelo.

Parámetro	Tiempo (min: ss)	Porcentual %
Nube dispersa de puntos ,calidad alta	38:50	46,52
Nube densa de puntos, calidad media	39:09	46,90
Modelo, calidad media	5:30	6,58
Tiempo total	83:29	100

Se obtuvo un tiempo de procesamiento total de 83 minutos con 29 segundos, contrastando con el resultado del segundo vuelo donde se obtuvo un tiempo total de 99 minutos con 19 segundos, lo cual establece una diferencia de 15 minutos con 50 segundos entre la corrección del modelo y el resultado del segundo vuelo de procesamiento. La nube densa de puntos representó el 46,9 % del tiempo de procesamiento.

5 Capítulo 5: Conclusiones

5.1 Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo permitió la generación de modelos digitales de elevación y 3D mediante el empleo de una correcta planificación de vuelo, orientación espacial y puntos georreferenciados, aportando reportes técnicos al investigador para la evaluación de parcelas de escorrentía de bajo porte.

Se evidenció que la plataforma de software comercial AgiSoft PhotoScan ofrece muchas funcionalidades, su motor de procesamiento gráfico configurable permite reducir los tiempos de procesamiento estableciendo la calidad de reconstrucción, lo cual lo hace bastante robusto, en comparación a otras soluciones comerciales a un costo económico razonable.

Mediante el desarrollo de un script en Python, se logró llevar a cabo el control de flujo en la ejecución de procesamiento de imágenes, debido a esto el software AgiSoft PhotoScan ofrece un factor de escalabilidad importante para la investigación.

A partir de un conjunto de imágenes georreferenciadas con una resolución de hasta 7 Megapixels y puntos de control se generó un modelo 3D y un modelo de elevación digital en la plataforma de software Agisoft PhotoScan. Diferentes escenarios y casos fueron evaluados durante la ejecución de este proyecto.

La metodología para la construcción de modelos de elevación digital y 3D, generó una resolución espacial en el mejor de los casos de 2,55 cm/pixel empleando al menos 5 puntos de control en tierra, a partir de una cámara fotográfica marca GoPro modelo Hero4 con un lente de 3 mm.

Con un computador marca Asus, modelo U31S, con características de hardware de 8GB de RAM, procesador Intel Core i3-2330M, 2.20 GHz y tarjeta Nvidia GT520 con memoria dedica de 1GB se obtuvo un tiempo de procesamiento 83 minutos con 29 segundos. Se evidencia que la configuración de hardware de una estación de trabajo es de suma importancia si desea mejorar el tiempo de procesamiento

Se reconstruyó a partir de imágenes con pérdidas en formato *JPG* un modelo de 3D y un modelo de elevación con resultados de precisión aceptables en el desarrollo del proyecto.

5.2 Recomendaciones

Una vez realizada la construcción del modelo 3D y el modelo de elevación digital, se presentan las siguientes recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros con la plataforma de software seleccionada

Se recomienda utilizar una cámara para el proceso de fotogrametría que permita flexibilidad en los ajustes de configuración, obturación remota, por ejemplo a través de infrarojo, un lente entre los 16 mm y 55 mm y capacidad de almacenamiento imagen libre de pérdidas

Es necesario contar con un sistema de sincronización de obturación y almacenamiento de información georreferenciada, lo que elevaría potencialmente la precisión de los levantamientos.

Se recomienda además mejorar la visualización de los marcadores en tierra y puntos de control para su fácil identificación en fotografías, realizando impresiones de marcadores más grandes. Los puntos más lejanos de control encierren un área que forme un polígono irregular convexo en la tierra para ubicar así un centroide que podría mejorar una reconstrucción en 3D.

Es importante colocar el plano tierra o el plano de referencia paralelo al área de trabajo para la correcta construcción del modelo. Además, a la hora de agregar los puntos de control en tierra, seleccionar el sistema de coordenadas con el cual fueron tomados, El software de procesamiento soporta el sistema de coordenadas empleado en Costa Rica, llamado CRTM05/CR05.

Cuando se realiza el proceso de optimización de la cámara, las fotografías en el área de trabajo no deben de estar seleccionadas y solo se utilizarán los marcadores seleccionados, debido a que las imágenes presentan una menor precisión debido al GPS comercial que inducen a errores en el procesamiento de orientación de imágenes.

6 Referencias

- [1] (2016). *Acuerdo sobre la agricultura de la OMC, la experiencia de sujecución*. Available: <http://www.fao.org/docrep/007/y4632s/y4632s0g.htm#bm016>.
- [2] J. Gaitán, "Evaluación de erosión hídrica en suelos bajo cobertura forestal y agrícola, en la Cuenca del Río Reventazón, Costa Rica. Lic dissertation, Instituto Tecnológico de Costa Rica," 2013.
- [3] L. Neder, J. Busnelli and M. Sampietro, "Incremento de Erosión y Suelos degradados por acciones antropogenicas y variaciones climáticas, Tucuman. Revista de la Asociación Geológica Argentina." pp. 499 - 504., 2010.
- [4] G. Sánchez, "Evaluación de Sistema de Sacos de Geotextil en Condiciones Simuladas: Implicaciones en Control de Erosión. Lic dissertation, Universidad de Costa Rica," 2012.
- [5] C. A. Salas, "Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campaña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica." 2011.
- [6] J. R. AVILA, "MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA EROSIÓN EN PIÑA, *Ananas comosus* (L.) (Farinosae:Bromeliaceae), CULTIVADA USANDO ACOLCHADO PLÁSTICO, EN EL CANTÓN DE GUÁCIMO, ZONA CARIBE DE COSTA RICA." Guácimo, Costa Rica Diciembre, 2006, 2006.
- [7] C.F.Morales, "*Manual Evaluaciones en la Parcela de Escorrentía y Erosion*".Lima:1996.
- [8] N.W.Hudson, "*Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía*", Roma: FAO, 1997. [Online]. Available <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s05.htm#capítulo 3 parcelas de campo>

- [9] R. Graham and A. Koh. Digital aerial survey - theory and practice. Available: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDASTP005/digital-aerial-survey/digital-aerial-survey>.
- [10] D. Giordan, A. Manconi, D. D. Tannant and P. Allasia. UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides. Presented at Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International. 2015. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7327042.
- [11] C. A. Ezequiel, M. Cua, N. Libatique, G. Tangonan, R. Alampay, R. Labuguen, C. Favila, J. L. Honrado, V. Caños, C. Devaney, A. Loreto, J. Bacusmo and Benny Palma, "UAV Aerial Imaging Applications for Post-Disaster Assessment, Environmental Management and Infrastructure Development," *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, May 27-30, 2014. Orlando, FL, USA.
- [12] S. Arriola, "Diseño de un Sistema de Adquisición de Datos para un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)," Junio 2015.
- [13] I. Colomina and P. Molina. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92pp. 79-97. 2014. . DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [14] Uysal, A. S. Toprak and N. Polat. DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in sahitler hill. *Measurement* 73pp. 539-543. 2015. . DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>.
- [15] H. Eisenbeiß, ""UAV Photogrammetry" , Ph.D dissertation," Zurich 2009.
- [16] (2016 Marzo). *Installing Mission Planner* [Mission Planner]. Available: <http://planner.ardupilot.com/wiki/common-install-mission-planner/>.
- [17] (2016, Marzo). *Mission Planner - Inicio* [Mission Planner]. Available: <http://planner.ardupilot.com/>.

- [18] J. J. Ruiz, "GENERACIÓN DE MAPAS 3D A PARTIR DE IMÁGENES AÉREAS, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla," Julio 2013.
- [19] K. Kraus. Photogrammetry - geometry from images and laser scans (2nd edition). Available: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPGILSSE2/photogrammetry-geometry/photogrammetry-geometry>
- [20] T. Luhmann, S. Robson and S. Kyle. *Close Range Photogrammetry : Principles, Techniques and Applications* 2006.
- [21] P. Wolf and C. Ghilani, *Topografía*. México: Alfaomega grupo Editor S.A de C.V, 2010
- [22] Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas, pecuarias y del medio ambiente. Fotointerpretación y mapificación. *Lección 11: Clasificación de fotografías aéreas*. (2010). Available: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201722/FOTOINTERPRETACION_eXe_2011/leccion_11_clasificacin_de_fotografias_areas.html.
- [23] Sony, *Cámara Digital De Lentes Intercambiales, Guía Práctica Acerca De La Nex 5t*. Sony Corporation, 2013.
- [24] J. Fernández-Boza. El equipamiento para la fotografía digital. *Rev Esp Ortod* 35pp. 75-84. 2005.]
- [25] X.Li, L.Yang, "Design and Implementation of UAV Intelligent Aerial Photography System", in *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Aug 2012, pp. 200-203.
- [26] (2016, Marzo). *Getting GCPs on the field or through other sources (optional but recommended)* [Pix4D]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489#gsc.tab=0>.

- [27] (March 23, 2016). *Ground Sampling Distance (GSD)*. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809#gsc.tab=0>.
- [28] (2016, Marzo) GSD Calculator. [Online] Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>
- [29] Designing the image acquisition plan. computing the image rate for a given frontal overlap. (March 23, 2016 11:25). Retrieved from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557479#gsc.tab=0>
- [30] (2016, Marzo) *Designing the Image Acquisition Plan*. [Online]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557479-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-c-Computing-the-Image-Rate-for-a-given-Frontal-Overlap#gsc.tab=0>
- [31] (2016, Junio) Modelos digitales de elevación. [Online]. Available <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- [32] D. Lowe (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. Computer Science Department, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada.
- [33] K. Mitra and R. Chellappa. A scalable projective bundle adjustment algorithm using the L infinity norm. Presented at Computer Vision, Graphics & Image Processing, 2008. ICVGIP '08. Sixth Indian Conference on. 2008, . DOI: 10.1109/ICVGIP.2008.51.
- [34] R. Klette, *Concise Computer Vision an Introduction into Theory and Algorithms*. Springer London Heidelberg New York Dordrecht: Springer, 2014.
- [35] S. Adducam, S. Malik and P. Tian, *Building Intelligent Systems, Utilizing Computer Vision, Data Mining and Machine Learning*. Intel Press, 2013.
- [36] K. Ambrosch and W. Kubinger. Accurate hardware-based stereo vision. *Comput. Vision Image Understanding* 114(11), pp. 1303-1316. 2010. . DOI: <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2078/10.1016/j.cviu.2010.07.008>.

- [37] D. Martín, R. Requero and J. A. Rodríguez, "*Sistema de visión estereoscópica para navegación autónoma de vehículos no tripulados*. Universidad Complutense de Madrid." 2010.
- [38] Ja Seong Ku, Kyoung Mu Lee and Sang Uk Lee. Multi-image matching for a general motion stereo camera model. Presented at Image Processing, 1998. ICIP 98. Proceedings. 1998 International Conference On. 1998, . DOI: 10.1109/ICIP.1998.723543.
- [39] J. Heikkila and O. Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. Presented at Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference On. 1997, . DOI: 10.1109/CVPR.1997.609468.
- [40] C. Ricolfe-Viala and A. Sánchez-Salmerón. Using the camera pin-hole model restrictions to calibrate the lens distortion model. *Optics & Laser Technology* 43(6), pp. 996-1005. 2011. . DOI: <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2078/10.1016/j.optlastec.2011.01.006>.
- [41] (2016, Marzo) Prepare the Pattern, Camera, and Images. [Online]. Available <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>
- [42] *Camera Calibrator Overview Matlab R2016a* (2016 Marzo). Available: <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- [43] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11), pp. 1330-1334. 2000. . DOI: 10.1109/34.888718.
- [44] *What's the difference between pitch, roll, yaw*. (Jun 12, 2014). Available: <http://machinedesign.com/engineering-essentials/what-s-difference-between-pitch-roll-and-yaw>.
- [45] P. Alvarado, *Notas De Clase: Procesamiento Y Análisis De Imágenes Digitales*, Instituto Tecnológico De Costa Rica, Escuela De Ingeniería Electrónica, CE 5201. Cartago: 2012.

- [46] P. M. Cabezos Bernal and J. J. Cisneros Vivó. FOTOGRAMETRÍA CON CÁMARAS DIGITALES CONVENCIONALES Y SOFTWARE LIBRE. (spanish). *Revista De EGA* (20), pp. 88-99. 2012. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=82723403&lang=es&site=e=ehost-live>.
- [47] J. A. Calleja, Durante José L and J. Trabedela, *Fotografía Digital, Medios Audiovisuales, Colección Aula Mentor*. Gobierno de España, Ministerios de Educación, cultura y deporte.
- [48] (2015). *Pix4Dmapper Pro, Feature list* [Pix4d feature list]. Available: <https://www.pix4d.com/wp-content/uploads/2016/01/Pix4Dmapper-Pro-V2.0-Feature-List.pdf>
- [49] (2015). *PhotoScan Fully automated professional photogrammetric kit* [photogrammetric kit]. Available: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf.
- [50] (2016). *IMAGINE Photogrammetry*. [Online]. Available: <http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/observe-photogrammetry>.
- [51] (2016). *Productos Photomodeler*. [Online]. Available: <http://photomodeler.com/products/scanner/default.html>.
- [52] (2016). *VisualSFM : A Visual Structure from Motion System*. [Online]. Available: <http://ccwu.me/vsfm/index.html>.
- [53] (2016). *Point Cloud Library About*. [Online]. Available: <http://pointclouds.org/about/>.
- [54] (2015). *OpenCV Developers Team about*. [Online]. Available: <http://opencv.org/about.html>.
- [55] (11 mayo 2016). *Dirección General de Aviación Civil de Costa Rica , aeronaves no tripuladas, limitaciones de operación*. [Online]. Available: <http://www.dgac.go.cr/Aeronaves%20no%20Tripuladas/principal.html>.

- [56] L.Brenes, *Manual para la generación de modelos de elevación*, Mayo 2016.
- [57] (2016). *Pix4Dmapper Pro Store* [Pix4Dmapper Pro]. [Online]. Available: <https://mapper.pix4d.com/store/>.
- [58] (2016). *System Requirements: Minimum and Recommended Hardware and Software Specifications Pix4D*. [Online]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557289-System-Requirements-Minimum-and-Recommended-Hardware-and-Software-Specifications#gsc.tab=0>.
- [59] (2016). *Agisoft Online Store* [Agisoft PhotoScan]. [Online]. Available: <http://www.agisoft.com/buy/online-store/>.
- [60] (2016). *Downloads System Requirements* [Agisoft Photoscan]. [Online]. Available: <http://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>.
- [61] (2015). *Power Portfolio 2015 System Requirements* [Hexagon Geospatial Power Portafolio]. [Online]. Available: <http://www.hexagongeospatial.com/technical-documents/power-portfolio-2015-system-requirements>.
- [62] (2016). *Photomodeler Store* [Photomodeler]. [Online]. Available: <http://photomodeler.com/store/index.php>.
- [63] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning Open CV, Computer Vision with OpenCV Library*. Printed in the United States of America.: O'Reilly.
- [64] (2016, Marzo). *Hero 4 Silver, especificaciones, resoluciones de fotos*. Available: <https://es.shop.gopro.com/International/hero4/hero4-silver/CHDHY-401.html>.
- [65] (2016, Marzo). *Elección de un formato de archivo* [Photoshop, formato de archivos]. Available: <https://helpx.adobe.com/es/photoshop/using/file-formats.html>.
- [66](2016, Marzo 18). *UFRaw (Unidentified Flying Raw)* [UFRaw plugin]. Available: <http://ufraw.sourceforge.net/>.

[67] (2016, Marzo). *Image Data converter Ver 4* [Sony Image Data Converter]. Available: <http://support.d-imaging.sony.co.jp/imsoft/Win/idc/us.html>

[68] (2016, Marzo). *Real time kinematics. European Space Agency* [RTK]. [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/Real_Time_Kinematics

[69] *Tutorial (Intermediate level): Coded Targets & Scale Bars in Agisoft PhotoScan Pro 1.0.0* [Agisoft PhotoScan]. [Online]. Available: [http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.0.0_Tutorial%20\(IL\)%20%20Coded%20Targes%20and%20Scale%20Bars.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.0.0_Tutorial%20(IL)%20%20Coded%20Targes%20and%20Scale%20Bars.pdf)

Apéndices

A. Selección de software para fotogrametría

- **Pix4D**

La tabla A.1 muestra las características de la etapa de procesamiento, que lleva a cabo el software Pix4D.

Tabla A. 1 Características de procesamiento Pix4D [48].

Características	Descripción
Procesamiento	Imágenes aéreas y terrestres. Opción de multi-cámara para un mismo proyecto. Capacidad de mostrar resultados en baja resolución en minutos. Reportes de calidad. Importación de puntos de control. Calibración de la cámara (longitud focal, puntos principales, distorsión de lente). Procesamiento con o sin conocimiento de la posición de la cámara y orientación externa. Orientación de cámara. Creación de nube densa de puntos. Opción de edición de nube de puntos. Corrección de brillo y color Procesamiento de solo ciertas partes de un proyecto. Animaciones de vuelo. Soporte para uso de unidad de procesamiento gráfico.

El software de fotogrametría Pix4D, vende diferentes licencias para su uso comercial o educativo, en la tabla A.2 se detallan los precios y licencias que ofrecen. Presenta la opción de descarga gratuita por 10 días de prueba (versión demo).

Tabla A. 2 Precios de licencia Pix4D [57].

Software	Precio
Pix4Dmapper para Universidad, investigación con propósitos no comerciales	\$1990
Licencia Educativa para clases.	\$ 6700
Licencia No comercial.	\$ 4990
Licencia Pix4mapper 1 mes	\$ 350
Licencia Pix4mapper 1 año	\$ 3500
Licencia 1-time Charge	\$8700

Pix4D requiere de ciertas configuraciones de hardware mínimas para poder ser ejecutado y tener el rendimiento para lo que fue desarrollado, en la tabla A.3 se especifican dichas configuraciones.

Tabla A. 3 Especificaciones mínimas de hardware para Pix4D [58].

Especificaciones de Hardware	
Sistema Operativo	Windows, 7,8, 10, Server 2008, 2012 64 bits.
CPU	Intel i5 / i7 / Xeon
GPU	Compatible con OpenGL, Nvidia o AMD
Memoria RAM	4 GB
Disco Duro	10 GB espacio libre

- **Agisoft PhotoScan**

A continuación, se muestra una tabla A.4 con diferentes características y capacidades de procesamiento del software.

Tabla A. 4 Características de procesamiento Agisoft PhotoScan [49].

Características	Descripción
	Triangulación aérea y de corto alcance. Generación y clasificación de nubes densas de puntos.

Procesamiento	<p>Ortomosaicos y generación de DSM y DTM.</p> <p>Edición de línea de costura de ortomosaicos.</p> <p>Generación de curvas de nivel.</p> <p>Georreferenciación utilizando puntos de control y registro de vuelo.</p> <p>Mediciones de distancia, área, volumen.</p> <p>Procesamiento de imágenes multiespectrales y cálculo de índice de vegetación.</p> <p>Reconstrucción 4D para escenas dinámicas.</p> <p>Composición panorámica esférica.</p> <p>Lenguaje de Python para automatización (scripting).</p> <p>Procesamiento de imágenes con lente de ojo de pez, cámaras esféricas y de cuadro.</p> <p>Soporte del sistema de coordenadas EPSG.</p>
----------------------	---

El programa puede ser adquirido por medio de las licencias presentadas en la tabla A.5. El software puede ser utilizado en su versión profesional por un periodo de prueba de 30 días

Tabla A. 5 Precios de licencia Agisoft PhotoScan [59].

Software	Precio
Agisoft PhotoScan Professional Edition, Licencia Stand-Alone	\$ 3499
Agisoft PhotoScan Standard Edition, Licencia Stand-Alone	\$179
Agisoft PhotoScan Professional Edition, Licencia Educativa	\$ 549
Agisoft PhotoScan Standard Edition, Licencia Educativa	\$59

La tabla A.6 muestra las recomendaciones mínimas de hardware para la correcta ejecución y desempeño de PhotoScan.

Tabla A. 6 Especificaciones mínimas de hardware para Agisoft PhotoScan [60].

Especificaciones de Hardware	
Sistema Operativo	Windows Xp, Mac OS X Snow, Debian Ubuntu
CPU	Intel Core 2 Duo
GPU	Nvidia GeForce serie 8xxx o ATI Radeon HD serie 5xxx
Memoria RAM	2 GB
Disco Duro	272 MB software

- **Erdas Imagine**

En la tabla A.7, se muestra una tabla con diferentes características y capacidades de procesamiento del software.

Tabla A. 7 Características procesamiento Erdas Imagine [50].

Características	Descripción
Procesamiento	<p>Análisis de imágenes.</p> <p>Soporta cámaras multi espectrales, radar, sistemas LiDAR.</p> <p>Procesamiento distribuido.</p> <p>Preparación del terreno y generación de mosaico.</p> <p>Capacidad de convertir imágenes a diferentes formatos.</p> <p>Balance de colores y compresión.</p> <p>Categorización de terreno.</p> <p>Creación, edición y análisis de terrenos.</p> <p>Nube de puntos, visualización 2D y 3D.</p> <p>Creación de ortomosaicos.</p> <p>Interpolación de superficies.</p> <p>Permite convertir imágenes Raster a Vectoriales.</p> <p>Edición de puntos de control.</p> <p>Reporte de errores.</p> <p>Integración con google Earth.</p>

En la tabla A.8 se despliega información relacionada a los precios de licencias. Para utilizar la versión de prueba se debe de solicitar una licencia de evaluación con el agente de ventas.

Tabla A. 8 Precios de licencia Erdas Imagine [50].

Software	Precios
5 Licencias Educativa (25 licencias estudiantes y profesores por cada educativa) *aplican restricciones	\$1500 valor anual
15 Licencias Educativas (25 licencias estudiantes y profesores por cada educativa) *aplican restricciones	\$ 3500 valor anual

La tabla A.9 muestra los requisitos mínimos de hardware para el desempeño del software Erdas Imagine.

Tabla A. 9 Especificaciones mínimas de hardware para Erdas Imagine[61].

Especificaciones de Hardware	
Sistema Operativo	Windows 7 SP1, Server 2008, Server 2012
CPU	Intel Pentium 4 HT, Core Duo, AMD 64
GPU	Nvidia Quadro , AMD ATI FirePRO
Memoria RAM	4 GB, 8 GB (sistemas de 64 bits)
Disco Duro	11 GB

- **Photomodeler**

En la tabla A.10, se muestra las diferentes características y capacidades de procesamiento del software.

Tabla A. 10 Características de procesamiento PhotoModeler [51].

Características	Descripción
Procesamiento	Modelos de alta precisión en 3D. Medición en fotografías. Edición de modelos en CAD. Modelos con puntos, líneas, bordes, superficies. Proyectos automáticos. Detección de marcadores. Modelos de superficies de alta densidad. Comparación de estructuras a través del tiempo. Puede trabajar con fotos en tierra, aéreas. Generación de modelos de elevación. Generación de ortofotos.

La tabla A.11 muestra el costo de la licencia del software. El software puede ser descargado con una licencia de prueba de 10 días junto con los tutoriales y ejemplo de proyectos básicos.

Tabla A. 11 Precio de licencia Photomodeler Scanner[62].

Software	Precio
Licencia única, soporte 1 año	\$2 490

En la tabla A.12 se especifica los requisitos mínimos de hardware para el software Photomodeler Scanner.

Tabla A. 12 Especificaciones mínimas de hardware para Photomodeler Scanner[63].

Especificaciones de Hardware	
Sistema Operativo	Windows Vista (32 y 64 bit)
CPU	2 Ghz procesador
GPU	No especifica
Memoria RAM	8 GB
Disco Duro	400 MB

Entre las opciones de software libre u open source, se presenta la opción de VisualSFM para la generación de nube de puntos, la tabla A.13 desglosa las especificaciones mínimas de hardware para su funcionamiento.

Tabla A. 13 Especificaciones mínimas de hardware VisualSFM [52].

Especificaciones de Hardware	
Sistema Operativo	Windows (32 y 64 bits), Linux (32 y 64 bits), Mac OSX (32 y 64 bits)
CPU	Intel Pentium 4 HT, Core Duo, AMD 64
GPU	Nvidia CUDA, ATI, Intel ,1GB
Memoria RAM	No especifica
Disco Duro	No especifica

Point Cloud Library brinda la opción de utilizar código abierto para el procesamiento y generación de nube de puntos y mapas 3D, la tabla A.14 muestra los diferentes sistemas operativos capaces de ejecutar el Point Cloud Library.

Tabla A. 14 Sistemas operativos con capacidad de ejecutar Point Cloud Library [53].

Sistemas Operativos	
Windows	2008 (32 y 64 bits), 2010 (32 y 64 bits)
Linux	Ubuntu, Debian, Fedora, Gentoo, Arch Linux
Mac	OS X

La biblioteca de visión por computador de código abierto OpenCV permite el procesamiento de imágenes para diferentes aplicaciones, en la tabla A.15 muestra los sistemas operativos y las arquitecturas de computadoras donde se ha utilizado.

Tabla A. 15 Sistemas operativos y arquitectura de hardware probados para OpenCV [63].

	IA32	EM64T	IA64
Windows	Si	Si	Si (reporta fallos)
Linux	Si	Si	Si
Mac OSX	Si	No se ha probado	N/A

A continuación, se presentan tablas comparativas entre las diferentes soluciones comerciales. En la Tabla A.16 se resumen todos los precios de licencias de software comerciales para fotogrametría,

Tabla A. 16 Precios de Software para fotogrametría.

Precios de Licencia				
Lista de Programas fotogrametría	Educativa estándar	Educativa Profesional	Estándar Stand Alone	Profesional Stand Alone
<i>Agisoft PhotoScan</i>	\$59,00	\$549,00	\$179,00	\$3.499,00
<i>PIX4D</i>	\$1.990,00	\$6.700,00	\$4.990,00	\$8.700,00
<i>ERDAS Imagine</i>	\$1.500,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
<i>PhotoModeler Scanner</i>	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$2.495,00

En la figura A. 1 se observa en un gráfico de barras los precios de las cuatro soluciones comerciales presentadas para fotogrametría.

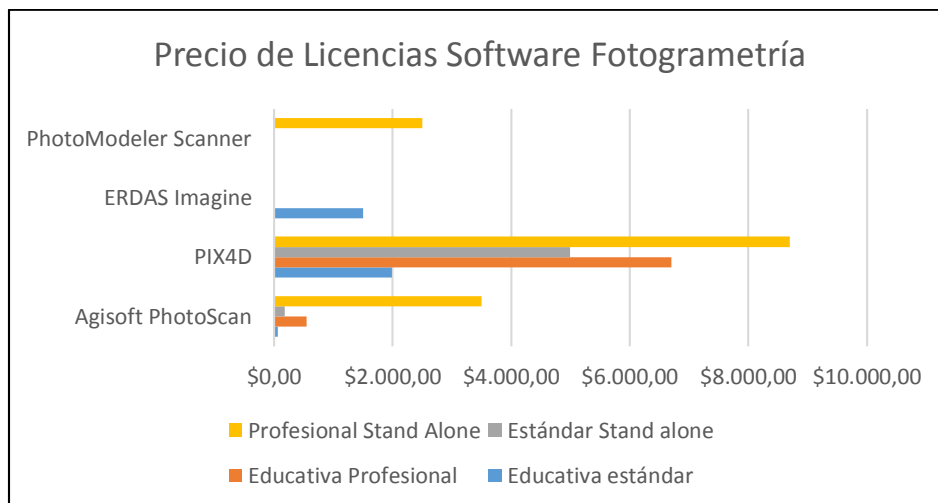


Figura A. 1 Precio de Licencia de software de fotogrametría.

La tabla A.17 muestra un resumen de las características de hardware de las cuatro diferentes soluciones comerciales propuestas para el desarrollo de mapas 3D.

Tabla A. 17 Requisitos de hardware de software comercial.

	Procesador	Memoria RAM	Espacio en Disco	Soporta GPU
Agisoft PhotoScan	Intel Core 2 Duo/ equivalente	2 GB	x	Si
PIX4D	Intel i5/ i7 /Xeon	4 GB	10 GB HDD	Si
ERDAS Imagine	Intel Pentium 4 HT	4 GB	12 GB HDD	Si
PhotoModeler Scanner	2 GHz	8 GB	400 MB	X

* x = no especifica.

La tabla A.18 muestra los sistemas operativos soportados por las cuatro soluciones de software propuestas para el desarrollo de imágenes 3D.

Tabla A. 18 Sistemas operativos soportados por software comercial.

	Windows	Linux	Mac OSX
Agisoft PhotoScan	si	si	si
PIX4D	si	no	no
ERDAS Imagine	si	no	no
PhotoModeler Scanner	si	no	no

B. Selección de cámara

La cámara fotográfica debe de cumplir con ciertos requisitos, entre ellos tamaño, peso, resolución, formatos de almacenamiento, capacidad de ser controlada a control remoto. En la Tabla B.1, se muestran las diferentes características de las cámaras con las que se cuenta para el sistema UAV.

Tabla B. 1 Especificaciones de cámara.

Fabricante y modelo	Sensor de Imagen	Tamaño (mm ²)	Resolución (MPx)	Velocidad (s-1)	Peso (Kg)	Dimensiones (mm)	Precio \$
Sony Nex 5T	CMOS	23,5 mm X 15,6 mm	16.1	4000 (fp)	0.276	110,8 mm x 58,8mm x 38,9mm (An/Al/Pr)	549,99
Gopro Hero 4 Silver	CMOS	5,37 mm X 4,04mm	12	--	0,084	59.0mm x41,0 mm, 29,6 mm	399.99

Las resoluciones de la cámara, así como los ángulos utilizados de la lente Gopro Hero 4 Silver se muestran en la Tabla B.2.

Tabla B. 2 Resolución de Cámara Gopro Hero 4 Silver [64].

Resolución de fotos	Campo de Visión	Tamaño de la imagen
12 MP Gran angular	Campo de visión más amplio. Es adecuada para tomas en movimiento donde desea captar lo más posible dentro del cuadro	4000 x 3000 pixels
7 MP Gran angular		3000 x 2250 pixels
7 MP Medio	Campo de visión de alcance medio	3000 x 2250 pixels
5 MP Medio	Campo de visión de alcance medio	2560 x 1920 pixels

La cámara fotográfica Sony Nex 5t trae un objetivo de E16-50 mm, posee un sistema de enfoque automático, detección de contraste y rango de sensibilidad EV0 a EV20, para imágenes fijas el rango ISO es de 100 a 25 600 y para video ISO 100-6400, imágenes fijas a una velocidad de 1/4000 de segundo.

Con los datos mencionados anteriormente se monta la Tabla B.4 para seleccionar la cámara. Se coteja de la siguiente manera: bueno (3), regular (2), malo (1).

Tabla B. 4 Selección de cámara.

Características	Sony Nex 5t	Gopro Hero 4 Silver
Resolución	Bueno (3)	Regular (2)
Precio	Bueno (3)	Regular (2)
Flexibilidad	Bueno (3)	malo (1)
Funcionalidad	Bueno (3)	malo (1)
Ponderado	12	6

Según las características de ambas cámaras, la resolución de la sony es de 16 MPix y gopro de 12 MPix, el precio de la opción 1 es aproximadamente \$150 más cara que la opción 2. Con respecto a la flexibilidad la cámara sony tiene un a valor más alto debido a que se le pueden adaptar diferentes lentes, capacidad de ajuste en la configuración de valores ISO, exposición , velocidad de obturación , selección de formato de almacenamiento, obturación por medio de infrarrojo, la opción de la gopro silver no posee lentes intercambiables, ni obturación a distancia por medio del infrarrojo, trae por defecto un lente angular que puede inducir a errores por distorsiones radiales y tangenciales. En el caso de funcionalidad ambas cámaras pueden usarse para tomar fotografías aéreas o realizar grabaciones, pero solo la opción 1 (Sony) me permite flexibilidad y gran cantidad de opciones de ajuste, por lo que la sony nex 5t es seleccionada para realizar el proceso de fotogrametría con UAV.

C. Calibración y ajuste de cámara digital

En la figura C.1 se presenta el diagrama de flujo a seguir para realizar la calibración de la cámara utilizando Agisoft lens, en el manual de generación de modelos [56] se explica en detalle el proceso, el archivo generado en el proceso de calibración brinda la información de los coeficientes de distorsión radial y tangencial.

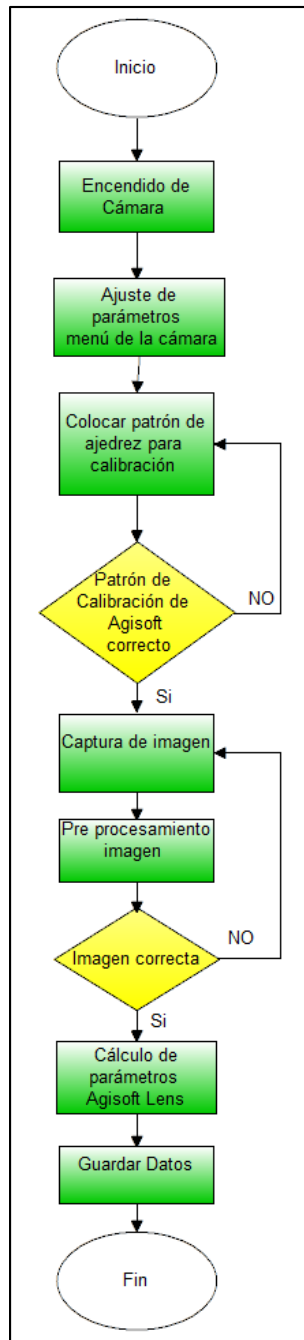


Figura C.1 Diagrama de flujo calibración de cámara

En la figura C.2 se presenta el diagrama de flujo para realizar los ajustes en el menú de la cámara digital para realizar la captura de imágenes por medio del sistema UAV.

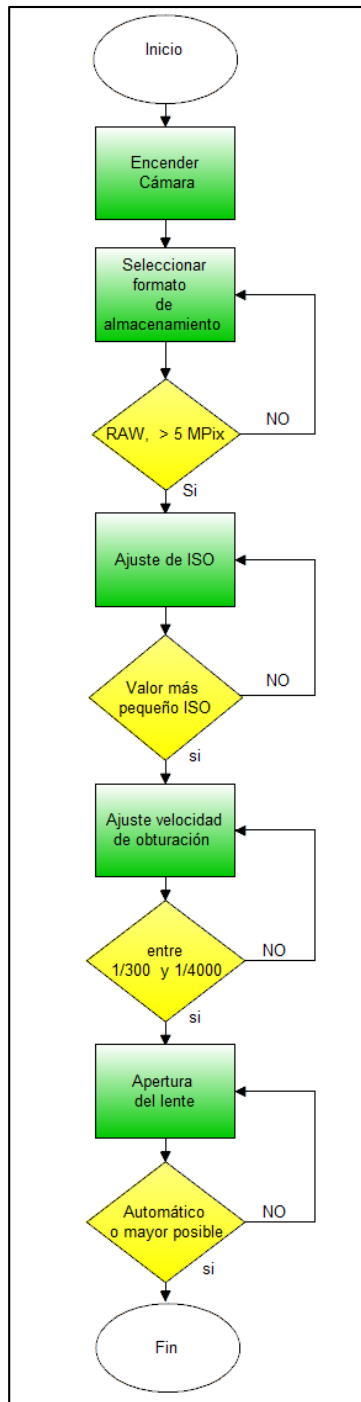


Figura C. 2 Ajustes de parámetros en el menú de la cámara digital.

La figura C.3 muestra los coeficientes de distorsión tangencial, radial, así como los valores de la anchura, alto de la imagen y distancia focal de la cámara GOPRO Hero 4 Silver, utilizada en el procesamiento de generación de mapas 3D.

Parameter	Value	Std Error
Image width	3000	
Image height	2250	
Focal length	1760.67	4.37092
Principal point (x)	-45.9389	0.417817
Principal point (y)	-42.309	0.752619
Affinity B1	13.2091	0.0522466
Skew B2	-0.605599	0.0353963
Radial K1	0.0581475	0.00182117
Radial K2	-0.0200915	0.00570951
Radial K3	0.0504088	0.0110379
Radial K4	-0.0268373	5.30125e-05
Tangential P1	0.000647965	5.89e-05
Tangential P2	-0.000102666	0.00012238

Figura C. 3 Parámetros de calibración de cámara.

D. Procesamiento de imágenes RAW

- **Adobe Photoshop**

Es un software comercial editor de imágenes producido por la empresa Adobe Systems, considerado uno de los mejores softwares de edición, utilizado por diseñadores gráficos y fotógrafos profesionales. Es capaz de manejar imágenes de 8 bits, 16 y hasta 32 bits por canal, permite almacenar archivos en diferentes formatos (Cineon, JPEG, TIFF, mapa de bits entre otros) y lectura de archivos RAW[65].

- **Gimp**

Su nombre es un acrónimo de GNU Image Manipulation Program. Permite la edición de imágenes de forma gratuita ya que es de código abierto. El programa es utilizado por diseñadores gráficos, fotógrafos, ilustradores o científicos. GIMP proporciona herramientas sofisticadas para realizar trabajos, además presenta muchas opciones de personalización gracias a plugins (complemento) de terceras partes. Soporta

manipulación de imágenes en diferentes lenguajes de programación como C, C++, Perl y Python.

GIMP por sí solo no puede manejar archivos en formato RAW, por lo que ocupa un complemento llamado UFRaw (Unidentified Flying Raw) el cual puede ser utilizado como programa individual o dentro de GIMP. UFRaw lee imágenes utilizando la herramienta de Dave Coffins para convertir archivos .URaw soporta la mayoría de marcas de cámaras comerciales: Cannon, Casio, Fuji, Kodak, Nikon, Panasonic y Sony entre otras [66].

- **Sony Image Data Converter**

Es un programa de software que permite visualizar y editar archivos de imagen en formato RAW realizadas con la Cámara digital Sony Nex 5T para almacenarlas en disco duro. El programa permite ajuste de balance de blancos, brillo, color, nitidez, la imagen final puede ser guardada en formato de archivo RAW o convertirla en archivos universales como JPEG o TIFF [67].

El programa se encuentra para las plataformas Windows y Macintosh de forma gratuita. Image data converter es compatible con los siguientes tipos de imágenes realizadas con una cámara digital de lentes intercambiables.

- Archivo JPEG
- Archivo TIFF
- Archivo RAW

E. Hoja de cálculo de distancia de muestreo y altura de vuelo

Se realizó una hoja de cálculo en Excel donde el usuario puede ingresar valores de ancho del sensor cámara, distancia focal, altura de vuelo, ancho y alto de la imagen para el cálculo de GSD o para el cálculo de la altura dado un GSD. También se calcula el tiempo de obturación para obtener un porcentaje de traslape deseado. Para esto se utilizaron las ecuaciones (2.2) a la (2.14) presentadas en el marco teórico.

Escuela de Ingeniería Electrónica		TEC Tecnológico de Costa Rica		
Escuela de Ingeniería Agrícola				
Herramienta para el cálculo de GSD y tiempos de obturación				
	Instrucciones: la siguiente herramienta realiza el calculo del GSD para una altura dada por el usuario. A. Escribir el ancho del sensor de cámara en mm B. Escribir la distancia focal en mm (*no el equivalente en 35mm) C. Escriba la altura a la cual desea realizar el vuelo en m D. Escriba el ancho de la imagen en pixeles E. Escriba el alto de la imagen en pixeles			
	Calculadora para una altura dada			
	Sw	<input type="text" value="15,6"/>	mm	ancho del sensor de la cámara
	FR	<input type="text" value="16"/>	mm	distncia focal del cámara
H	<input type="text" value="51"/>	m	Altura del vuelo	
imW	<input type="text" value="4912"/>	pixels	ancho de la imagen	
imH	<input type="text" value="3264"/>	pixels	alto de la imagen	
Resultados				
GSD	<input type="text" value="1,0123"/>	cm/pixel	Ground Sampling Distance	
DW	<input type="text" value="49,7250"/>	m	Ancho de una imagen en el suelo	
DH	<input type="text" value="33,0420"/>	m	Alto de una imagen en el suelo	
Calculadora para un GSD dado				
GSD	<input type="text" value="1"/>	cm/pixel		
Resultado	<input type="text" value="50,379487"/>	m	Altura de vuelo	

Figura E. 1 Hoja de cálculo distancia de muestreo y altura.

F. Puntos de control con RTK y marcadores

RTK es un sistema global de navegación por satélite (GNSS), que proporciona un alto rendimiento de posicionamiento. El concepto básico es reducir y eliminar los errores entre la estación base y la móvil como lo muestra la figura F.1, se observa la estación base, la estación móvil, una canal de comunicación entre ambos y un satélite. La base difunde su ubicación conocida en una portadora a una frecuencia L1 y L2 para todos los satélites y el equipo móvil determina su ubicación con respecto a la base con alta precisión solucionando problemas de fase [68].

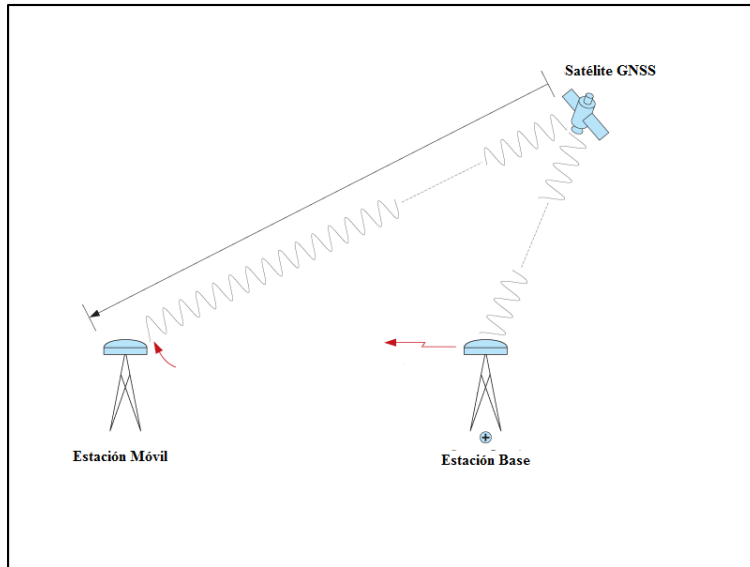


Figura F. 1 Sistema de posicionamiento con RTK, adaptada de[68].

En la figura F.2 se muestra el sistema de posicionamiento RTK de la Escuela de Ingeniería en construcción. El sistema fue utilizado para la obtención puntos de control en tierra dentro del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Figura F. 2 Sistema de posicionamiento RTK de la Escuela de Ingeniería en Construcción, TEC.

La figura F.3 muestra la utilización del sistema RTK dentro de las instalaciones del TEC, para la obtención de los puntos de control en una parcela dentro del campus de la Escuela de Ingeniería Agrícola del previo a la adquisición de imágenes por el sistema UAV.



Figura F. 3 Utilización del sistema de posicionamiento RTK.

La figura F.4 presenta los datos obtenidos por el sistema RTK tomados en el campo de agrícola, se muestra la fecha de adquisición, las precisiones o desviaciones del sistema.

ID DEL PUNTO	ÉPOCA	TIPO GNSS	X LOCAL	Y LOCAL	Q POSICIÓN	Q ALTURA	POS + Q. ALTURA
PUNTO_01	04/19/2016 10:30:19	GPS/GLONASS	509.908,68120	1.089.411,30330	0,00080	0,00080	0,00110
PUNTO_02	04/19/2016 10:39:39	GPS/GLONASS	509.924,38990	1.089.359,86110	0,00110	0,00120	0,00160
PUNTO_03	04/19/2016 10:43:33	GPS/GLONASS	509.924,26770	1.089.331,39560	0,00120	0,00140	0,00180
PUNTO_04	04/19/2016 10:47:19	GPS/GLONASS	509.875,83310	1.089.335,08130	0,00130	0,00140	0,00190
PUNTO_05	04/19/2016 10:51:23	GPS/GLONASS	509.876,95840	1.089.362,72830	0,00060	0,00080	0,00100

Figura F. 4 Puntos de control suministrados por el sistema RTK.

La figura F.5 muestra una ortofoto con los puntos de control adquiridos por el sistema RTK en forma de rombo, la fotografía muestra el campo de la Escuela de Ingeniería Agrícola.



Figura F. 5 Ortofoto con puntos de control en el campo de agrícola ubicado en las instalaciones del TEC.

- **Marcadores**

Existen ciertos tipos de marcadores que se pueden colocar en las escenas antes de tomar un juego de fotografías, pueden ser utilizados por el software de fotogrametría como puntos de referencia para el sistema de coordenadas y definir la escala o alineación de fotografías [69]. En la figura F.6 se muestran los diferentes marcadores que pueden utilizarse.

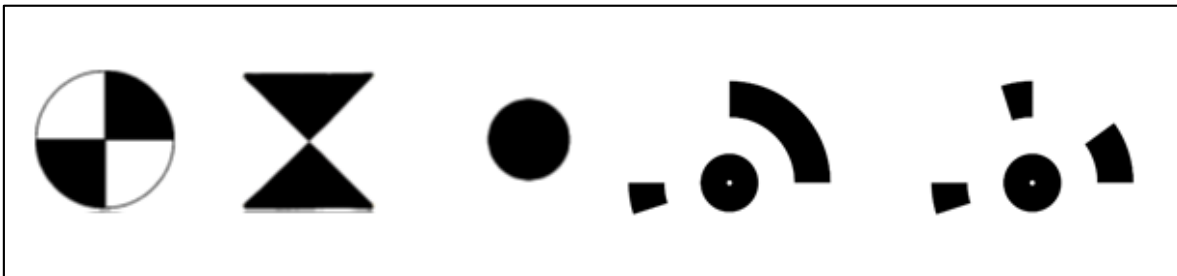


Figura F. 6 Marcadores como puntos de referencia, tomado de [67]

G. Restricciones de operación para vehículos aéreos no tripulados (Mayo 2016)


DIRECCIÓN GENERAL DE
AVIACIÓN CIVIL
COSTA RICA
TEL/FAX: (506) 2443-1648
AFS: MROCYOYX
Página web: www.dgac.go.cr
e-mail: alscr@dgac.go.cr

REPÚBLICA DE COSTA RICA
DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN
CIVIL
Dirección de Navegación Aérea
AIS/MAP
APDO. POSTAL 5026 -1000
SAN JOSE – COSTA RICA

AIC
Serie C
05
08 MAY 15

ENR

RESTRICCIONES Y LIMITACIONES DE OPERACIÓN PARA VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

La Dirección General de Aviación Civil, comunica a todos los usuarios de Vehículos Aéreos No Tripulados (**UAV**), de Sistema de Aeronaves Pilotadas a Distancia (**RPAS**) y de aeronaves no tripuladas de aeromodelismo, las limitaciones de operación y las restricciones del espacio aéreo para el uso de éstas aeronaves.

Una persona **NO** debe operar una aeronave no tripulada en las siguientes condiciones:

1. En una zona prohibida, restringida (publicadas en la AIP de Costa Rica), excepto con el permiso y las condiciones establecidas por la DGAC.
2. En el espacio aéreo controlado, excepto con el permiso y las condiciones establecidas por la DGAC.
3. Dentro de un radio de 8 Km alrededor de un aeródromo, excepto con el permiso y las condiciones establecidas por la DGAC. De tal manera que pueda constituir un obstáculo a otra aeronave que se aproxima o sale de un área de aterrizaje o pista de un aeródromo.
4. Ninguna persona puede operar una aeronave no tripulada lo suficientemente cerca de otra aeronave, de modo que pueda constituirse en un peligro de colisión.
5. No se puede operar por encima de los 400 pies (120 m) sobre el nivel del terreno en el espacio aéreo no controlado, excepto con el permiso y las condiciones establecidas por la DGAC.
6. Pueden realizarse actividades aéreas con aeronaves no tripuladas solo de día y en condiciones meteorológicas visuales, la realización de vuelos nocturnos está sujeta a la aprobación y condiciones de la DGAC.
7. Las aeronaves no tripuladas **SOLO** pueden operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados, reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, excepto con el permiso y las condiciones establecidas por la DGAC.

H. Scripts de Python

Código para importación de imágenes y archivo de calibración de cámara.

```
import PhotoScan
print("Inicio del Script")

global doc
doc = PhotoScan.app.document

#Especificar el directorio donde se encuentran las imágenes
print("Especificar el nombre del archivo donde se encuentran las fotos:")
PhotoScan.app.messageBox("Especificar el nombre de la carpeta donde se encuentran las fotos:")
path_photos = PhotoScan.app.getExistingDirectory("Especificar el nombre del archivo donde se encuentran las fotos:")

#Creación de nuevo set de imágenes o chunk
doc.addChunk()
chunk = doc.chunks[-1]
chunk.label = "Grupo de Cámaras"

print("Escribir el nombre del archivo y la dirección donde guardar el proyecto:")
PhotoScan.app.messageBox("Escribir el nombre del archivo y la dirección \n donde guardar el proyecto:")
project_path = PhotoScan.app.getSaveFileName("Especificar el nombre del archivo para guardar el proyecto:")
if not project_path:
    print("Abortado por el usuario")

if project_path[-4:].lower() != ".psz":
    project_path += ".psz"

#Cargar imágenes
image_list = os.listdir(path_photos)
photo_list = list()
for photo in image_list:
    if (".jpg" or ".jpeg" or ".tiff" or ".TIF") in photo.lower():
        photo_list.append(path_photos + "\\ " + photo)
chunk.addPhotos(photo_list)
```

```
doc.save(project_path)
```

```
PhotoScan.app.update()  
print("Carga de imágenes finalizada")
```

```
# cargar el archivo de calibración de la cámara
```

```
PhotoScan.app.messageBox("Especificar la ruta del archivo XML:")  
path = PhotoScan.app.getOpenFileName("Especificar la ruta del archivo XML:")  
sensor = chunk.sensors[0]  
calib = PhotoScan.Calibration()  
calib.load(path,"xml")  
sensor.user_calib = calib
```

Código para la generación de mapas 3D de forma automática.

```
##El código genera la alineación de la cámara o conjunto de fotografías, los puntos de  
##unión, a nube densa de puntos y el modelo 3D de una calidad media
```

```
import PhotoScan  
doc = PhotoScan.app.document  
doc.open("project.psz")  
chunk = doc.chunk  
chunk.matchPhotos(accuracy=PhotoScan.HighAccuracy,  
preselection=PhotoScan.GenericPreselection)  
chunk.alignCameras()  
chunk.buildDenseCloud(quality=PhotoScan.MediumQuality)  
chunk.buildModel(surface=PhotoScan.Arbitrary,  
interpolation=PhotoScan.EnabledInterpolation)  
chunk.buildUV(mapping=PhotoScan.GenericMapping)  
chunk.buildTexture(blending=PhotoScan.MosaicBlending, size=4096)  
doc.save()
```