

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Guía para la generación de ortofotos utilizando fotogrametría
aérea, aplicada al casco urbano de la Antigua Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Santiago José González Rubio
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



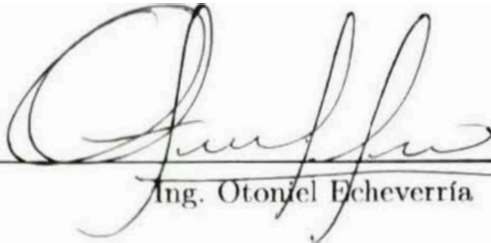
**Guía para la generación de ortofotos utilizando fotogrametría
aérea, aplicada al casco urbano de la Antigua Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Santiago José González Rubio
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

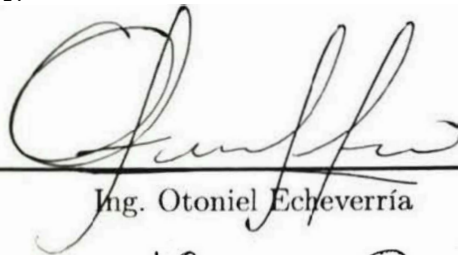
Guatemala,

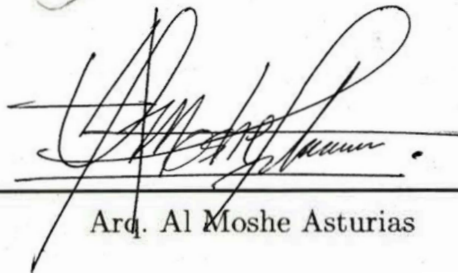
2019

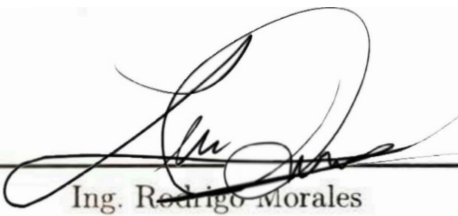
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

(f) 
Arq. Al Moshe Asturias

(f) 
Ing. Rodrigo Morales

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de diciembre de 2019

Este trabajo está enfocado en el uso de nuevas tecnologías para complementar el análisis de terrenos, ya sea en dos o tres dimensiones. El crecimiento del uso de la fotogrametría para complementar los estudios topográficos ha despertado el interés por saber cómo hacer un levantamiento de forma apropiada. Por ello, se realizó una guía para obtener las imágenes con un UAV multirrotor de forma correcta. Además se incluyen los pasos para procesar dichas fotografías y obtener modelos de elevación digital y ortofotos.

Primero, agradezco a Dios, pues es Él quien da la fortaleza y sabiduría para sacar adelante mis estudios. Luego, a mis padres, ya que gracias a sus esfuerzos, consejos y apoyo incondicional, puedo aspirar a tener un título universitario que me permita cumplir mis metas. También quiero agradecer a mis abuelos, pues siempre han sido de gran ayuda sus consejos y el apoyo moral que he recibido de ellos.

Por otra parte, quiero agradecer al Arquitecto Al Moshe Asturias y a mis amigos José Franco y Erick Ríos, quienes me apoyaron en todo el proceso de la toma de fotografías y medición de los puntos de control. Por último, a la Municipalidad de Antigua Guatemala por otorgar el permiso y soporte el día de la medición para poder obtener todos los datos necesarios para el proyecto.

Prefacio	v
Lista de figuras	XIII
Lista de cuadros	XV
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Marco teórico	5
3.1. Fotogrametría	5
3.1.1. Fotogrametría aérea	6
3.1.2. Fotograma	7
3.1.3. Aplicación de la fotogrametría	7
3.2. Modelo de elevación digital (MDE)	7
3.2.1. Modelo de terreno digital	8
3.2.2. Modelo de superficie digital	8
3.2.3. Tipos de superficie digital	8
3.3. Cámaras digitales	9
3.3.1. Cámaras lineales	9
3.3.2. Cámaras matriciales	10
3.4. Ortofotos	11
3.4.1. Métodos de rectificación digital	12
3.4.2. Remuestreo de la imagen	12
3.4.3. Ortofotos digitales	13

3.4.4.	Ortomosaico	14
3.5.	Calibración de la cámara	14
3.6.	Tipos de UAV	14
3.6.1.	Ala fija	15
3.6.2.	Ala rotatoria	17
3.7.	Plan de vuelo	20
3.7.1.	Tipos de vuelo	21
3.7.2.	Escala de una fotografía	21
3.7.3.	Altura de vuelo	23
3.7.4.	Resolución de la imagen (Ground Sampling Distance)	23
3.7.5.	Huella del terreno	24
3.7.6.	Líneas de vuelo y traslapes	25
3.7.7.	Imágenes con inclinación para reconstrucción de edificios en 3D	28
3.8.	Sistema global de navegación por satélite	28
3.8.1.	Métodos de observación y posicionamiento GPS	29
3.9.	Sistema de posicionamiento global (GPS)	31
3.9.1.	Funcionamiento	31
3.9.2.	Fuentes de error	31
3.9.3.	GPS-RTK	32
3.9.4.	Tipos de receptores	33
3.10.	Orientación de las fotografías	34
3.10.1.	Aerotriangulación	34
3.10.2.	Georreferenciación geodésica	35
3.10.3.	Red geodésica	36
3.10.4.	Red de estaciones de operación continua (CORS)	36
3.11.	Control de calidad de las fotografías	36
3.11.1.	Distorsión por rotación de la Tierra	37
3.11.2.	Distorsión panorámica	37
3.11.3.	Efecto de la curvatura de la Tierra	38
3.11.4.	Desplazamiento por relieve	38
3.11.5.	Influencia del viento	39
3.11.6.	Fajas sinuosas	39
3.11.7.	Influencia del relieve	40
3.11.8.	Efecto Rolling Shutter	41
3.11.9.	Efecto Fantasma	41
4.	Metodología	43
4.1.	Determinación del tipo de proyecto	43
4.1.1.	Producto esperado	43
4.1.2.	Determinación de equipo disponible	43
4.2.	Planificación del vuelo	46
4.2.1.	Delimitación del área de estudio	46
4.2.2.	Determinación de parámetros de vuelo	47
4.2.3.	Estimación de tiempo de vuelo	50
4.2.4.	Reconocimiento del lugar	53
4.3.	Realización de los vuelos	57

4.4.	Puntos de control	58
4.4.1.	Establecimiento de puntos de control	58
4.4.2.	Toma de puntos	60
5.	Procesamiento de imágenes y puntos de control	63
5.1.	Equipo y software disponible	63
5.1.1.	Hardware	63
5.1.2.	Software	64
5.2.	Procesamiento de puntos	64
5.2.1.	Ingresar los puntos al programa	64
5.2.2.	Procesar la línea base	68
5.3.	Procesamiento de imágenes utilizando Agisoft	69
5.3.1.	Insertar imágenes y asignar coordenadas	69
5.3.2.	Alineación de las fotografías	70
5.3.3.	Insertar los puntos de control	73
5.3.4.	Creación de nube de puntos densa	75
5.3.5.	Clasificación nube de puntos	77
5.3.6.	Creación de mallado	81
5.3.7.	Modelo de teselas	83
5.3.8.	Construcción del modelo de elevación digital	83
5.3.9.	Creación de ortomosaicos	86
5.4.	Resumen de parámetros utilizados en el proyecto	89
6.	Resultados	91
6.1.	Informe de calidad	91
6.1.1.	Errores en los puntos de control terrestres	96
6.1.2.	Análisis de ortofotos	99
6.1.3.	Análisis de curvas de nivel	104
7.	Conclusiones	109
8.	Recomendaciones	111
9.	Bibliografía	113
10.	Anexos	117
11.	Glosario	133

1.	Tipos de fotogrametría	5
2.	Comparación entre cámaras lineales (izquierda) y matriciales (derecha)	11
3.	Tipos de interpolación	13
4.	Drone de ala fija alta	16
5.	Drone de ala fija media	16
6.	Drone de ala fija baja	16
7.	Drone de tipo ala delta	17
8.	Drone de un solo rotor y rotor de cola	17
9.	Drone de dos rotores en configuración tándem	18
10.	Drone de dos rotores en configuración coaxial	18
11.	Drones multirotores	19
12.	Tipos de vuelo	21
13.	Escala de la imagen	22
14.	Ground Sampling Distance	23
15.	Relación entre el ancho y alto de la imagen con la huella del terreno .	25
16.	Traslapes longitudinales y transversales	26
17.	Base aérea (B) y distancia entre pasadas (A)	27
18.	Reconstrucción de edificios en 3D	28
19.	Ejes de un vehículo aéreo	36
20.	Efecto de distorsión panorámica	37
21.	Distorsión por deriva	39
22.	Huecos causados por sinuosidad	39
23.	Variación de la cobertura fotográfica (escala) según la elevación del terreno	40
24.	Toma de fotografías con sensor CMOS	41
25.	Efecto Fantasma en la toma de fotografías aéreas	42
26.	Trimble R8	44
27.	DJI Phantom 4	45
28.	Vista en satélite del área de trabajo	46
29.	Estimación de tiempo de vuelo con Pix4D	52
30.	Distribución de vuelos para el casco urbano	52

31.	Ubicación de las alternativas para punto de despegue	56
32.	Pad de aterrizaje para drones	57
33.	Utilización de dianas para puntos de control	58
34.	Utilización de pintura en aerosol para puntos de control	58
35.	Ubicación de las tapaderas que servirán de puntos de control	59
36.	Plan de toma de puntos	60
37.	Interfaz de la aplicación de trimble para Android	60
38.	Instalación de la base en el techo de la Municipalidad	61
39.	Medición de los puntos de control	62
40.	Pestaña inicio	65
41.	Botón para cambiar de coordenadas	65
42.	Cuadro para seleccionar sistema de coordenadas	65
43.	Cuadro para seleccionar el dátum del proyecto	66
44.	Cuadro para seleccionar el modelo geoidal	66
45.	Cuadro para insertar puntos	67
46.	Botón para procesar línea base	68
47.	Añadir fotos	69
48.	Botón convertir coordenadas	69
49.	Recuadro para convertir la referencia	70
50.	Flujo de trabajo a seguir en Agisoft	70
51.	Recuadro para orientar fotos	71
52.	Ajustes del sistema de referencia	72
53.	Botón para insertar nube de puntos	73
54.	Configuración puntos de control	74
55.	Opciones de punto	74
56.	Colocación de los puntos en las imágenes	75
57.	Botón para optimizar el cálculo de orientaciones	75
58.	Configuración de creación de nube de puntos	76
59.	Ruta para clasificar nube de puntos	78
60.	Configuración de la clasificación de nube de puntos	78
61.	Botón para cambiar a vista de clases de puntos	79
62.	Herramientas de selección de puntos	79
63.	Botón para asignar puntos a clase	80
64.	Botón para asignar puntos a clase	80
65.	Menú mallado	81
66.	Parámetros del mallado	81
67.	Comando para crea el modelo de elevación digital	83
68.	Parámetros de construcción del modelo digital de elevación	83
69.	Comando para generar curvas de nivel	85
70.	Parámetros para generar curvas de nivel	85
71.	Menú de ortomosaico	86
72.	Comando calibrar color	86
73.	Parámetros calibración de color	87
74.	Parámetros de ortomosaico	87
75.	Generar reporte de calidad	91

76.	Error de reproyección	92
77.	Valor F en los reportes de calidad	93
78.	Zonas de traslape en los vuelos	95
79.	Mapa de errores en los puntos de control terrestres	96
80.	Errores en los puntos de control del vuelo 1	97
81.	Errores en los puntos de control del vuelo 2	97
82.	Errores en los puntos de control del vuelo 3	97
83.	Errores en los puntos de control del vuelo 4	98
84.	Comparación de resolución de fotos a una altura de 70 metros	99
85.	Comparación de resolución de fotos a escala 1/50	100
86.	Ubicación de errores en las ortofotos finales	100
87.	Error 1	101
88.	Error 2	101
89.	Error 3	102
90.	Error 4	102
91.	Error 5	103
92.	Error 6	103
93.	Curvas de nivel obtenidas (sin depurar)	104
94.	Curvas de nivel obtenidas (depuradas)	105
95.	Curvas obtenidas con el modelo de elevación digital del IGN	105
96.	Imperfecciones en el modelo de elevación digital	106
97.	Error 1 causado por la interpolación	107
98.	Error 2 en el modelo de elevación digital	107
99.	Error 3 en el modelo de elevación digital	108
100.	Reporte entregado por la aplicación Pix4D 1	117
101.	Reporte entregado por la aplicación Pix4D 2	117
102.	Mapa de ortofotos finales	118
103.	Mapa de división de vuelos	119
104.	Ortofoto de vuelo 1	120
105.	Ortofoto de vuelo 2	121
106.	Ortofoto de vuelo 3	122
107.	Ortofoto de vuelo 4	123
108.	Mapa de curvas de nivel	124
109.	Mapa de curvas de nivel del IGN	125
110.	Ficha técnica para medir puntos de control 1	126
111.	Ficha técnica para medir puntos de control 2	127
112.	Ficha para toma de datos de vuelo en campo	128
113.	Ficha para elaborar un plan de vuelo 1	129
114.	Ficha para elaborar un plan de vuelo 2	130
115.	Hoja de cálculo para estimar altura de vuelo	131

Lista de cuadros

1.	Comparación entre cámaras lineales y matriciales	10
2.	Ventajas y desventajas de los drones de ala fija	15
3.	Ventajas y desventajas de los drones de ala rotatoria	20
4.	Especificaciones del DJI Phantom 4 Pro	44
5.	Parámetros adicionales de la cámara del Phantom 4 Pro	49
6.	Resumen de parámetros de vuelo	51
7.	Vuelos estimados para el proyecto	53
8.	Ventajas y desventajas del Cerro de la Cruz	54
9.	Ventajas y desventajas del Parque Central	55
10.	Ventajas y desventajas del edificio de la Municipalidad de Antigua . .	55
11.	Resumen de vuelos realizados	57
12.	Especificaciones de ordenador utilizado	63
13.	Requerimientos del sistema	64
14.	Parámetros utilizados para la orientación de imágenes	89
15.	Parámetros utilizados para la reconstrucción de la nube de puntos densa	89
16.	Parámetros utilizados para la construcción del MED	89
17.	Parámetros para la construcción del ortomosaico	89
18.	Parámetros para la clasificación de la nube de puntos	90
19.	Error de reproyección obtenido en el proyecto	92
20.	Criterios de aceptación según porcentaje de imágenes alineadas	93
21.	Criterios de aceptación según porcentaje de optimización de cámara	94
22.	Porcentajes de optimización obtenidos en cada vuelo	94
23.	Resolución obtenida de cada bloque fotogramétrico	98
24.	Criterios de aceptación según el error obtenido en los puntos de control	98
25.	Verificación del error en los puntos de control	98

Este trabajo tiene por objetivo principal la realización de una guía para la generación de ortofotos utilizando fotografías aéreas. Esta se hizo tomando en cuenta fundamentos teóricos y generando las ortofotos del casco urbano de Antigua Guatemala. Lo último sirvió como fase experimental del proyecto, en donde se aplicó la teoría aprendida y se recopiló información a través de todo el proceso del levantamiento para complementar la guía.

Para ello, primero se diseñó un plan de vuelo para el área designada. Esto permitió obtener las fotografías de forma correcta y con el menor tiempo de vuelo posible. Posterior a esto, se realizó el vuelo en Antigua Guatemala para tomar las fotografías que servirían para generar los modelos esperados. Con ellas, se creó un modelo de elevación digital para representar las curvas de nivel del área de trabajo. Por último, se sometió dichas imágenes a un proceso de corrección para generar ortofotos del área de estudio.

La guía describe los factores que se deben tomar en cuenta previo a la toma de las fotografías aéreas y en el diseño de un plan de vuelo adecuado para disminuir la probabilidad de errores en el proceso. Así mismo, se establecen los pasos necesarios para la toma de fotografías en campo, el procedimiento correcto para utilizar el equipo GPS y los parámetros que se deben tomar en cuenta para la creación del modelo de elevación digital y las ortofotos.

Finalmente, las ortofotos se compararon con las que fueron generadas por el Instituto Geográfico Nacional en 2010 y con las imágenes satelitales que provee el programa Google Earth Pro. Esto último sirvió para establecer la calidad final de las ortofotos creadas a partir de las fotografías, enfocándose en la resolución final y en la exactitud de la posición.

This work has as its main objective the creation of a guide for the generation of orthophotos using aerial photographs. It was made taking into account theoretical fundament and by generating the ortophotos of the urban area of Antigua Guatemala. The latter served as an experimental phase of the project, where theory was applied and additional information was collected during the whole process of the survey to complemente the guide.

For it, the first step was to design a flight plan to take the pictures of the designated area. This allowed to obtain the photographs correctly and using the shortest possible flight time. After this, the flight was made in Antigua Guatemala to take de images that would be used to create the expected models. Using these, a digital elevation model was created to represent the countour lines of the terrain. Finally, those pictures were submitted to a rectificaction process to obtain de orthophotos of the study area.

The guide describes the facts that must be taking into account before taking the aerial pictures. It also mentions those that should be considered when designing a flight plan to reduce the probability of making mistakes during it. Likewise, the necessary steps to take the pictures, the correct procedure to use the gps equipment and the parameters that must be taking into account to create the DEM and orthophotos are established.

By last, the created orthophotos were compared with the ones generated by the National Geographic Institute back in 2010 and with the satellite images provided by Google Earth Pro. This served to establish the final quality of the generated orthophotos, focusing in the resolution and the position accuracy.

La fotogrametría se define como una ciencia que permite elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo ciertas condiciones específicas. El método más común es la fotogrametría aérea, la cual permite la obtención de imágenes de grandes extensiones de tierra desde el aire, lo cual facilita la elaboración de planos y mapas [1]. Desde que surgieron los vehículos aéreos no tripulados (UAV), la fotogrametría aérea se ha vuelto un método complementario a la topografía tradicional que permite obtener levantamientos topográficos de forma rápida. Es una opción rápida para hacer estimaciones de áreas, volúmenes o para obtener detalles del comportamiento del terreno de forma preliminar para diseñar anteproyectos.

Existen varias metodologías e instrumentos para realizar el levantamiento por medio de fotogrametría. La elección adecuada de ambos depende principalmente del tipo de proyecto, lo cual está directamente relacionado con la extensión, tipo de zona, calidad de los datos obtenidos y lo que se desea representar en el modelo final. Además, se debe tomar en cuenta que este tipo de proyecto debe complementarse con equipo GPS para que las fotografías tomadas con el dispositivo puedan georreferenciarse a través de ciertos procedimientos en campo.

Con base en lo anterior, lo que se busca en este trabajo es realizar una guía con el procedimiento, instrumentos y requisitos necesarios para la toma de fotografías aéreas, y posterior a ello, el procesamiento y corrección de estas para la obtención del producto modelo. Para ello se tomó en cuenta el equipo disponible, tipo de proyecto, y la calidad del producto esperado, aplicando la metodología al casco urbano de la Antigua Guatemala.

2.1. Objetivo general

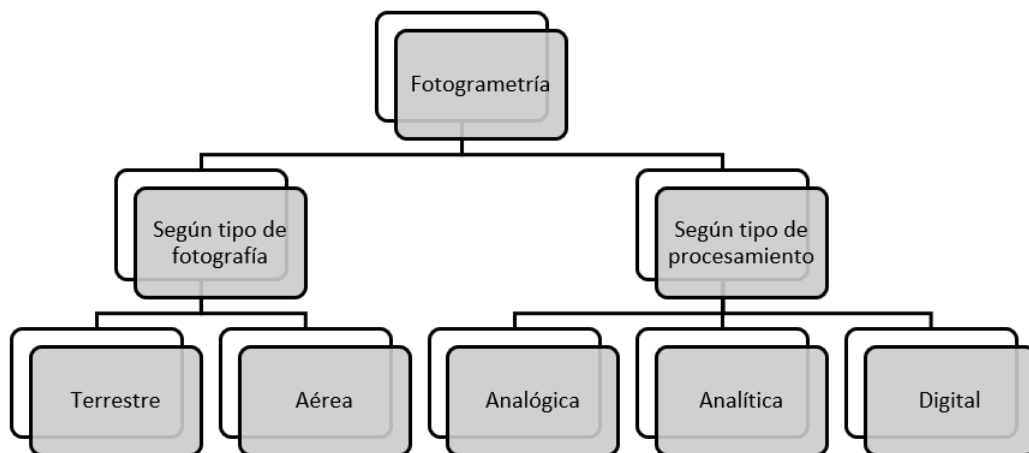
Crear una guía con la metodología apropiada que especifique los pasos que se requieren en la obtención y corrección de fotografías aéreas para la generación de ortofotos y modelos de elevación digital.

2.2. Objetivos específicos

- Describir los pasos necesarios para realizar un plan de vuelo.
- Realizar un plan de vuelo para la toma de fotografías aéreas en el casco urbano.
- Describir los pasos necesarios para procesar las imágenes en Agisoft PhotoScan.
- Generar un modelo de elevación digital a partir de las fotos obtenidas para representar las curvas de nivel del casco urbano.
- Generar ortofotos que representen de forma precisa el casco urbano de la Antigua Guatemala en un mapa.
- Comparar la calidad final de las ortofotos generadas con las proporcionadas con el Instituto Geográfico Nacional.

3.1. Fotogrametría

Figura 1: Tipos de fotogrametría



Fuente: Elaboración propia

Cada uno de los tipos de procesamiento que se muestran en el cuadro anterior han surgido como alternativas según la tecnología y equipos disponibles. Estos procesos de corrección en la fotogrametría han pasado de realizarse con métodos análogos, pasando por los analíticos, hasta llegar a las fotografías digitales. Los principios de cada uno de ellos son los siguientes.

Analógicos

Estos métodos son casi obsoletos. Se basaban en el uso de trazadores estereoscópicos o aparatos de restitución ópticos, donde el operador realizaba la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico, el cual luego era debidamente nivelado y escalado.

Analíticos

Con la creación de las computadoras, surgió este método para hacer mediciones más precisas de las coordenadas fotográficas y la elaboración de un modelo matemático que se puede resolver con análisis numérico. Aquí, ya se utilizan trazadores analíticos, los cuales combinan un sistema estereoscópico de precisión con una computadora digital [2].

Digitales

Estos métodos son los más modernos, los cuales se basan en el uso de fotografías digitales que se procesan y corrigen con la ayuda de computadoras y software especializado.

3.1.1. Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea se define como una técnica que permite obtener la forma, dimensiones geométricas, elevación y posición de diferentes objetos a través de fotografías aéreas procesadas. Permite tanto la reconstrucción de objetos en dos o tres dimensiones, dependiendo de cómo se tomen las fotografías. Para generar modelos en dos dimensiones que permitan obtener información básica basta con una fotografía. No obstante, si se busca una reconstrucción en tres dimensiones se debe trabajar con varias fotografías con zonas de traslape que permita tener una visión estereoscópica de los objetos en ellas [3].

La fotogrametría se divide en dos grandes áreas: la fotogrametría métrica y la interpretativa. La métrica suele ser la más común en el ámbito de la ingeniería, ya que los topógrafos lo utilizan para determinar elevaciones, distancias, áreas, volúmenes, secciones transversales y en la elaboración ortográficos con base en mediciones hechas con fotografías [2]. Por otro lado, el mismo autor indica que la fotogrametría interpretativa está más enfocada al reconocimiento de objetos y la apreciación de su significado. Los principales factores que se toman en cuenta son la forma, tamaño, configuración, sombra y textura de imagen.

3.1.2. Fotograma

Es una vista área obtenida por fotografías desde un avión. Para obtenerlas, es necesario que el vehículo aéreo cuente con una cámara que además de imprimir la superficie en una imagen digital, debe llevar en los bordes datos como la distancia focal, altura de vuelo, hora de la toma, número de orden de la fotografía, etc. Se debe conocer la distancia focal o distancia principal con precisión de la centésima de milímetro. Es importante conocer también la proyección de la distancia focal sobre el fotograma denominada “punto principal”.

3.1.3. Aplicación de la fotogrametría

La fotogrametría tiene varias aplicaciones en la ingeniería civil, por ejemplo, para levantamientos topográficos, generación de modelos cartográficos o para la utilización de los modelos en Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), por lo que es necesario que en la mayoría de los casos imágenes estén georreferenciadas. En este ámbito, es ampliamente utilizada para la generación de ortofotos y modelos de elevación digital que permiten obtener mapas, modelos en 3D y levantamientos topográficos.

3.2. Modelo de elevación digital (MDE)

Un modelo de elevación digital (del inglés Digital Elevation Model) es una estructura numérica, producto del análisis fotogramétrico digital de fotografías aéreas o imágenes satelitales, que representa los niveles de un terreno. También es posible obtenerlo utilizando las técnicas de topografía tradicionales. Estos se construyen a partir de valores absolutos de altura respecto a un Datum: o nivel de referencia. En la fotogrametría digital usualmente se utilizan técnicas de comparación de imágenes para estimar la elevación de los objetos en el campo a partir de pares estereoscópicos [4], [5].

Los MDE se obtienen a partir de métodos directos o indirectos. El método directo más empleado en los últimos años es el uso de la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging). Este sensor con ayuda de sistemas inerciales permite obtener tanto la posición planimétrica como altimétrica del terreno utilizando un haz de láser pulsado. La distancia se determina midiendo el tiempo que transcurre desde la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada [6].

Entre los métodos indirectos están los producidos por la fotogrametría, los cuales generalmente son la restitución o correlación automática. La segunda consiste en que la computadora realice la búsqueda automáticamente de zonas homólogas de las dos imágenes. Sin embargo, tiene el error de que las lecturas de altitud se interrumpen con la presencia de vegetación o techos de edificios [6].

Cuando se habla de modelos de elevación digital, se suelen confundir con productos muy similares conocidos como Modelo de Superficie Digital (Digital Surface Model) y Modelo Digital de Terreno (Digital Terrain Model), cuando en realidad ambos son derivados del MDE.

3.2.1. Modelo de terreno digital

Un modelo de terreno digital (MDT:) es una representación de superficie del suelo desnudo, es decir, sin objetos como vegetación, autos, edificios, etc. Se podría decir que es un DEM, con la diferencia de que contiene información como detalles morfológicos del terreno, patrones de drenaje, propiedades de suelo, etc. [7].

3.2.2. Modelo de superficie digital

Un modelo de superficie digital (MDS:) es un modelo de elevación que contiene las elevaciones de todo, incluyendo árboles, edificios, y superficie del terreno que no tiene en por encima de él [7].

3.2.3. Tipos de superficie digital

Existen tres tipos modelos de elevación, los vectoriales, los de tipo ráster (grillas) y las curvas de nivel. Los primeros se caracterizan por tener una red de triángulos irregulares, por ello se conocen por sus siglas en ingles TIN (Triangular Irregular Networks). Por otro lado, los de tipo ráster poseen una matriz de celdas regulares que contienen cotas sobre una grilla de filas y columnas equidistantes. La tercera son líneas en un plano que marcan un mismo nivel.

Superficie TIN (Triangular Irregular Networks)

El modelo TIN está conformado por un conjunto de triángulos adyacentes que no se traslapan., los cuales se derivan a partir de un set de puntos con un espaciamiento irregular. La estructura de datos estaba basada en una mezcla de puntos, líneas (línea de cambio o inflexión en las topografías), y polígonos (áreas). Estos modelos almacenan la información topológica que define las relaciones especiales entre cada uno de los triángulos y sus vecinos [8].

El tamaño y posición de los triángulos dependen de la posición y la densidad de muestras distribuidas al azar. Las posiciones horizontal y vertical los vértices de los triángulos determinan la extensión y la orientación de una faceta triangular en el espacio 3-D [7].

Entre sus ventaja están:

- Se adaptan mejor a las irregularidades del terreno
- Ocupa menos espacio
- Permite visualizar mejor las pendientes, aspecto y sombreado del terreno

Superficie ráster (grilla)

Esta estructura superpone una retícula sobre el terreno y extrae la altitud media de cada celda. La o grilla consiste en una malla con filas y columnas equidistantes. En un modelo Ráster:, cada píxel tiene un valor de altura y para representar la inclinación en este es necesario determinar la altura en todas las celdas [9].

Curvas de nivel

Un DEM está compuesto por curvas de nivel, las cuales son isolíneas equidistantes que unen los puntos que tienen la misma altitud. Cada línea tiene etiquetas con su valor de elevación correspondiente [7].

3.3. Cámaras digitales

La cámara digital funciona de forma muy similar a la cámara analógica. La diferencia principal está en la forma que se da el almacenamiento de la luz. Mientras que la cámara analógica lo hace en un rollo de película fotosensible, las digitales lo hacen en un microchip de células fotosensibles llamado CCD: (Charge-Coupled Device). También existe otro tipo de sensor digital denominado CMOS (Complementary metal oxide semiconductor). La diferencia principal entre el CCD y el CMOS es la forma en la que toma las fotografías.

3.3.1. Cámaras lineales

Las cámaras de línea barren el terreno de forma simultánea al avance del vehículo aéreo con tres líneas Pancromáticas:. Tiene una única lente y un plano focal. La toma de la imagen se realiza por barrido simultáneo en tres posiciones de la línea de toma, una hacia atrás, otra hacia abajo y, por último, hacia delante [10]. La gran ventaja de este tipo de cámaras es que todos los puntos del terreno aparecerán en tres imágenes. Por tanto, todos los puntos son capturados bajo la dirección nadiral (ortogonal) lo que facilita la generación de ortofotos verdaderas puesto que los elementos elevados no aparecerán desplazados en las fotografías [1].

Algunas características de las tomas son:

- La geometría de la imagen no es una proyección cónica, por lo que es necesario disponer de software específico que contemple el cambio de modelo geométrico del sensor
- El sistema GPS: es fundamental para determinar la orientación externa de la cámara durante el vuelo
- Las matrices lineales son más simples por lo que suelen tener menos píxeles erróneos
- Permiten imágenes a mayor escala debido al movimiento del vehículo

3.3.2. Cámaras matriciales

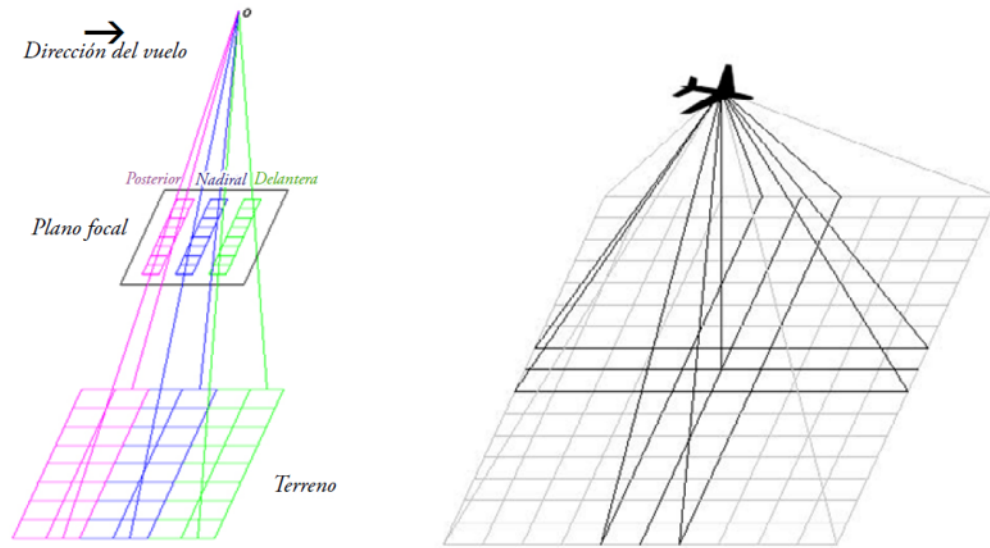
Las cámaras de tipo matricial toman imágenes del mismo modo que las cámaras convencionales. Tienen varios objetivos que disparan simultáneamente, unos en pan-cromático y otros en infrarrojo. Cuentan con varios planos focales y unen todas las imágenes en una sola [10]. A estas cámaras se les puede dotar de sistemas GPS e INS durante el vuelo para georreferenciarlas directamente.

Cuadro 1: Comparación entre cámaras lineales y matriciales

Lineales	Matriciales
Registro continuo de todo el terreno desde tres puntos de vista	
Mayor resolución	
No necesitan corrección radiométrica	Tiene menor resolución
Depende de sistemas GPS colocados en tierra	Su geometría es igual a las fotografías analógicas
Se requiere software especializado, ya que no aplican los principios estereoscópicos	No requieren sistemas GPS
El objetivo debe estar abierto permanentemente	

[1]

Figura 2: Comparación entre cámaras lineales (izquierda) y matriciales (derecha)



[1]

3.4. Ortofotos

Las ortofotos son fotografías que representan un objeto o terreno en proyección ortogonal. Estas se obtienen a partir de la ortoproyección de las fotografías efectuadas de un modelo 3D. El método consiste en la Rectificación: diferencial de la superficie del modelo y su posterior teselado. En este proceso se eliminan los efectos de la falta de verticalidad en el eje de toma de fotografías, el desplazamiento de la imagen debido al relieve y la inclinación y las variaciones de escala [11][12][2].

Para generar una Ortofoto: se necesita un modelo de elevación digital y un mapa con referencia topográficas. El MDE: se necesita para normalizar la ondulación del terreno. La referencia topográfica se necesita para vincular los puntos de control en tierra a las fotografías y así poder calcular las coordenadas de cada punto de estas [13].

Una ortofoto es equivalente geoméricamente a un mapa en el que es posible medir ángulos y distancias en . También se pueden generar ortofotomapas, los cuales son ortofotos con información vectorial relevante superpuesta. Dicha información incluye, por ejemplo, curvas de nivel, vías de comunicación, etc. Para que una fotografía digital pueda ser utilizada como ortofoto, se han de eliminar los siguientes efectos:

- Los producido por el sistema de proyección
- Los producidos por la inclinación
- Los producidos por el relieve del terreno, lo cual causa la variación de escalas en la fotografía

Las características principales de una ortofoto son:

- Compensación de la inclinación del dispositivo con el que se tomaron las fotografías
- Transformación de la proyección central de la fotografía en una proyección ortogonal incluyendo la corrección de la elevación debido a la variación de escalas
- Orientación de las fotografías hacia el norte, dado que generalmente las fotografías se toman en dirección de este-oeste o viceversa para evitar la iluminación excesiva del sol

3.4.1. Métodos de rectificación digital

Rectificación polinómica

Con este método se corrigen la proyección de la imagen a partir de una red de puntos de control, relacionando por medio de ecuaciones polinómicas, sus coordenadas en la imagen original con las coordenadas de la imagen rectificadas. Los desplazamientos debido al relieve no se corrigen adecuadamente con este método y tampoco se consideran las características específicas del sistema de captura de imágenes [10].

Rectificación proyectiva

Es un método donde se establece la relación existente entre dos planos, el plano medio definido por las coordenadas del terreno y el plano definido por las coordenadas imagen. La relación entre planos queda definida por 8 parámetros, que pueden calcularse a partir de cuatro puntos de control, utilizando para ello la transformación bidimensional proyectiva [10].

3.4.2. Remuestreo de la imagen

Luego de realizar la rectificación, es usual que existan píxeles proyectados que no coinciden con la posición de los píxeles originales. Para ello es necesario utilizar algún método de remuestreo (en inglés se conoce como resampling). Existen tres procedimientos para realizar la corrección a este problema.

Vecino más próximo

Este método asigna a cada celda de la ortofoto el valor de gris de píxel más cercano en la imagen original. Es el método más rápido y simple, pero hay que coincidir que los resultados no son tan precisos como con los otros dos métodos [10].

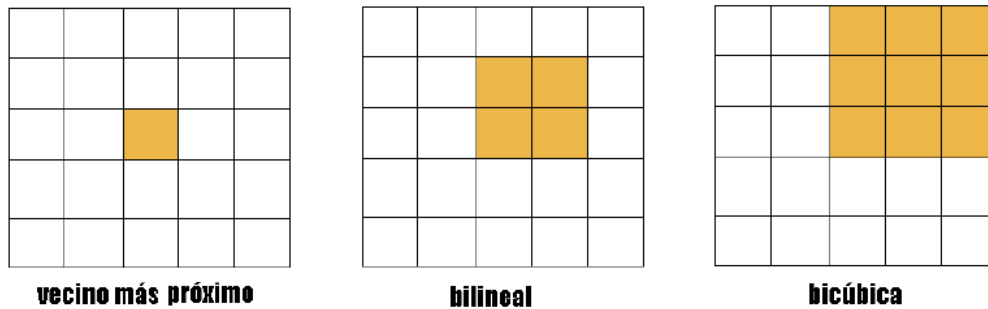
Interpolación bilineal

Este método lo que hace es un promedio de los valores de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original, ponderando según la distancia; de tal manera que tienen mayor influencia los píxeles más cercanos. Tiene la desventaja de difundir los contrastes espaciales de la imagen original [10].

Interpolación bicúbica

En este caso se realiza el promedio de los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos. Es el más preciso de todos y el que mejor efecto visual tiene, sin embargo, implica un mayor número de cálculos [10].

Figura 3: Tipos de interpolación



[10]

3.4.3. Ortofotos digitales

La tecnología actual permite la obtención de ortofotos a partir de imágenes digitales. Estas son matrices bidimensionales de niveles de gris (o de valor de color) con elementos de información mínima (píxeles) que varían en función de la posición (fila-columna) que ocupan dentro de una matriz [14].

Con la llegada de los escáneres fotogramétricos y posteriormente de las cámaras digitales, el proceso de rectificación diferencial se comenzó a realizar de otra forma. El lugar de capturarse las imágenes en películas fotografías, estas se capturan digitalmente con un sensor CCD o CMOS. Además, la resolución paso de medirse por el tamaño del grano de la película a medirse por el tamaño elemental conocido como píxel.

Las imágenes se forman a partir de un proceso de muestreo llamada digitalización. En él, una zona pequeña del sensor registra de forma directa la información correspondiente a una zona del modelo registrado. Cada casilla se denomina píxel y

viene definido por un índice que define su posición en “x” y en “y” en el sistema de coordenadas de la foto. También define su nivel de gris [14].

Los nuevos sistemas también permiten conocer con precisión la posición de la cámara en el momento de la toma de la fotografía en un sistema de coordenadas determinado. Además, se puede saber la inclinación respecto a los tres ejes (X, Y, Z). Esto permite que se puedan componer las ortofotos rápidamente a partir de un MDE de la zona [6].

3.4.4. Ortomosaico

Un ortomosaico es una secuencia de imágenes de tipo mosaico, que se encuentran georreferenciadas y fueron corregidas y rectificadas de todos los errores geométricos. De esta forma cada punto en el terreno se puede observar de forma perpendicular. La resolución del mosaico dependerá de la altura de vuelo, calidad de la imagen y el proceso fotogramétrico [15].

3.5. Calibración de la cámara

En su texto, Vermeer y Tesfaye (2015), establecen que uno de los pasos esenciales es la calibración de la cámara, previo a la toma de fotografías aéreas. Esto se debe hacer para hacer coincidir las coordenadas locales de la fotografía con las coordenadas del sistema que se utilizará para georreferenciar las ortofotos. Las cámaras que comúnmente se utilizan para la fotogrametría aérea son las cámaras métricas. Este tipo de cámaras proyectan varios puntos del terreno a través de un solo punto, el centro óptico. Durante el proceso de calibración, se determina la orientación interna de la cámara. Los parámetros que se determinan en la calibración son:

- La distancia o profundidad focal, la cual se define como la distancia entre el centro óptico o sensor de la cámara y el foco. Esta determina la escala y la resolución final de las fotografías
- Las coordenadas x , y del punto principal de la cámara con respecto a los puntos de referencia en el plano de la fotografía
- Las coordenadas y las distancias entre los puntos de referencia para la determinación de las coordenadas reales

3.6. Tipos de UAV

Un UAV (Unmanned aerial vehicle), conocido coloquialmente como Drone, es toda aeronave capaz de volar sin necesidad de llevar un piloto a bordo. Existen varias

formas de clasificarlos, pero una de las formas más fácil es por su aerodinámica. Los grupos que conforman esta clasificación son los UAV con ala fija y los que tienen alas rotatorias.

3.6.1. Ala fija

Son aquellos en los cuales las alas se encuentran unidas con el resto de los elementos de la aeronave y no poseen movimiento propio. Son utilizados para cubrir grandes extensiones de terreno ya que su diseño aerodinámico les permite ser más rápidos que los otros tipos y pueden llevar más fácilmente cualquier tipo de sensor [15] [16].

Cuadro 2: Ventajas y desventajas de los drones de ala fija

Ventajas	Desventajas
<p>Mayor autonomía de vuelo, ya que las baterías les permiten volar entre 40 y 120 minutos</p> <p>Cubre mayores extensiones de terreno</p> <p>Su diseño aerodinámico los hace más veloces</p>	<p>Requiere mayo espacio para despegue y aterrizaje</p> <p>Requiere más entrenamiento para volar</p> <p>El despegue debe ser asistido por un riel lanzador</p> <p>Tiene un menor nivel de maniobrabilidad que otros tipos de UAV</p> <p>No se recomiendan para espacios cerrados o de poca extensión</p>

Dentro la categoría de drones de ala fija se encuentran variantes que dependen de la ubicación de las alas con respecto al fuselaje. Pueden estar ubicadas arriba, en medio o bajo el fuselaje. Estos son:

1. Ala fija alta
2. Ala fija media
3. Ala fija baja
4. Ala delta

Figura 4: Drone de ala fija alta



[15]

Figura 5: Drone de ala fija media



[15]

Figura 6: Drone de ala fija baja



[15]

Figura 7: Drone de tipo ala delta



[15]

3.6.2. Ala rotatoria

Los UAV de ala rotatoria se caracterizan por tener motores que hacen girar uno o varios ejes con hélices. Este sistema de propulsión hace que sean más estables y les permite estar estacionarios en un punto.

Usualmente, los drones de ala rotatoria se clasifican según el número de rotores que tengan. Comúnmente en el mercado se encuentran de un solo rotor, de dos rotores y multirrotores.

Drones de un solo rotor y rotor de cola

[H] Estos se dotan de un rotor principal y un rotor de cola. El primero se encarga de la sustentación mientras el segundo compensa el par torsión que el primero produce. Se caracteriza por una estructura compleja que ofrece buen control y maniobrabilidad [16].

Figura 8: Drone de un solo rotor y rotor de cola



[16]

En configuración tándem

Ambos rotores se encuentran en la parte superior uno a la par del otro. Ambos giran en direcciones opuestas lo cual neutraliza el torque generado [16].

Figura 9: Drone de dos rotores en configuración tándem



[16]

En configuración coaxial

Ambos rotores se encuentran en la parte superior uno encima del otros. Giran en direcciones opuestas y es capaz de emprender el vuelo a partir de la diferencia de la velocidad angular entre ambos [16].

Figura 10: Drone de dos rotores en configuración coaxial



[16]

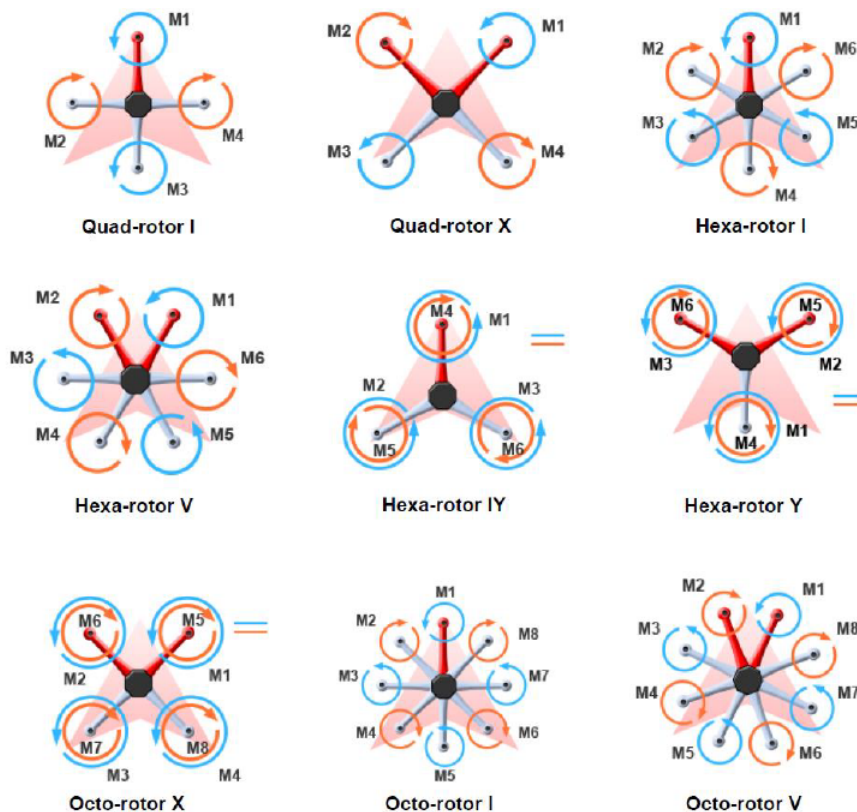
Multirotores

Este tipo de drones posee tres o más rotores. Las configuraciones más comunes son:

1. Tricópteros (tres rotores)
2. Cuadricópteros (cuatro rotores)
3. Hexacópteros (seis rotores)
4. Octocópteros (ocho rotores)

Las hélices de este tipo de drones son de ángulo fijo y revoluciones variables. Aquellos con cuatro o más hélices requieren de una disposición especial de las mismas. Estas son instaladas en sentidos de rotación opuestos de forma diametral, es decir, se alternan hélices de giro a derecho con helices de giro a izquierda, hacienda que la sumatoria de fuerzas de sustentación sea cero [16].

Figura 11: Drones multirotores



Fuente: Ortega Cárdenas, 2018

Cuadro 3: Ventajas y desventajas de los drones de ala rotatoria

Ventajas	Desventajas
No necesitan gran espacio para aterrizar o despegar, ya que operan como un helicóptero convencional	Es más lento en la toma de datos
Puede permanecer estático en un objetivo	Los rotores consumen gran cantidad de energía por lo que tiene poca duración
Puede llevar más carga (sensores)	La lluvia dificulta su vuelo
Son más estables	Menor alcance
Son más fáciles de maniobrar (menor tiempo de entrenamiento)	

3.7. Plan de vuelo

El plan de vuelo debe asegurar que se cubra toda el área que se quiere analizar con el mínimo tiempo de vuelo. Se debe investigar sobre la altura máxima permitida de vuelo y sobre las áreas en las que está prohibido el uso de vehículos aéreos no tripulados. En el caso de la toma de imágenes para ortofotos, la línea de vuelo debe ser preferiblemente de Norte a Sur y de Este a Oeste, manteniendo el ángulo vertical de la cámara entre 0 y 3 grados para que las fotografías sean casi ortogonales.

Existen ciertos factores que determinan las características del vuelo a realizar. Estos parámetros se deben definir previo a la realización del levantamiento, según los requerimientos del proyecto. Los más importantes son:

- Límites de la zona cubrir
- Altura de vuelo permitida
- Resolución de las imágenes requerida
- Distancia focal de la cámara y el formato o tamaño de fotos
- Resolución de la cámara
- Superposición longitudinal
- Superposición transversal

Al definir los parámetros anteriores, se obtienen las características de la misión de vuelo que se deben cumplir para obtener la calidad apropiada de imágenes:

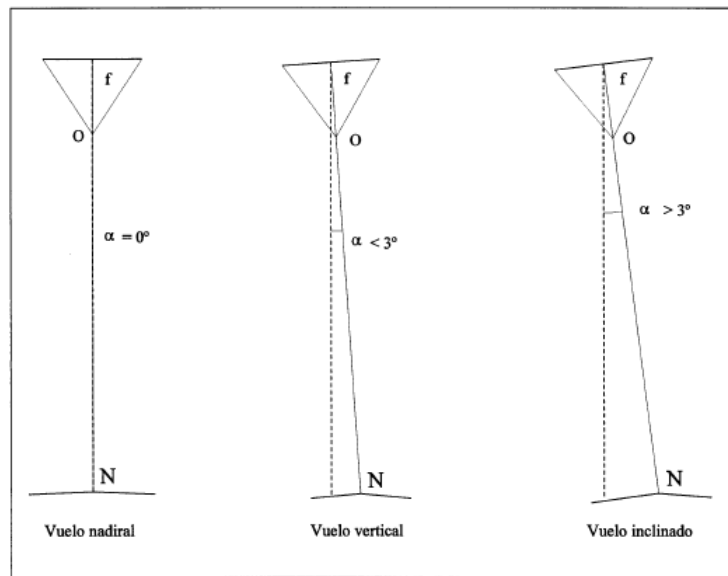
- Altitud de vuelo (respecto al nivel del suelo)

- Distancia entre tomas fotográficas
- Numero de fotos por la línea de vuelo
- Distancia entre líneas de vuelo
- Número de líneas de vuelo
- Número total de fotografías

3.7.1. Tipos de vuelo

Como se observa en la siguiente figura, existen tres tipos de vuelos. Cabe destacar que, en la fotogrametría aérea que busca la generación de ortofotos, se procura que el vuelo sea vertical, para que el proceso de rectificación sea más sencillo.

Figura 12: Tipos de vuelo

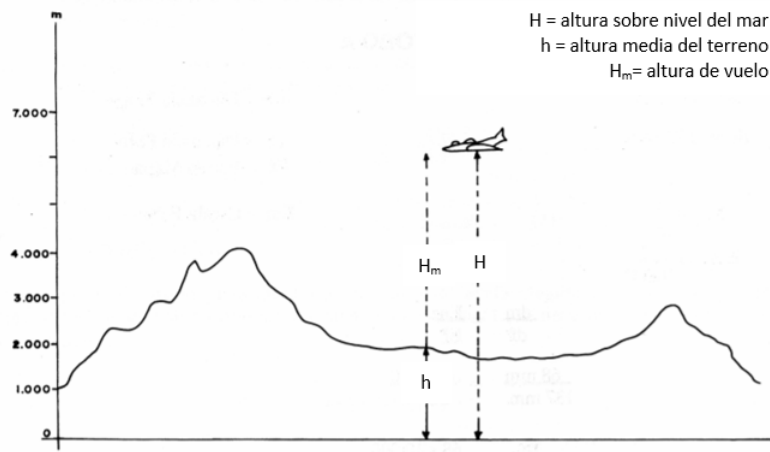


[17]

3.7.2. Escala de una fotografía

La escala se define como la razón entre cierta distancia en un plano o mapa y la distancia real en el terreno. Dicha razón debe ser regular en todo el plano, dado que la proyección es completamente ortogonal [2]. Este criterio determina la altura de vuelo a la que se debe realizar la toma de las fotografías. Uno de los problemas es que la escala varía de un punto a otro según la elevación del terreno si altura del drone se mantiene constante, por lo que se tienen diferentes escalas en una sola fotografía. Esto se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 13: Escala de la imagen



[18]

La escala en cualquier punto cuya elevación sobre PR viene dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{f}{H - h} \quad (1)$$

Donde:

- f es la distancia focal
- H es la altura sobre el nivel del mar
- h es la cota del terreno

Cabe destacar que, en ocasiones es conveniente emplear una escala fotografía media para facilitar la toma y procesamiento de las fotografías aéreas. Sin embargo, debe tomarse en consideración que esto funciona como una aproximación y que puede dar lugar a ciertos errores de cálculo debido a la falta de precisión. Si aplica, se sustituye la cota o elevación del terreno (h) por una elevación media o promedio de todos los puntos (h_m).

Escala de una foto digital

En las imágenes digitales, la escala original en el sensor de imagen no es de gran interés, ya que la escala puede cambiarse al visualizarse en un dispositivo. Sin embargo, lo que no cambia es la resolución original y el tamaño del objeto visible más pequeño depende directamente del tamaño de las celdas del sensor o de los píxeles en el detector electrónico. En este caso, el GSD se vuelve más apropiado como forma de medida de la escala de imagen [19].

3.7.3. Altura de vuelo

Una vez se tiene determinada la escala de la imagen y se conoce la distancia principal de la cámara, se puede obtener la altura de vuelo con la siguiente expresión:

$$H_m = f * E \quad (2)$$

Donde:

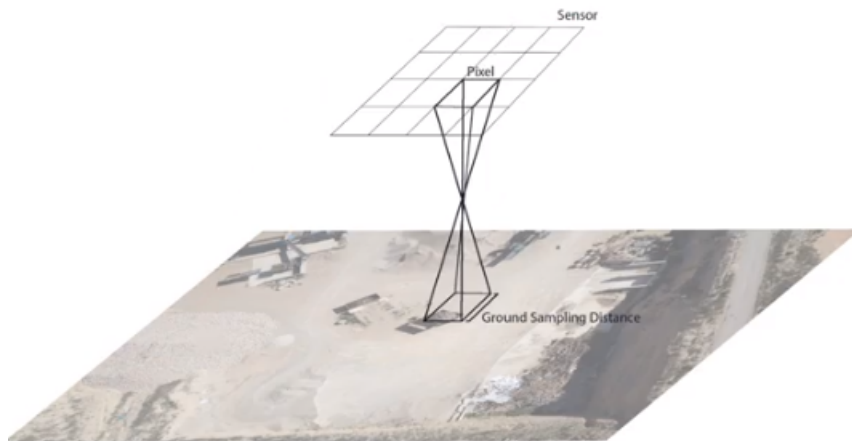
- H_m es la altura de vuelo
- f es la distancia focal
- E es la escala fotográfica

3.7.4. Resolución de la imagen (Ground Sampling Distance)

La calidad de la imagen depende del tamaño del píxel, y esta se denomina resolución. Si el píxel es demasiado grande se pierde gran cantidad de información ya que debe abarcar una gran extensión de terreno. Por el contrario, si el píxel es muy pequeño este contendrá información mucho más detallada.

En la fotogrametría aérea, la resolución espacial tiene correspondencia directa con el tamaño del Píxel: en el terreno o GSD [1]. El GSD: (Ground Sampling Distance) es un término que se utiliza en la fotogrametría digital para indicar la distancia que existe entre los centros de dos píxeles adyacentes medidos desde tierra y utilizando unidades relativas [3]. Mientras más alto sea este valor, mayor es la distancia entre píxeles, por lo que se obtiene menos resolución espacial y menos nivel de detalle.

Figura 14: Ground Sampling Distance



3.7.5. Huella del terreno

Se define como el área que cubre la imagen en el terreno. Se determina por el alto y ancho de la imagen y el GSD.

Alto de la huella en el terreno

El alto de la huella en el terreno viene dada por la siguiente ecuación:

$$S_1 = \frac{s_1 * GSD}{100} \quad (3)$$

Donde:

- S_1 es el alto de la huella en el terreno en metros
- s_1 es el alto de la imagen en píxeles
- GSD es la resolución de la imagen en cm/píxel

Ancho de la huella en el terreno

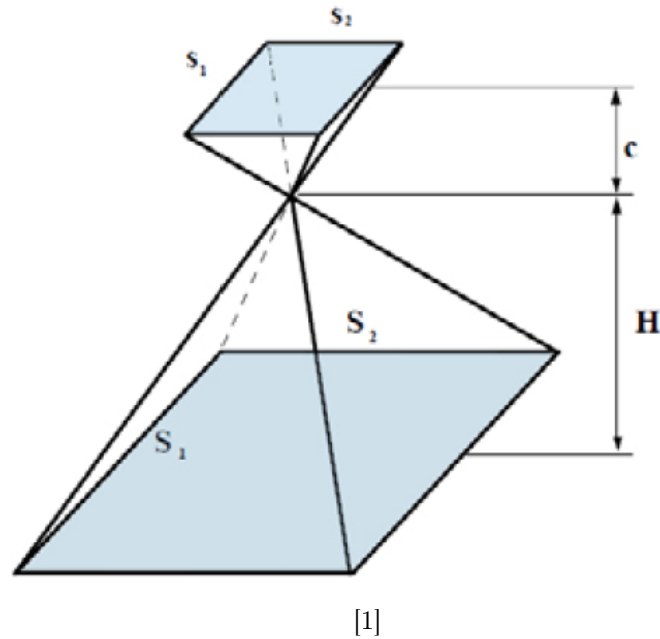
El ancho de la huella en el terreno viene dada por la siguiente ecuación:

$$S_2 = \frac{s_2 * GSD}{100} \quad (4)$$

Donde:

- S_2 es el ancho de la huella en el terreno en metros
- s_2 es el ancho de la imagen en píxeles
- GSD es la resolución de la imagen en cm/píxel

Figura 15: Relación entre el ancho y alto de la imagen con la huella del terreno



3.7.6. Líneas de vuelo y traslapes

El proceso de la toma de fotografías consiste en cubrir totalmente el área de estudio con líneas o fajas de vuelo. Estas líneas de vuelo se orientan de los ejes Norte-Sur y Este-Oeste, aunque se recomienda más el segundo para que la iluminación del sol no afecte las fotografías. El vuelo fotogramétrico de un terreno debe hacerse por pasadas paralelas y todas a la misma altura de vuelo. El eje de la pasada es la línea principal que une todos los puntos principales de los fotogramas [17].

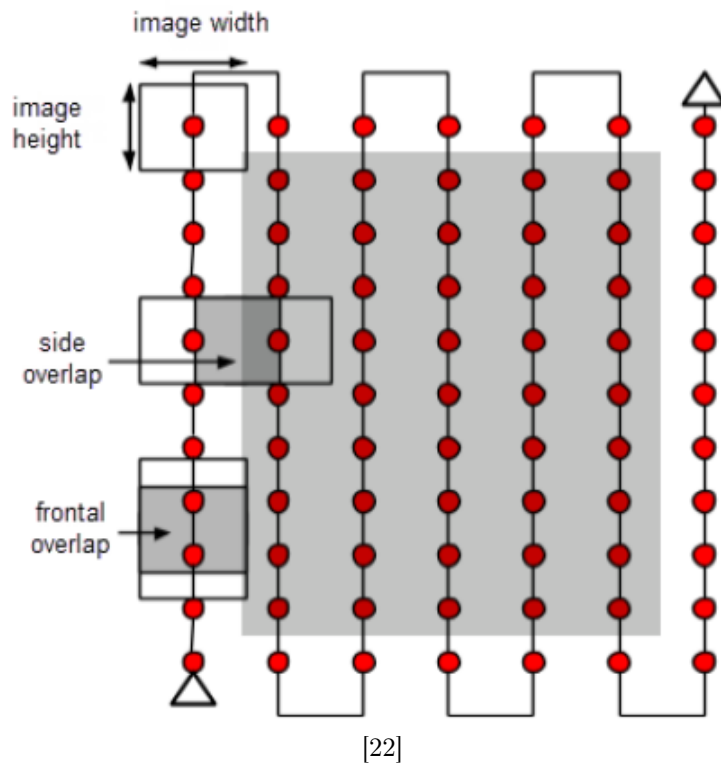
Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para las líneas de vuelo, según Ruzgiene [21]:

- Las líneas de vuelo deben ser lo más paralelas posibles entre sí. La falta de paralelismo no debe exceder los 5°
- La desviación de la línea de vuelo no debe exceder 2% de la trayectoria total
- El ángulo de cabeceo y alabeo puede estar en $\pm 2^{\circ}$ y el de guiñada en $\pm 2^{\circ}$ medido entre la línea base y la línea paralela al marco fotografía

Por otra parte, para que se pueda generar un punto en 3D, es necesario que al menos dos fotografías cuenten con un punto en común (principio estereoscópico). Por ello es necesario realizar traslapes entre las distintas fotografías tanto transversal como longitudinalmente. Como regla general, como mínimo se requiere el 75% de traslape

frontal o longitudinal (con respecto a la dirección del vuelo) y el 60% de traslape lateral o transversal (entre las líneas del recorrido).

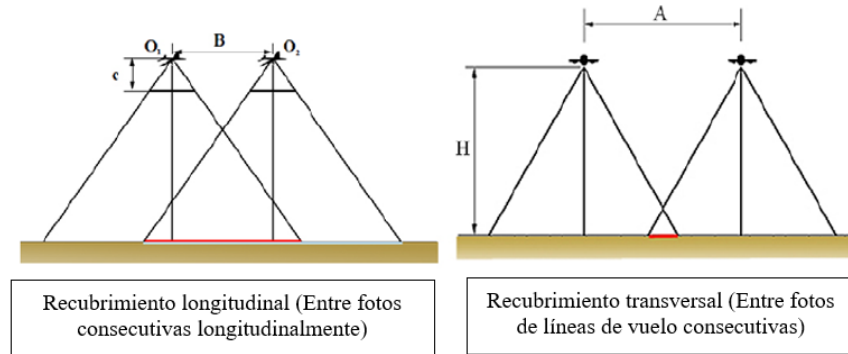
Figura 16: Traslapes longitudinales y transversales



Base aérea y distancia entre pasadas

La base aérea (B) se define como la distancia entre los puntos principales de dos fotografías longitudinales consecutivas. Es la distancia que el vehículo aéreo recorrerá entre toma y toma. La distancia entre pasadas (líneas de vuelo) se denomina A, tal como se ilustra en la siguiente figura:

Figura 17: Base aérea (B) y distancia entre pasadas (A)



[1]

Dado lo anterior, se vuelve de gran importancia definir una grilla de trabajo equidistante en ambas direcciones, definiendo las distancias en función de la huella de la cámara, los traslapes y la resolución final que se quiera obtener las fotografías.

Ambos parámetros se pueden calcular con las siguientes expresiones:

$$B = S_1(1 - p) = s_1E(1 - p) = s_1E\left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \quad (5)$$

$$A = S_2(1 - q) = s_2E(1 - q) = s_2E\left(1 - \frac{q\%}{100}\right) \quad (6)$$

Donde:

- S_1 es la cobertura lineal en el sentido del alto de la fotografía
- S_2 es la cobertura lineal en el sentido del ancho de la fotografía
- p es el recubrimiento longitudinal
- q es el recubrimiento transversal
- s_1 es el alto de la fotografía
- s_2 es el ancho de la fotografía

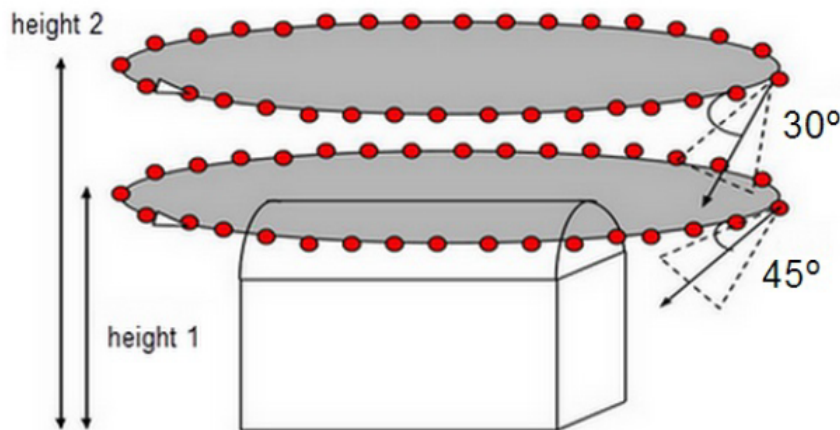
3.7.7. Imágenes con inclinación para reconstrucción de edificios en 3D

Todas las ecuaciones descritas anteriormente si las imágenes no son tomadas con una inclinación mayor a 3° . Sin embargo, en ocasiones es necesario tomar fotografías con cierta inclinación dependiendo del producto final que se espere. Por ejemplo, para la reconstrucción de edificios se recomienda que la cámara se encuentre a 45° respecto al eje vertical [22].

Además de lo anterior, el manual de PIX4D recomienda lo siguiente para un levantamiento de edificios en 3D:

1. Volar una primera vez alrededor del edificio con la cámara a 45°
2. Volar una segunda y tercera vez alrededor del edificio incrementando la altura y disminuyendo el ángulo respecto a la vertical
3. Se recomienda reducir el ángulo entre 5 y 10 grados por cada pasada para garantizar el suficiente traslape. Hay que tomar en cuenta que esto depende del tamaño y la distancia hacia el objeto, ya que mientras menos distancia y un objeto de gran tamaño requiere de un ángulo menor para los traslapes

Figura 18: Reconstrucción de edificios en 3D



[22]

3.8. Sistema global de navegación por satélite

El término GNSS: (Global Navigation Satellite System) es el nombre genérico que se le da a todos los sistemas de navegación por satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global tanto de forma autónoma, como en sistemas de aumentación. El primer sistema operativo fue el americano GPS. El sistema GNSS

engloba a sistemas de navegación GPS, GLONASS y a otros que mejoran su precisión llamados sistemas de aumentación. Existen otros sistemas en desarrollo como el sistema chino, COMPASS o BEIDOU BD2, y otros como GALILEO y sistemas regionales [23].

En el texto de Berne y Garrido (2014) se mencionan los tres componentes básicos de un sistema GNSS:

Segmento espacial

Compuesto por los satélites que forman el sistema tanto de navegación como de comunicación, así como las diferentes señales que envían y reciben cada uno de los receptores.

Segmento control

Formado por las estaciones centrales de seguimiento que controlan los satélites. Es el encargado de corregir las orbitas de los satélites del sector espacial, así como las de sus relojes y osciladores.

Segmento usuarios

Son todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites y empleados para el posicionamiento, ya sea estático o cinemático, navegación o para la determinación del tiempo con precisión.

3.8.1. Métodos de observación y posicionamiento GPS

Existen dos grandes grupos de metodologías para determinar la posición de un elemento: los relativos y los absolutos (según sistema de referencia). Además se pueden clasificar según el movimiento del receptor, según el momento de la obtención de coordenadas o según los observables utilizados.

Según sistema de referencia

1. Absolutos

En este tipo de metodología se utiliza un solo receptor. Este obtiene un trío de coordenadas del punto respecto al sistema geocéntrico WGS-84 que pueden ser transformadas a un sistema de referencia local de origen y orientación convencional previamente definidos. La posición se obtiene utilizando medidas de

pseudo distancia, ya sea procedentes del código C/A, P o LC2 [23][24].

2. **Relativos**

Esta metodología requiere, como mínimo, dos receptores, los cuales reciben la señal simultáneamente. Los dispositivos calculan la distancia o incremento de coordenadas entre sus respectivas antenas. El resultado es un diferencial de coordenadas X, Y y Z que permite determinar la posición del segundo receptor a partir de la del primero. La mayor ventaja de este método radica en que los errores de posicionamiento son eliminados casi por completo [23][24].

Según movimiento del receptor

1. **Estáticos**

El receptor permanece en un mismo sitio durante cierto período de tiempo. Se obtiene un trío de coordenadas X, Y, Z directamente de una antena a partir de una serie de observaciones realizadas durante un intervalo de tiempo en el que no sufren desplazamientos superiores a la precisión del sistema [23][24].

2. **Cinemáticos**

En este método se utilizan dos receptores para determinar el conjunto de coordenadas X, Y, Z. Uno de ellos se encuentra estático (base) mientras el otro se encuentra en movimiento (rover). El rover transmite la señal de su posición respecto a la base, lo cual permite obtener sus coordenadas a partir de las que se conocen del dispositivo estático [23][24].

Según el momento de la obtención de coordenadas

1. **Tiempo real**

La obtención de coordenadas y líneas base se efectúa en el mismo momento de la observación, de forma que el tiempo de cálculo es tan reducido que se puede considerar casi instantáneo. La precisión depende del observable utilizado (código o fase) y el método utilizado [23][24].

2. **Postproceso**

Las coordenadas y líneas base se obtienen después de la observación. Las posiciones se calculan en gabinete, lo cual permite trabajar con efemérides más precisas [23][24].

Según los observables utilizados

1. **Medida de código**

Se determina a partir de pseudo distancias entre el satélite y el receptor mediante la utilización del código de la portadora. Se puede medir el código C/A y L2C, o el código encriptado P [23][24].

2. Medida de fase de la portadora

Se utiliza la fase portadora para realizar la medida de la pseudo distancia. Requiere trabajar en modo diferencial o relativo [23][24].

3.9. Sistema de posicionamiento global (GPS)

Es un sistema de localización diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo. Se encuentra operativo desde 1995 y utiliza un conjunto de ordenadores y 27 satélites (24 operativos y 3 de respaldo) para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto sobre la superficie terrestre [25][15][26].

3.9.1. Funcionamiento

Los satélites se encuentran orbitando a unos 20 kilómetros de la superficie de la tierra. Los satélites emiten señales con información conocida como almanaque, el cual es un conjunto de valores con cinco elementos orbitales. El receptor GPS recibe dichas señales, utilizando la efeméride de cada satélite. Dicho dispositivo debe recibir al menos la señal de tres satélites para obtener su posición y datos del reloj atómico de cada uno [15] [26] [25].

Si se agrega la señal de un tercer o un cuarto satélite, se elimina el inconveniente de la falta de sincronización entre los relojes de los receptores GPS los relojes de los satélites. Con estos datos, el receptor es capaz de calcular el retraso de la señal, y con ello la distancia a cada satélite. Finalmente, el receptor calcula su posición en la superficie de la tierra basado datos anteriores [15] [26] [25].

3.9.2. Fuentes de error

Errores debido a la ionósfera

La ionósfera es la región de la atmósfera que se sitúa aproximadamente entre 50 y 1000 kilómetros sobre la superficie de la tierra. Posee la particularidad de que los rayos ultravioletas procedentes del sol ionizan las moléculas de gas presentes, lo cual libera electrones que producen una dispersión no lineal de las ondas electromagnéticas enviadas por los satélites. [24]. Cuando la señal del GPS atraviesa la ionosfera, su velocidad puede disminuir. Estos retrasos pueden causar errores en el cálculo de la distancia.

Errores en el reloj GPS

Estos son errores que se producen por la falta de sincronización en los relojes respecto al patrón de tiempo atómico, definido por la estación de control central, que es la que marca el tiempo atómico, a partir de una red de relojes, y a una segunda causa debido a un error relativista [23].

Efecto multitrayectoria

Se presenta cuando el receptor está ubicado cerca de una superficie reflectora como un lago o edificio. La señal no viaja directamente del satélite al receptor; primero rebota en el cuerpo y luego llega al receptor [27]. Los objetos reflectantes más comunes son la superficie terrestre, edificios, árboles, antenas, superficies de agua, etc. [23].

Geometría de los satélites visibles (Dilución de la precisión)

La dilución de la precisión es una medida de la fortaleza de la geometría de los satélites y está relacionada con la distancia entre ellos y su posición en el cielo. Depende de la composición geométrica de los satélites que se registran en el receptor, para determinar su posicionamiento, ya que es una intersección inversa. Este valor adimensional da una idea de la solidez de la figura formada por el receptor y los satélites que tiene a la vista, y definen los ángulos relativos en el espacio la geometría de los observables. EL DOP (Dilution of Precesion) se minimiza cuando hay mayor cantidad de satélites disponibles para realizar la triangulación [23] [27].

3.9.3. GPS-RTK

La tecnología GPS-RTK, consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con un alto nivel de precisión. Este método es útil para posicionamiento cinemático, aunque también aplica para estático. La señal RTK se obtiene de una red de antenas con coordenadas conocidas, las cuales envían la señal corregida al receptor del vehículo a través de sistemas de radio. De esta manera el receptor móvil recibe la señal satelital y la de las antenas RTK:, dándole una precisión muy alta [15].

La diferencia con los sistemas GPS convencionales, es que los GPS-RTK están conformados por más de un receptor que se ven afectados por las mismas fuentes de error mencionadas anteriormente. Esto permite la utilización de algoritmos de corrección para lograr una mejora en la precisión. La configuración de este sistema está dada por un receptor de referencia (estación base) que está ubicado en un punto fijo y uno o varios receptores móviles. Ambos tipos de receptores deben observar la misma constelación de satélites al mismo tiempo estando ubicados a una distancia inferior a los 20 kilómetros entre sí. Este garantiza que los errores sean los mismos y se puedan aplicar los algoritmos de corrección [27].

3.9.4. Tipos de receptores

Existen diferentes tipos de receptores en el mercado para uso civil que se adaptan a las diferentes necesidades que puede presentar cada usuario:

- Receptores de navegación
- Receptores de posicionamiento mono frecuencia
- Receptores de posicionamiento doble frecuencia

Receptores de navegación

Estos receptores son los más sencillos, económicos y portátiles. En ellos se puede visualizar las coordenadas en el sistema WGS-84, aunque algunos tienen la opción de representar las coordenadas locales. Su precisión no es tan alta ya no se pueden utilizar para aplicar técnicas diferenciales [25].

Receptores de posicionamiento mono frecuencia

Este tipo de receptor funciona en modo diferencial en donde son utilizados dos receptores al mismo tiempo. Un receptor es colocado en un punto con coordenadas conocidas al cual se le denomina “Base”. El otro receptor se desplaza sobre los puntos que se medirán, al cual se le denomina Rover: o “Móvil”. El receptor base se puede ubicar en un vértice geodésico, o bien, se puede utilizar una estación CORS (Continuously Operating Reference Station) a través de datos de internet. El que sea mono frecuencia significa que el receptor recibe solamente la onda tipo L1 [25].

Receptores de posicionamiento doble frecuencia

Este tipo de receptores reúne las características de los anteriores, con la diferencia de que estos son capaces de medir la onda portadora de tipo L2. Con esto se disminuyen aún más los errores sistemáticos, permitiendo alcanzar mayores precisiones. Viene provista de una antena con un trípode y un colector separado y enlazado por un cable a la antena [25].

3.10. Orientación de las fotografías

Orientación interna

Para el cálculo preciso de las coordenadas en 3D es necesario reconstruir las direcciones de los rayos tanto dentro como fuera de la cámara. Esto requiere de métodos matemáticos con un alto nivel de precisión. La orientación interna de una fotografía comprende la distancia focal, los parámetros de distorsión radial de los lentes y la posición del punto principal referenciado en el sistema de coordenadas de la fotografía. El punto principal se define como la intersección del eje óptico con el plano de la imagen y generalmente se encuentra muy cercano al centro de la imagen [19].

Orientación externa

La orientación externa incluye la posición X, Y, Z de la cámara y sus tres ángulos respecto a cada eje en el sistema de coordenadas del terreno. Estos parámetros pueden determinarse teóricamente utilizando sistemas GPS/INS simultáneamente a la adquisición de las fotografías. En caso contrario, existen otros métodos para calcular las coordenadas los cuales son [10]:

- Aerotriangulación digital con punto de control distribuidos en todo el bloque
- Georreferenciación: directa, la cual trabaja directamente con los datos GPS/INS del vuelo
- Orientación integrada, la cual combina los dos métodos anteriores

3.10.1. Aerotriangulación

En su texto, Sánchez define la aerotriangulación como el conjunto de procesos que se llevan a cabo en un Bloque fotogramétrico: con el objeto de reducir el número de puntos de apoyo necesarios para georreferenciar un levantamiento [12]. El objetivo de esta metodología es poder georreferenciar todos los puntos de la imagen, tomando como base puntos estratégicos (puntos de apoyo) en los cuales se obtuvo las coordenadas con un dispositivo GPS.

Puntos de apoyo

Para que el vuelo sea directamente relacionable con el terreno (que pueda ser georreferenciado) se necesitan puntos de apoyo cuya posición puede ser descrita completamente, es decir, en todos los ejes de coordenadas (x, y, z) [3]. Estos puntos son

tomados en campo con coordenadas referidas al sistema que se va a utilizar, el cual generalmente es el WGS84.

Para tener un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, es necesario el establecimiento de 5 puntos de control, distribuidos en las esquinas y uno en el centro del bloque fotogramétrico, con la finalidad de obtener una mayor precisión al momento de efectuar el proceso de restitución [26]. Los puntos de apoyo deben contar con las siguientes características, según lo indica Quirós en su texto (2014):

- Deben ser claramente identificables en todos los fotogramas en los que aparezcan
- Deben ser detalles estables en el terreno
- Se ha de marcar con anterioridad a la salida de campo la zona la que ha de estar, para cumplir con los requisitos de distribución
- Debe tener una dimensión apropiada para la escala de la fotografía
- En campo se debe poder identificar de forma clara, ser accesible y estacionario

Para vincular un punto de control base desde los vértices ya establecidos, se debe colocar un receptor GPS en el vértice más conveniente de acuerdo con las necesidades del proyecto cuyas coordenadas ya son conocidas y otro receptor en el vértice que se desea determinar sus coordenadas [26].

Los puntos de control deben ser visibles en al menos dos imágenes superpuestas. Para que el principio básico de la fotogrametría pueda ser aplicado, se necesitan al menos tres puntos en tierra por cada par estereoscópico (un par de fotos superpuestas). Con esto se puede establecer la relación espacial entre las coordenadas del terreno y las del modelo fotogramétrico [28].

3.10.2. Georreferenciación geodésica

La tecnología de georreferenciación directa surge de la combinación de dos desarrollos de la ingeniería: la navegación de precisión con sensores GPS e INS (Inertial Navigation System) y los desarrollos de las cámaras con sensores de orientación integrado [10]. La combinación de datos GPS e INS en un sistema integrado incrementa la precisión global y fiabilidad de ambas tecnologías. Por un lado, la alta estabilidad del INS en periodos de tiempos cortos suaviza los errores de observación del GPS. Por otro lado, la alta estabilidad del GPS en periodos largos ayuda a compensar los errores sistemáticos y temporales del INS [29].

3.10.3. Red geodésica

La red geodésica es un conjunto de puntos ubicados en la superficie terrestre, en los cuales se determina su posición geográfica. Estos conforman la base geométrica que sirve de referencia para todos los sistemas espaciales y son de utilidad para georreferenciar levantamientos cartográficos. Estos deben ser utilizados como los puntos de partida para los trabajos de posicionamiento [26].

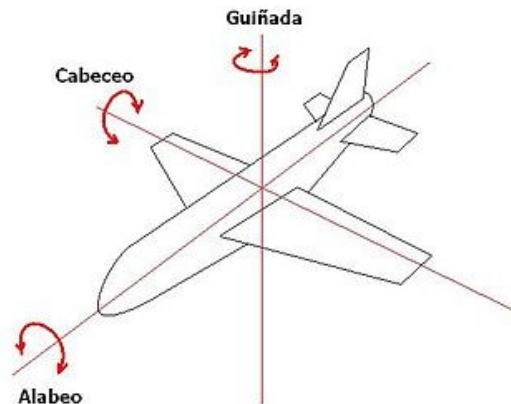
3.10.4. Red de estaciones de operación continua (CORS)

La red CORS: es una red geodésica de estaciones de referencia de operación continua. Una estación CORS se compone básicamente de un receptor GPS estático que se coloca de forma permanente en una localidad geográfica conocida. Este recolecta datos las 24 horas del día, los cuales son transmitidos por medio de una red de computadoras hacia un servidor central, en donde son almacenados para su uso posterior [30].

3.11. Control de calidad de las fotografías

Al realizar levantamientos con fotogrametría aérea, es necesario tomar en cuenta las posibles fuentes de error que pueden afectar la calidad final de las fotografías. Entre estas el cabeceo (pitch), alabeo (roll), giro lateral o guiñada (yaw) y las provocadas por la trayectoria, altura y velocidad de la plataforma que sustenta el sensor [31]. En la siguiente figura se ilustran los diferentes ángulos en un vehículo aéreo:

Figura 19: Ejes de un vehículo aéreo



[32]

Las fuentes de error principales son:

- La rotación de la Tierra
- El campo de visión demasiado ancho de algunos sensores
- Curvatura de la Tierra
- Variaciones de altitud, actitud y velocidad de la plataforma
- Efecto panorámico
- Relieve del terreno

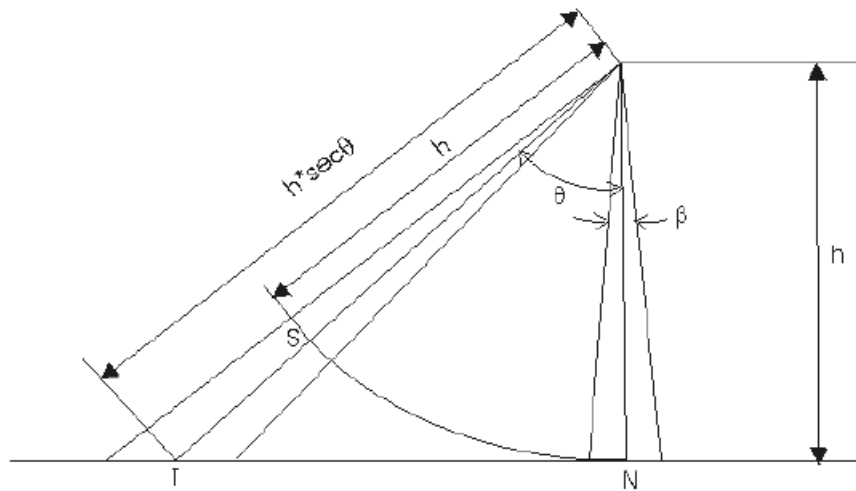
3.11.1. Distorsión por rotación de la Tierra

Este error se da principalmente en barredores o cámaras digitales lineales, ya que durante el tiempo de adquisición de las fotografías la Tierra está rotando de este a oeste. Esto produce que el punto al final de la adquisición presente un desplazamiento respecto al punto inicial. Para proporcionar la posición relativa hacia el oeste siguiendo el movimiento del terreno durante la toma de las imágenes [31].

3.11.2. Distorsión panorámica

Este fenómeno se produce cuando la dirección de apuntamiento del instrumento se aleja del nadir (proyección vertical) ya sea por tener un gran campo de visión o bien por una imagen con un ángulo de alabeo considerable. El efecto que se obtiene por esta distorsión es una alteración de la geometría de la imagen y de los detalles en los bordes de estas [31]

Figura 20: Efecto de distorsión panorámica



[31]

3.11.3. Efecto de la curvatura de la Tierra

Si la altura del vehículo aéreo es considerable (como la de un satélite) el efecto producido por la curvatura de la Tierra es parecido al efecto por distorsión panorámica. Esto quiere decir que el tamaño del píxel es mayor en los extremos de las imágenes [31].

3.11.4. Desplazamiento por relieve

Los lentes de las cámaras operan más o menos como el ojo humano, lo cual produce la perspectiva desde un solo punto de vista. Esta perspectiva produce un desplazamiento que incrementa al acercarse a los bordes de la vista. Este efecto es bastante notorio en fotos verticales, especialmente en objetos altos que parecen inclinarse respecto al centro de la fotografía. Por el contrario, los objetos con menos altura tienden a inclinarse hacia el centro de la fotografía [19].

Este desplazamiento es el cambio de posición o aspecto de una imagen a partir de su ubicación teórica en el plano de referencia (PR), debido a la distancia vertical del objeto arriba o abajo del PR. El desplazamiento en una foto vertical se produce, según líneas radiales, desde el punto principal y aumenta en magnitud con la distancia de la imagen en ese punto. En términos generales el tendido radial se expresa como [2].

$$d = \frac{r * h}{H} \quad (7)$$

Donde:

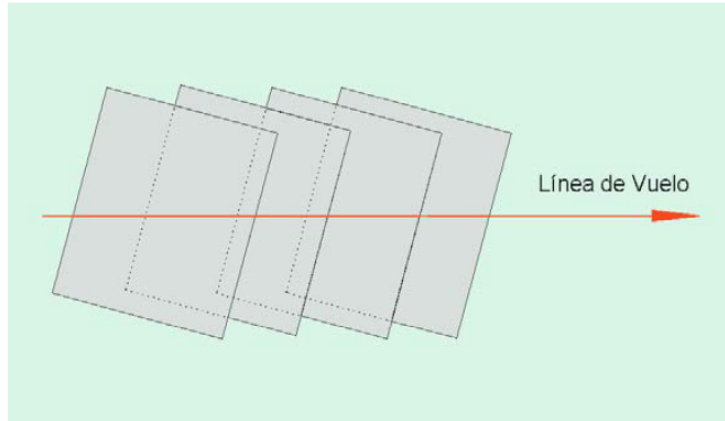
- d es el desplazamiento
- r es la distancia radial desde el punto principal hasta la imagen del punto mas alto
- h es la elevación a partir del plano de referencia
- H es la altura de vuelo sobre el mismo plano de referencia

Esta ecuación se emplea para determinar las posiciones fotográficas, respecto del PR, de las imágenes en una foto vertical.

3.11.5. Influencia del viento

Cuando el viento tiene una velocidad considerable, hace que el vehículo derive, es decir, que forme un ángulo con la dirección de ruta real. Si esta no se corrige o se hace de forma incorrecta, la faja de vuelo presentará un aspecto como el que se muestra en la siguiente [33].

Figura 21: Distorsión por deriva



[33]

3.11.6. Fajas sinuosas

Si las líneas de vuelo no son paralelas o presentan sinuosidad, pueden quedar huecos o partes sin cubrir como se muestra en la Figura 10. Esto afecta principalmente en los traslapes, ya que se pierden puntos compartidos que sirven para formar los pares estereoscópicos que permiten formar las imágenes en 3D. Normalmente estos errores son causados por fuertes vientos, relieve muy accidentado o falta de orientación [33].

Figura 22: Huecos causados por sinuosidad

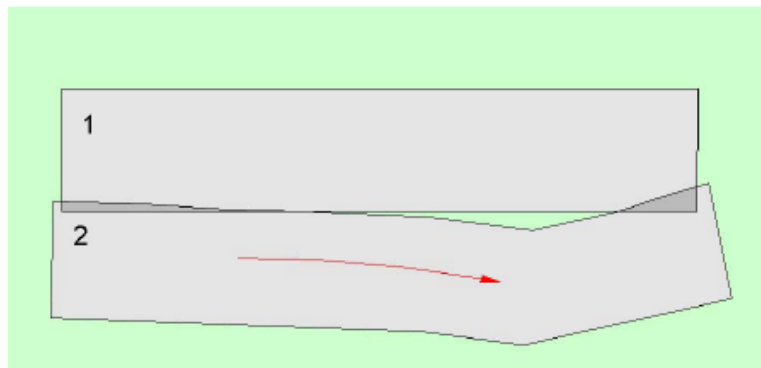


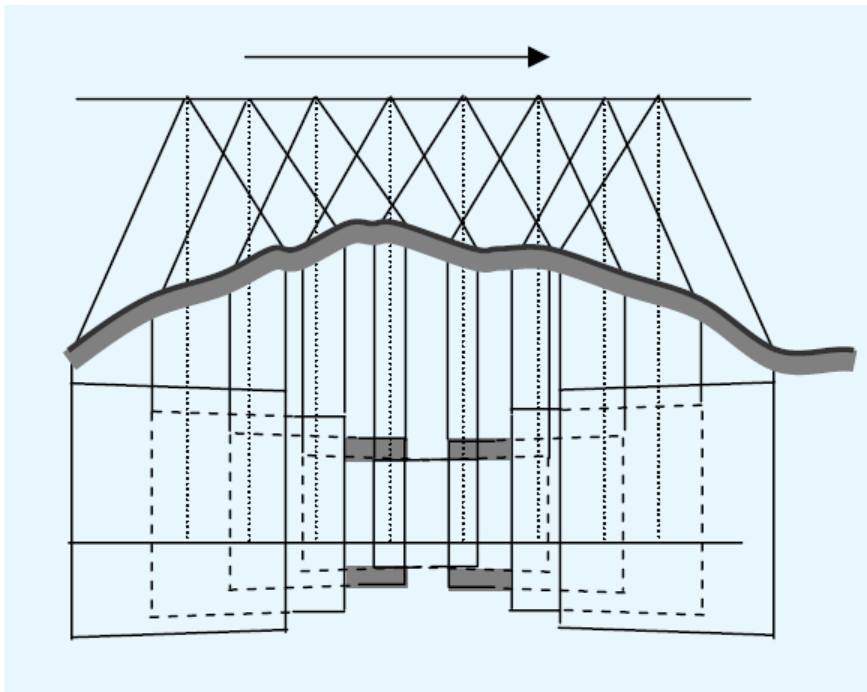
Fig.16

[33]

3.11.7. Influencia del relieve

Tal como se indica en la ecuación 1, la escala de la fotografía depende de la altura de vuelo. Si un terreno presenta una variación muy drástica de elevación, la escala variará también de forma muy marcada de un punto a otro en la misma fotografía. Siguiendo con este principio, las fotografías cubren una menor zona a medida que el terreno está más cerca del vehículo. Dicho en otras palabras, la cobertura fotográfica disminuye en zonas más elevadas [33]. Por ello debe usar el intervalo de fotogramas y las distancias entre líneas de vuelo según la cota más alta terreno, o bien, utilizando una media de alturas. Esto para asegurar un recubrimiento adecuado en las fotografías.

Figura 23: Variación de la cobertura fotográfica (escala) según la elevación del terreno

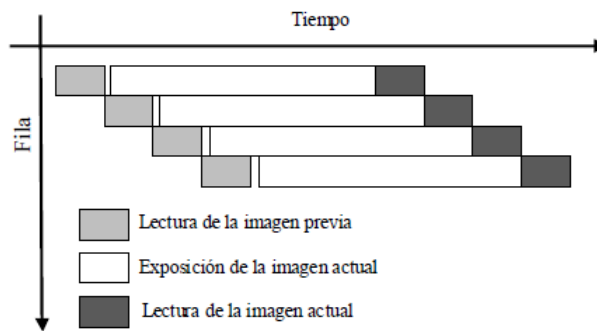


[33]

3.11.8. Efecto Rolling Shutter

Muchas cámaras de baja calidad cuentan con sensores CMOS: (Complementary metal oxide semiconductor) en lugar de CCD. La diferencia principal es que los de tipo CCD tienen conexiones interlineales y para obtener una imagen todos los fotodiodos se exponen a una escena simultáneamente. Por el contrario, la estructura secuencial de los CMOS hace que cada línea de la imagen adquirida se exponga en un instante de tiempo diferente [34]. Esto crea distorsiones geométricas cuando el objeto o la cámara se mueven durante la captura de imágenes. El esquema de forma de operación de captura se ilustra en lo siguiente:

Figura 24: Toma de fotografías con sensor CMOS



[34]

Lo anterior representa que cada fila de la imagen no se superpone. En cambio, la lectura de cada fila comenzará después de que la lectura anterior haya finalizado. En la fotogrametría aérea esto puede llegar a ser un gran problema, considerando que muchos drones tienen que volar a grandes velocidades para cubrir grandes extensiones de área. Sin embargo, en la actualidad, algunas cámaras con sensores CMOS corrigen este error en el modo fotografía al exponer primero los fotodiodos, luego cerrando las cortinas y, por último, leyendo la información. No obstante, en el modo video puede seguirse presentando el mismo error [34] [35].

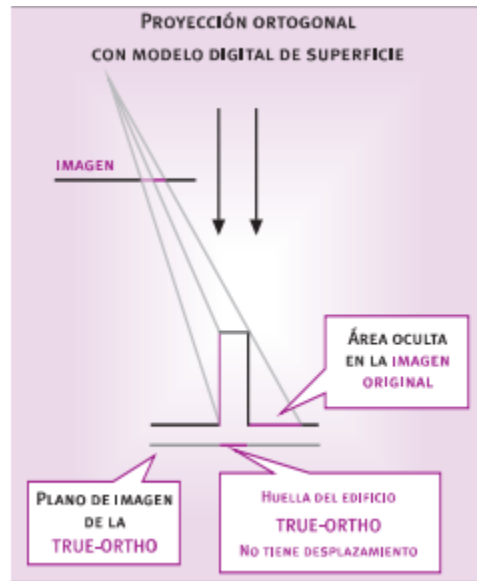
Algunas aplicaciones como Pix4Dmapper, utiliza desde su versión 2.1 un algoritmo de corrección que trata a cada línea de píxeles como una imagen independiente con su propia orientación, relativa a la velocidad del drone. Esta corrección hace una estimación de la posición de la cámara sin importar su velocidad, lo cual permite que los drones puedan volar más rápido sin afectar su precisión [36].

3.11.9. Efecto Fantasma

Las ortofotos son tan precisas como lo es el MDS. Es muy importante contar con un modelo de superficie bien georreferenciado y preciso para que los objetos humanos sean proyectados a su verdadera posición geométrica. El problema es que las áreas

ocultas por los objetos no son visibles en la imagen. Por ejemplo, hay ocasiones en que los techos ocultan los elementos debajo de ellos. Si las áreas no son detectadas por el software de rectificación, la ortoproyección lo rellenará exactamente con el contenido de la imagen. Entonces se crea el efecto conocido como efecto fantasma (ghost effect) [14].

Figura 25: Efecto Fantasma en la toma de fotografías aéreas



[14]

4.1. Determinación del tipo de proyecto

4.1.1. Producto esperado

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal del proyecto es la generación de ortofotos y un modelo de elevación digital del casco urbano de la Antigua Guatemala. Una vez determinados los dos tipos de productos esperados, se definen los parámetros adecuados para la obtención de fotografías y de esta forma asegurar que cuenten con la calidad necesaria para representar la información esperada. Este paso es indispensable para garantizar que la toma de imágenes e información adicional se haga de forma correcta.

4.1.2. Determinación de equipo disponible

Es de gran importancia conocer desde el comienzo el equipo con el que se cuenta para realizar el levantamiento. Partiendo de esto, se determinan características como la extensión máxima que se es posible abarcar y la calidad que se puede obtener de las fotografías. También se debe establecer si el dron es capaz de georreferenciar las imágenes por sí mismo a través de dispositivos RTK incorporados. En caso contrario, se debe utilizar equipo adicional GPS para poder obtener puntos de control en campo.

Equipo GPS utilizado

El drone a utilizar en este proyecto no cuenta con la tecnología RTK para georreferenciar las imágenes en tiempo real. Por ello, fue necesario utilizar dos dispositivos GPS, una base y un rover. Ambos receptores son del fabricante Trimble, modelo R8. La base sirvió como receptor principal en la estación de trabajo y el rover se utilizó para medir todos los puntos de control a través del método estático.

Figura 26: Trimble R8



Fuente: [37]

Drone utilizado

En este caso se contaba con un drone multirrotor de 4 hélices, marca DJI y modelo Phantom 4 Pro para la toma de imágenes. Las características especificadas por el fabricante se listan a continuación:

Cuadro 4: Especificaciones del DJI Phantom 4 Pro

Velocidad de viento máxima soportada	10 m/s
Tiempo de vuelo máximo	30 minutos
Velocidad máxima	20 m/s
Sensor cámara	1" CMOS
Pixeles efectivos	20 MP
Tamaño imagen	5472 x 3648 pixeles
Memoria máxima soportada tarjeta SD	64 GB

Figura 27: DJI Phantom 4



[38]

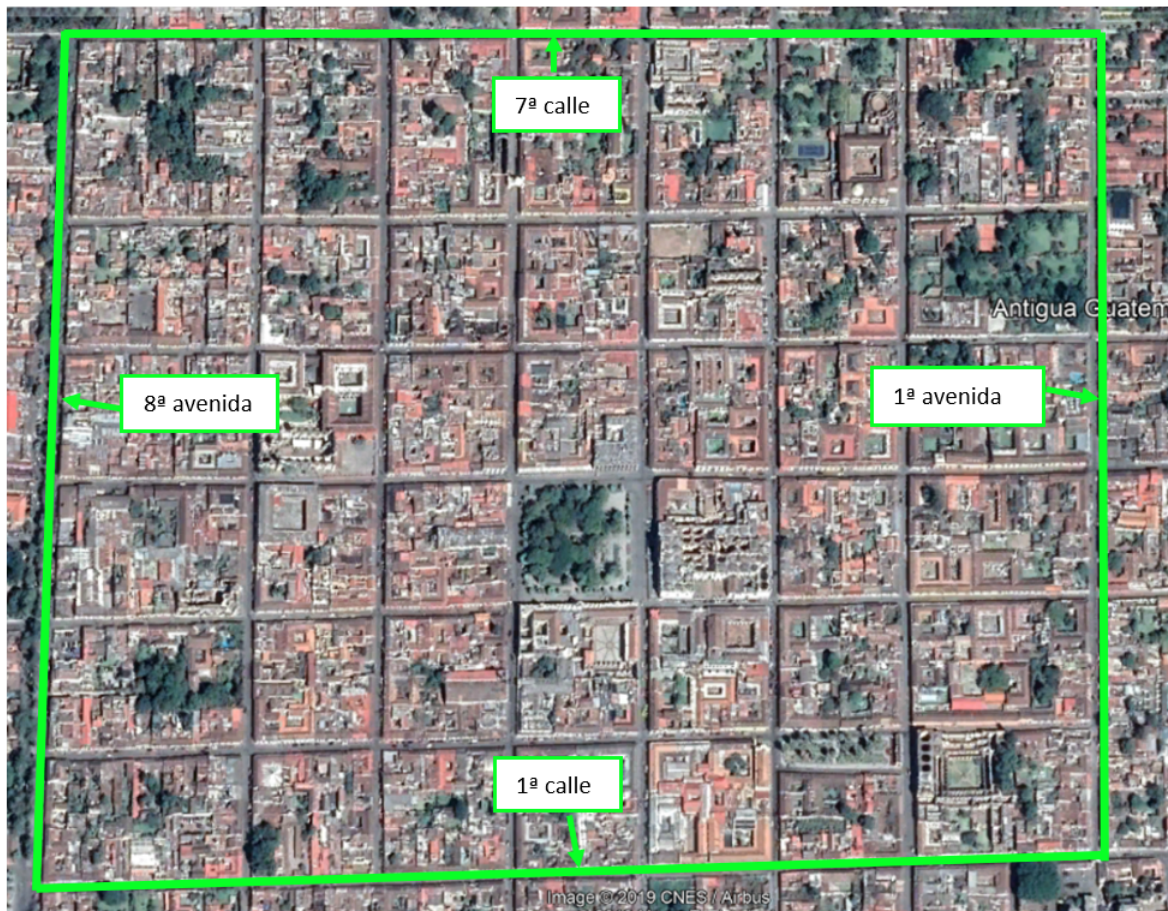
Se debe tomar en cuenta que los parámetros especificados por el fabricante son estimaciones realizadas con base en pruebas hechas en ambientes controlados. El usuario del drone debe efectuar varias pruebas para verificar realmente la duración de la batería del drone. Existen ciertos factores, que se mencionarán mas adelante, que afectan dicho parámetro. Además la velocidad máxima del drone no es realista, ya que no toma en cuenta la resistencia que provoca el viento en el dispositivo.

4.2. Planificación del vuelo

4.2.1. Delimitación del área de estudio

Luego de revisar el equipo disponible y el tipo de proyecto, se procedió a delimitar el área de interés para realizar el levantamiento. La superficie a trabajar fue el casco urbano de Antigua Guatemala. Dado las características del drone a utilizar, fue factible analizar desde la 1ª calle y 1ª avenida hasta la 7ª calle y 8ª avenida (Avenida Santa Lucía), tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 28: Vista en satélite del área de trabajo



Fuente: Google Earth Pro

El área total se estimó preliminarmente utilizando Google Earth Pro. El dato que se obtuvo fue de aproximadamente 70,100 metros cuadrados (70.1 hectáreas) para la superficie total y 3.36 kilómetros para el perímetro.

4.2.2. Determinación de parámetros de vuelo

Elección del GSD

Este parámetro define la resolución final que tendrán las imágenes. Mientras más alto sea este valor, menor resolución tendrán las fotografías y viceversa. De este parámetro depende la altura de vuelo, ya que mientras más alto vuele el dron cada píxel cubrirá más área, pero se tendrán menos píxeles en la fotografía lo que sacrifica la resolución. Por el contrario, una menor altura disminuirá el área que cubre cada píxel, a cambio de una mejor calidad de imagen.

Escoger el GSD apropiado dependerá de lo que se espera del proyecto. Por ejemplo, si las fotografías serán utilizadas para catastro, el RIC: (Registro de Información Catastral) y el IGN: (Instituto Geográfico Nacional) exigen un mínimo de resolución de 0.3 metros (30 cm/píxel) para que las ortofotos cumplan con cierto nivel de resolución. Los drones son capaces de ofrecer resoluciones entre 0.02 y 0.08 m aproximadamente (2 – 8 cm/píxel), lo cual da altos niveles de precisión.

El GSD se ve afectado por varios factores, además de la altura de vuelo. Ya que en ocasiones es necesario mantener los traslapes dentro de los porcentajes permitidos, un GSD mayor aumenta la huella de la imagen y facilita mantenerlos con menos pasadas. No obstante, hay que tener en cuenta que aumentar el GSD empeora la calidad de las imágenes. En este caso, si no se desea sacrificar la resolución se deben variar otros parámetros como la resolución de la cámara o su distancia focal.

El valor de GSD que se utilizó para este proyecto fue de 4.00 cm/píxel, el cual asegura tener un buen nivel de precisión y calidad de imágenes.

Traslapes (Overlap)

En un plan de vuelo siempre se tienen que tomar en cuenta los traslapes, ya que de ellos depende la calidad final de las ortofotos que se obtengan. Mientras más porcentaje de traslape exista, mayor será la cantidad de puntos en común entre fotografías por lo que los datos obtenidos tendrán mayor precisión. Se distinguen dos tipos de traslapes, el longitudinal o frontal (frontlap) y el transversal o lateral (sidelap).

Traslape longitudinal

El traslape longitudinal es la zona que comparten dos imágenes tomadas en la dirección del vuelo del dron. Se recomienda que este porcentaje se encuentre entre 75 % y 85 % . Si el valor se deja por debajo de este rango, es probable que no se logre una reconstrucción apropiada de las fotografías debido a la falta de puntos en común entre ellas. Esto causa una pérdida de calidad en el producto final. Por el contrario, un exceso no contribuye a una mejora en la calidad y se incrementan en gran medida

la cantidad de fotos que el dron debe tomar, lo cual hace que se tengan que procesar fotos adicionales innecesariamente.

Traslape lateral

El traslape lateral es la zona que comparten dos imágenes en diferentes trayectorias de vuelo paralelas, una al lado de la otra. El porcentaje de traslape recomendado se encuentra entre 60 % y 80 % . De igual forma que el anterior, un porcentaje menor al rango afecta la calidad del producto final y un porcentaje mayor se vuelve ineficiente debido a la gran cantidad de fotografías que se obtienen sin un aumento considerable en la calidad.

La ventaja del traslape longitudinal es que, sin importar su valor, el tiempo de vuelo no se ve afectado, ya que en su misma ruta el dron solo deberá ajustar la velocidad de disparo para cubrir el porcentaje de área común entre fotografías. En cambio, el traslape transversal si tiene un efecto considerable en el tiempo de vuelo. Esto se debe a que mientras más alto sea el porcentaje, se debe disminuir la distancia entre pasadas, lo que hace que se necesiten más pasadas para cubrir la misma área.

Entonces, dependerá del criterio del piloto decidir qué porcentaje será el apropiado según lo que busca en el proyecto, tomando en cuenta que se deben respetar los mínimos y que un porcentaje alto requiere más tiempo de vuelo, batería y tiempo de procesamiento de imágenes. En este caso se decidió mantener ambos porcentajes de traslapes en 75 % para respetar el mínimo que garantice que el producto final cuente con la calidad requerida.

Altura de vuelo

Este parámetro es de gran importancia ya que de este depende la resolución final de las fotografías, la cantidad de pasadas que se tienen que hacer según el porcentaje de traslape y el tiempo de vuelo. Lo primero que se debe hacer es informarse sobre la altura máxima permitida de vuelo para vehículos aéreos no tripulados. En el caso de Guatemala, la altura máxima que permite la Dirección de Aeronáutica Civil es de 400 pies (120 metros).

Mientras mayor sea la altura de vuelo, se tendrá una mayor cobertura de área por fotografía y se necesitaran menos pasadas para tomar las imágenes necesarias y, por tanto, un menor tiempo de vuelo. Sin embargo, esto implica perder resolución en las fotos, por lo que una altura de vuelo excesivamente alta no permitirá tener un producto de calidad. En caso contrario, si la altura de vuelo es baja, se consiguen imágenes con un alto nivel de detalle, pero esto requeriría de un mayor número de pasadas para cubrir toda la superficie con los traslapes necesarios. Una altura de vuelo muy baja también aumenta las probabilidades de encontrarse con diferentes obstáculos. Por ello, debe buscarse un balance adecuado para volar a una altura que permita hacer el levantamiento de forma adecuada.

La altura de vuelo se calcula en función del GSD esperado. Es posible utilizar alguna aplicación que permita realizar los cálculos de forma automática o utilizando ecuaciones para calcularla a mano. En este caso se hizo de ambas formas para hacer una comparación entre los resultados obtenidos con la aplicación y los obtenidos con las ecuaciones. Para poder realizar los cálculos fue necesario investigar parámetros adicionales de la cámara del Phantom 4.

Cuadro 5: Parámetros adicionales de la cámara del Phantom 4 Pro

Parámetros cámara Phantom 4	
Ancho	5742 pixeles
Alto	3648 pixeles
Resolución	20 MP
Tipo sensor	CMOS
Tamaño sensor	1 in
Ancho sensor	12.80 mm
Alto sensor	9.60 mm
Distancia focal (equivalente a 35 mm)	24 mm
Distancia focal real	8.88 mm

[38]

Para calcular la altura de vuelo, cobertura de las imágenes y número de pasadas se utilizan las siguientes expresiones, partiendo de los parámetros anteriores:

$$H = GSD * s_2 * \frac{f}{w_s} \quad (8)$$

Donde:

- w_s es el ancho del sensor en m
- GSD esta en m/píxel
- f es la distancia focal en m
- s_2 es el ancho de la cámara en píxeles

Tomando en cuenta las características del drone listadas en el cuadro anterior, y con un GSD esperado de 2.4 cm/píxel, se utilizó la expresión anterior para determinar la altura de vuelo necesaria para la toma de fotografías. El dato obtenido fue de 90 metros, el cual se encuentra dentro de los límites establecidos por aeronáutica civil y es segura para evitar encontrarse con cualquier tipo de obstáculo.

Para calcular la cobertura de la superficie de una fotografía primero se determinó la longitud en metros que cubre la imagen a cada lado con las siguientes expresiones:

$$S_1 = \left(\frac{h_s}{f}\right) * H \quad (9)$$

$$S_2 = \left(\frac{b_s}{f}\right) * H \quad (10)$$

Donde:

- S_1 es el alto en metros que cubre la fotografía
- S_2 es el ancho en metros que cubre la fotografía
- h_s es el alto del sensor en m
- b_s es el ancho del sensor en m

Teniendo ambos valores de cobertura lineal, y dado que la imagen es un rectángulo, el área se obtiene el área multiplicando ambos valores entre sí:

$$S = S_1 * S_2 \quad (11)$$

El último valor que se debe obtener es la cantidad de pasadas que debe realizar el dron para tomar las imágenes con los porcentajes de traslapes necesarios. Lo primero es determinar la distancia entre pasadas, calculada con la ecuación 6 presentada en el capítulo anterior. Si se divide la longitud total de unos de los lados de la superficie del área de vuelo por la distancia entre pasadas, A, se obtiene un dato aproximado de líneas de vuelo que debe realizar el dron.

4.2.3. Estimación de tiempo de vuelo

Para la estimación de tiempo de vuelo se utilizó la aplicación Pix4D capture, la cual solo está disponible para dispositivos móviles o tablets con sistema operativo Android o IOS. Esta permite ingresar los parámetros previamente establecidos para determinar un tiempo aproximado de vuelo. Para tener un dato cercano se debe conocer la altura de vuelo, el GSD, los traslapes, la velocidad de vuelo y el área que se quiere cubrir. En caso de áreas muy extensas, es posible estimar cuántos vuelos serán necesarios según la duración aproximada de la batería del dron.

Al ingresar estos parámetros, Pix4D realiza una estimación de tiempo de vuelo tomando en cuenta el modelo del dron que se va a utilizar. La aplicación contiene una base de datos con información sobre varios modelos del fabricante DJI para obtener características como velocidad máxima, tiempo de duración de las baterías y especificaciones de la cámara. Partiendo de estos datos, la aplicación da una advertencia si considera que el tiempo de vuelo planificado para cubrir el área de estudio excede las capacidades del dron. En este caso es mejor optar por realizar varios vuelos más pequeños para cubrir la totalidad de la superficie.

Velocidad de vuelo

La velocidad a la que el dron realiza las pasadas es un factor importante en la toma de fotografías. Esto se debe a que si el vuelo se realiza con una velocidad muy alta se da el efecto Rolling shutter (efecto persiana), un error común en las fotografías tomadas en movimiento. Este efecto crea distorsiones geométricas en los mapas debido a que la distancia entre la posición de la cámara cuando está leyendo la primera fila de píxeles y la posición cuando está leyendo la última puede ser de hasta 1 metro. Una imagen con este error afecta en gran medida la capacidad de un software de estimar con precisión la orientación interna y externa de la imagen, y, por tanto, la precisión de su geometría [36].

Usualmente la mayoría de los usuarios prefiere usar la velocidad máxima del dron, ya que minimiza en gran medida el tiempo de vuelo y el uso de batería. Sin embargo, no toman en cuenta el error que esto causa en la toma de las fotografías. Por ello es importante revisar con que sensor cuenta la cámara del dron o si se tiene algún software que tenga un método de corrección de este efecto y así escoger la velocidad de vuelo apropiada. En este caso se escogió una velocidad de vuelo no tan alta para minimizar el efecto debido a que la cámara del Phantom 4 cuenta con un sensor de tipo CMOS. Además el programa que se utilizará para el análisis de imágenes cuenta con un algoritmo para la corrección de este error.

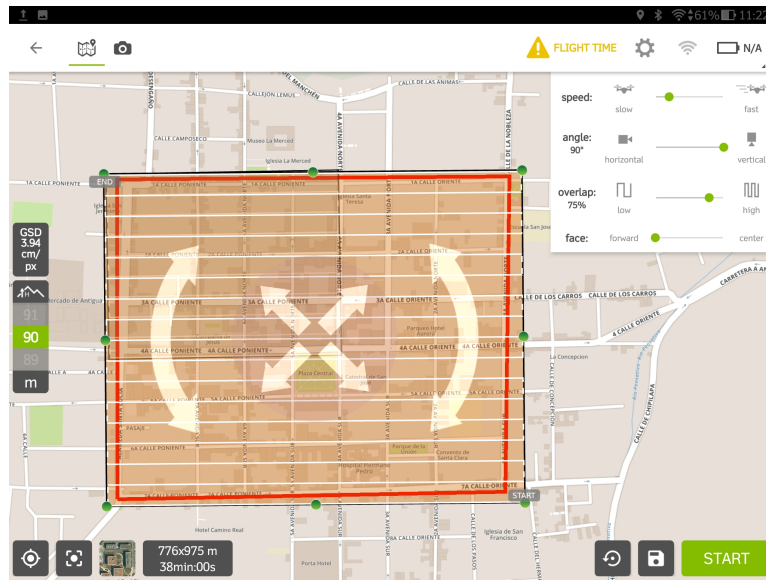
A continuación se presenta un resumen de los parámetros escogidos hasta el momento para la estimación del tiempo de vuelo:

Cuadro 6: Resumen de parámetros de vuelo

GSD	2.4 cm/píxel
Altura de vuelo	90 m
Traslape longitudinal	75 %
Traslape transversal	75 %
Velocidad	Moderada

Los parámetros anteriores se ingresaron en la aplicación Pix4D para obtener un dato preliminar sobre el tiempo de vuelo. El resultado se muestra en la siguiente figura:

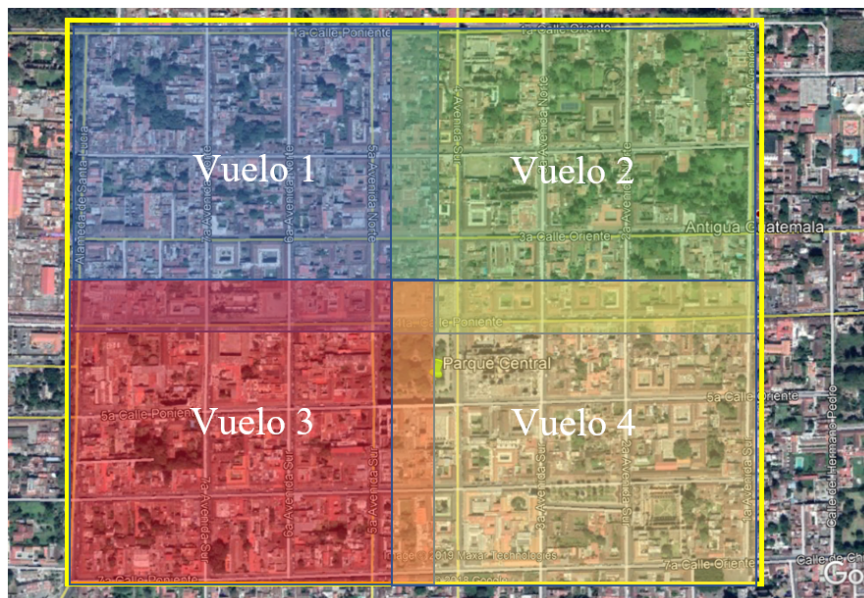
Figura 29: Estimación de tiempo de vuelo con Pix4D



Fuente: Elaboración propia

Evidentemente se observa que el área es muy extensa para cubrirla con un solo vuelo. El tiempo estimado es de 38 minutos, y la batería de un multirotor no supera los 20 minutos de vuelo. Por ello se decidió dividir el área de trabajo en 4 cuadrantes, lo cual implica la realización de 4 vuelos. Los cuadrantes se dividieron de forma que cada uno abarcará la misma proporción del área total. Los vuelos se planificaron de la siguiente manera:

Figura 30: Distribución de vuelos para el casco urbano



Fuente: Elaboración propia

Para cada vuelo se estimó el área y tiempo de vuelo aproximado. En resumen se obtuvo lo siguiente:

Cuadro 7: Vuelos estimados para el proyecto

No. Vuelo	Tiempo estimado (minutos)	Área por cubrir (hectáreas)
1	17.5	22.18
2	17.5	22.18
3	17.5	22.18
4	17.5	22.18
Total	70	88.72

El área total de los vuelos es mas grande que la estimada con Google Earth debido a que se dejó una zona de traslape entre cada cuadrante para que al unirlos existan puntos en común en las imágenes que mejoren la calidad del modelo final. Es el mismo principio que los traslapes entre fotografías en cada vuelo. Teniendo en cuenta esto se es posible tener un estimado del tiempo total que se requiere para hacer el levantamiento. En este caso es 1 hora con 10 minutos, sin tomar en cuenta el tiempo que le toma al dron despegar, ir al punto de inicio y regresar al punto de despegue para aterrizar.

4.2.4. Reconocimiento del lugar

Este paso es clave previo a la realización del vuelo, ya que permite identificar posibles obstáculos, condiciones meteorológicas, e incluso animales con los que el dron puede colisionar al ejecutar el vuelo. En los pasos anteriores se ha discutido sobre como tener una idea del lugar utilizando diversas fuentes de información geográfica y climatológica. Sin embargo, siempre que sea posible, conocer el lugar físicamente ayuda a identificar variables que no son visibles en mapas y afectan el vuelo del dron.

Los factores mas comunes que afectan en campo son:

- Obstáculos altos
- Condiciones meteorológicas desfavorables

Obstáculos

Aunque el dron haga su recorrido en el aire, siempre cabe la posibilidad de chocar con un obstáculo. Los obstáculos que comúnmente se encuentran en un área de estudio son edificios, vegetación e instalaciones de iluminación pública. Con menor frecuencia también se encuentran equipos de construcción como grúas o bien torres de comunicación. Por ello se vuelve indispensable reconocer el lugar para poder identificar posibles obstáculos para volar a una altura segura y que permita al dron despegar y aterrizar sin colisionar con algún objeto.

Condiciones meteorológicas

Antes de realizar el levantamiento se deben consultar las condiciones meteorológicas de un lugar previo a la realización del vuelo, principalmente factores como la lluvia y el viento. El sol y las nubes también se consideran como factores influyentes en el levantamiento, ya que la cantidad de luz afecta la calidad de las fotografías. Es recomendable utilizar cualquier fuente de información sobre pronósticos del tiempo para evitar lluvias y días con demasiadas nubes que puedan interferir con la luz. Además, es útil contar con instrumentos que midan la velocidad del viento, para evitar exceder la capacidad que tiene el dron de soportar las ráfagas en diferentes direcciones. Generalmente, vientos mayores a 35 km/h no son recomendables para volar.

Elección de punto de despegue

Un paso que se debe tomar en cuenta en la planificación de vuelos es la elección de un punto de despegue apropiado para el dron. Debe ser un lugar abierto, libre de obstáculos como vegetación, edificios, o infraestructura urbana. Además debe permitir al operador del dron tener contacto visual en todo momento con el dispositivo y mejor si no hay objetos o antenas cercanas que interfieren con la señal entre el control y el vehículo.

Para este proyecto se tomaron en cuenta tres posibles puntos de despegue, los cuales se analizan a continuación.

Cuadro 8: Ventajas y desventajas del Cerro de la Cruz

Ventajas	Desventajas
Lugar alto que permite tener visualización del dron en todo momento	Lejano de las áreas de trabajo inferiores, por lo que el tiempo de vuelo aumenta considerablemente
Libre de vegetación y obstáculos cercanos	Se requiere seguridad por estar alejado de las zonas principales
Alejado de las zonas urbanas donde se molesta a los civiles	El estar lejos aumenta la probabilidad de tener interferencia en la señal

Cuadro 9: Ventajas y desventajas del Parque Central

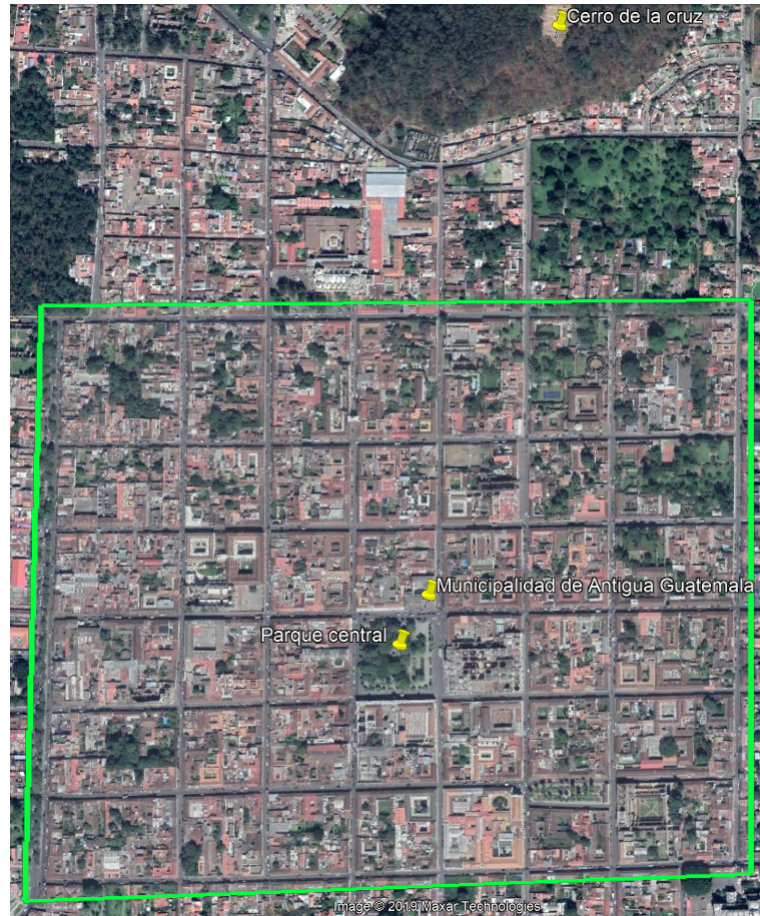
Ventajas	Desventajas
<p>Lugar central que permite tener todos los vuelos a la misma distancia</p> <p>Se reducen la distancia que el drone tiene que viajar de regreso al punto de origen</p>	<p>Tiene vegetación ligera que interfiere con la maniobrabilidad del drone</p> <p>Se requiere hacer un perímetro con seguridad para evitar que los civiles interfieran con el trabajo</p> <p>No se tiene visibilidad del drone en todo momento por estar en un lugar bajo</p>

Cuadro 10: Ventajas y desventajas del edificio de la Municipalidad de Antigua

Ventajas	Desventajas
<p>Se tiene visión del área de estudio y del drone todo el tiempo</p> <p>Cercano a todos los vuelos</p> <p>Es un lugar privado, por lo que no hay interferencia de personas</p>	<p>Requiere de pedir autorización para poder hacer uso de las instalaciones</p> <p>La exposición directa al sol dificulta la visibilidad de la pantalla de los dispositivos y del drone a distancia</p>

La ubicación dentro del área de estudio de cada punto de despegue se muestra en el siguiente mapa:

Figura 31: Ubicación de las alternativas para punto de despegue



Fuente: Google Earth Pro

Finalmente, se decidió utilizar la municipalidad como base para despegar y e instalar la base del equipo GPS. Esto debido a la seguridad que ofrece el lugar, además de tener una buena visión del campo de trabajo y del dron en todo momento. También ofrece privacidad para que los civiles no interfieran con el trabajo y tampoco se les moleste colocando el equipo en un área pública como el Parque Central.

En este caso fue necesario tomar en cuenta una estimación de la altura sobre el nivel del suelo del lugar de despegue. Al momento de despegar, el dron utiliza como referencia su punto de partida para calcular la altura de vuelo. En este caso la altura deseada era de 90 metros. Tomando en cuenta que el punto de despegue fue el techo de la municipalidad, el cual se encuentra a aproximadamente 10 metros de altura respecto al suelo, fue necesario reducir esos 10 metros al momento de programar el vuelo en la aplicación. Aunque en la aplicación diga que se esta volando a 80 metros, estos son respecto al nivel de techo. Sumando los 10 metros del edificio, en realidad se tiene una altura de vuelo de 90 metros.

4.3. Realización de los vuelos

Ya teniendo los vuelos planificados con sus respectivos parámetros, se procedió a realizar la toma de las fotografías. En campo, se debe buscar un lugar estable donde colocar el dron para que despegue de forma segura. Si la superficie tiene polvo o vegetación, se recomienda colocar un pad de aterrizaje para dron como el que se muestra en la figura:

Figura 32: Pad de aterrizaje para drones



[38]

Cuadro 11: Resumen de vuelos realizados

Vuelo	Tipo	Traslape	Angulo cámara (deg)	Tiempo vuelo (mm:ss)	Ancho (m)	Alto (m)	Área (hectáreas)
1	Grilla 2D	70 %	90	20:30	409	544	22.2
2	Grilla 2D	70 %	90	20:09	410	514	21.1
3	Grilla 2D	70 %	90	19:42	410	514	21.1
4	Grilla 2D	70 %	90	20:57	410	537	22.0

Los pasos a seguir en cada vuelo fueron:

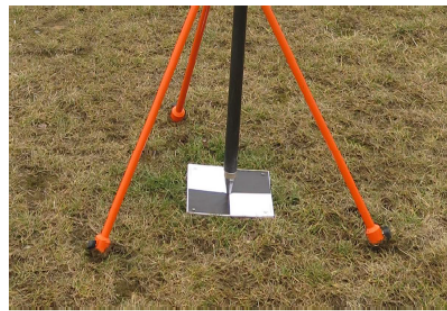
1. Revisar la hoja de reconocimiento para verificar la presencia de obstáculos identificados en el reconocimiento
2. Conectar el dispositivo móvil o tablet al dron. Verificar que el dron tenga comunicación con suficientes satélites para identificar su punto de despegue y triangular su posición.
3. Revisar que el área a medir sea la correcta
4. Revisar los que los parámetros sean los mismos que los del plan de vuelo
5. Revisar que el tiempo de vuelo no exceda la capacidad de la batería instalada
6. Iniciar el vuelo. Verificar constantemente en el dispositivo móvil el estado del vuelo, la ubicación del dron y el estado de la batería
7. Aterrizar el dron de forma cuidadosa

4.4. Puntos de control

4.4.1. Establecimiento de puntos de control

El siguiente paso posterior a la planificación del vuelo, fue establecer los objetos que servirían como puntos de control para georreferenciar las imágenes. Idealmente estos deben ser fáciles de reconocer en las fotografías y que permanezcan fijos en una ubicación determinada. También es conveniente utilizar pintura en aerosol o dianas para marcar puntos aleatorios dentro de la superficie que se va a medir, como se ve en las siguientes figuras:

Figura 33: Utilización de dianas para puntos de control



[39]

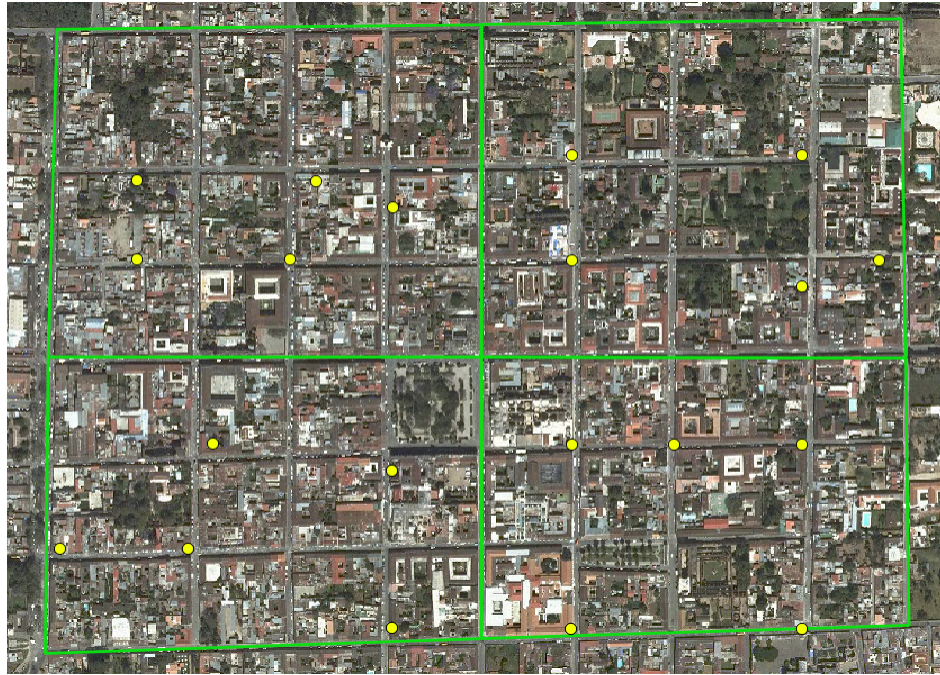
Figura 34: Utilización de pintura en aerosol para puntos de control



[40]

En este caso, por ser un área urbana, no se deben dejar dianas en el suelo porque es probable que otras personas las muevan. De igual la forma, no es posible utilizar pintura en aerosol porque se consideraría daño a la propiedad pública. Por ello, se optó por utilizar de referencia las tapaderas del drenaje, las cuales fueron georreferenciadas en un proyecto anterior realizado por la Universidad del Valle. Se obtuvo el mapa de las tapaderas referenciadas previamente, y se verificó cuáles estaban dentro del área de estudio. Se escogieron 5 puntos de control por cada cuadrante, teniendo en total 20 puntos de control para todo el proyecto. La ubicación aproximada de las tapaderas se ve en el siguiente mapa:

Figura 35: Ubicación de las tapaderas que servirán de puntos de control



Fuente: Ortofoto del Instituto Geográfico Nacional, 2010

Inaccesibilidad a puntos de control

En ocasiones las herramientas de información geográfica permiten ubicar puntos de control favorables dentro del área de estudio. Sin embargo, esto no garantiza que los puntos sean accesibles para su medición. Esto se debe a que existen obstáculos que dificulten su acceso, o bien, estar dentro de una propiedad privada. Por ello, es importante reconocer el lugar, previo a la realización del vuelo y la medición de puntos para analizar la accesibilidad a los puntos y buscar diferentes alternativas en caso de que no sea posible medir un punto específico.

Por ejemplo, en este proyecto se escogieron algunas tapaderas utilizando la información geográfica proporcionada. En el mapa parecían de fácil acceso, pero en ocasiones, al buscar el punto en campo se complicaba el colocar el equipo exactamente sobre la tapadera deseada. Esto se discute con más detalle en la metodología de medición de puntos.

4.4.2. Toma de puntos

La toma de puntos constó de dos partes. La primera fue instalar la base en el techo de la municipalidad de la Antigua, desde se harían también los vuelos del dron (estación base). La segunda parte, fue medir las coordenadas de cada uno de los puntos de control con el dispositivo móvil (rover). La medición de puntos se planificó de la siguiente manera para aprovechar la vía de las calles:

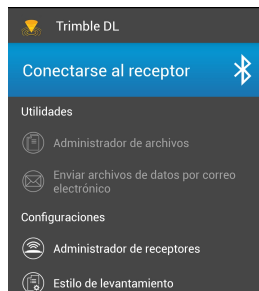
Figura 36: Plan de toma de puntos



Fuente: Ortofotografía del Instituto Geográfico Nacional, 2010

Los receptores utilizados se controlan por medio de una aplicación de Trimble para dispositivos Android. En ella se configura el tipo de medición y otros parámetros necesarios para la toma de datos. A continuación se muestra la interfaz de la aplicación:

Figura 37: Interfaz de la aplicación de trimble para Android



Fuente: Aplicación Trimble para Android, 2019

La medición se llevó a cabo en dos días por las condiciones climatológicas. El primer día se midieron 7 puntos y el resto en el segundo.

Lo primero que se debe al momento de realizar el cálculo de las coordenadas de un punto específico es iniciar la medición de la base siguiendo los siguientes pasos:

1. Instalar el dispositivo base en un lugar seguro y donde haya poco riesgo de manipulación por terceros. Debe ser un lugar abierto para tener buena recepción de satélites y comunicación con el Rover.
2. Iniciar la toma de datos de la base. Hay que tomar en cuenta que el tiempo de medición debe ser suficiente para medir todos los puntos de control. En este caso se le asignó 6 horas.

Figura 38: Instalación de la base en el techo de la Municipalidad



Con la base instalada se procedió a medir cada uno de los puntos de control. En cada punto realizó el siguiente procedimiento:

1. Se nivela la base para montar el receptor. Se debe buscar un lugar abierto, y que no interrumpa el paso de personas o vehículos.
2. Se conecta el receptor al dispositivo móvil.
3. Se configuran los parámetros de medición y el tiempo de toma de datos. En este caso, algunos puntos fueron de 10 y otros de 15 minutos.
4. Verificar la comunicación con suficientes satélites (al menos 4) antes de tomar los datos.
5. Se inicia la toma de datos.

6. Se almacenan los datos y se repite el procedimiento en los demás puntos.

Figura 39: Medición de los puntos de control



5.1. Equipo y software disponible

5.1.1. Hardware

Lo primero que se debe verificar al procesar las fotografías son las características del hardware disponible, ya sea laptop o un pc. Debido a que el procesamiento de imágenes demanda una gran cantidad de recursos, es necesario un equipo que cuente con tarjeta de video dedicada, un procesador i7 o mejor y al menos 8 GB de RAM. En este caso, se disponía de una laptop con las siguientes características:

Cuadro 12: Especificaciones de ordenador utilizado

Procesador	Intel Core i7
Memoria RAM instalada	12 GB
Tarjeta de video	NVIDIA GeForce 940 (2GB)
Sistema Operativo	Windows 10 64 bits

Agisoft establece en su manual los siguientes requerimientos para utilizar el software para procesar imágenes:

Cuadro 13: Requerimientos del sistema

Requerimientos mínimos	Requerimientos recomendados
Intel Core 2 Duo 4 GB de RAM	Intel Core i7 16 GB de RAM Tarjeta de video dedicada

[41]

También indica que el número de imágenes que es posible procesar depende principalmente de la memoria RAM disponible y de los parámetros de reconstrucción. Si el número de fotografías que se busca procesar oscila entre 30 y 50, 4 GB de RAM son suficientes realizar el análisis. Si se aumentase la capacidad a 16 GB, el rango de número de fotos se encontraría entre 300 y 400.

5.1.2. Software

Por otra parte, se debe verificar el software con el que se cuenta para realizar el procesamiento. Las funciones de los programas varían, así como los recursos necesarios para ejecutarlos. Siempre es bueno familiarizarse primero con las opciones que ofrece alguna aplicación a través de tutoriales, cursos o recibiendo asesoría de personas que cuenten con experiencia en el manejo de un software específico. En este caso se utilizó Agisoft PhotoScan Professional versión 1.4.0.

5.2. Procesamiento de puntos

Para realizar el análisis de las fotografías, fue necesario procesar los puntos de control medidos en campo. Se extrajeron los archivos de los dispositivos de medición y se ingresaron en la aplicación de Trimble para computadoras llamado Trimble Business Center.

5.2.1. Ingresar los puntos al programa

Utilizando la aplicación de Trimble para Android, se conecta el teléfono con el receptor por medio de bluetooth. En la sección de “Utilidades” esta la opción “Enviar archivos de datos por correo electrónico”. Teniendo los archivos descargados en el ordenador, se procede a abrir el programa y crear un nuevo proyecto.

Antes de ingresar los archivos con los datos de los puntos, se debe definir el sistema de coordenadas con el que se trabajará. Para esto, se selecciona la pestaña “Inicio”, y en la sección “Geodésico” se busca la opción “Cambiar sistema de coordenadas”.

Figura 40: Pestaña inicio

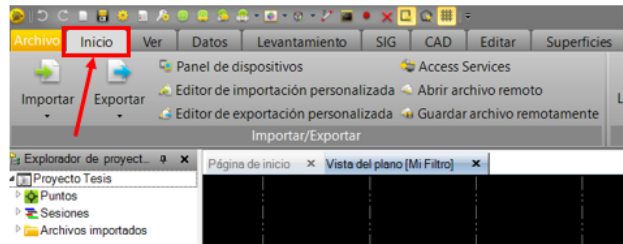
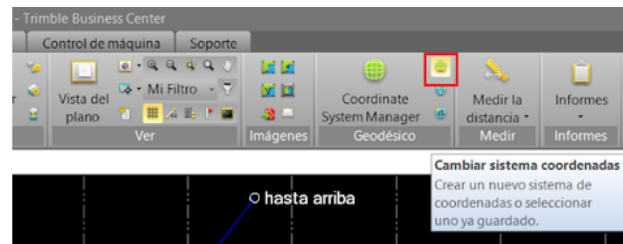


Figura 41: Botón para cambiar de coordenadas

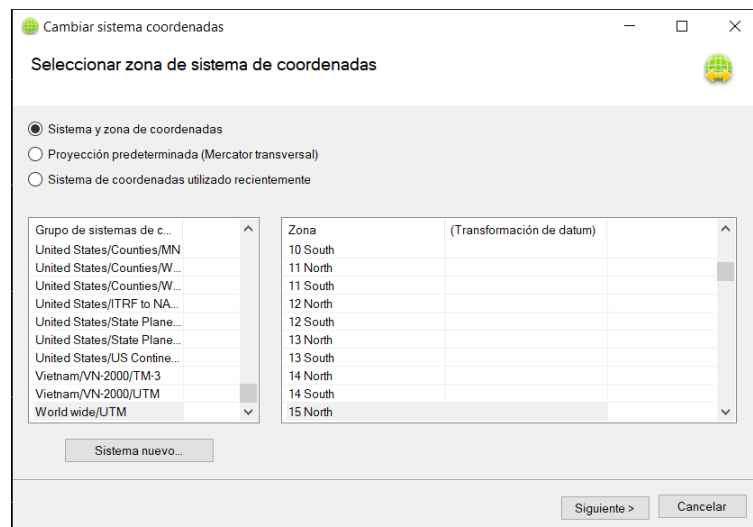


Una vez abierto el cuadro de opciones, se observan tres opciones:

1. Sistema y zona de coordenadas
2. Proyección predeterminada (Mercator transversal)
3. Sistema de coordenadas utilizado recientemente

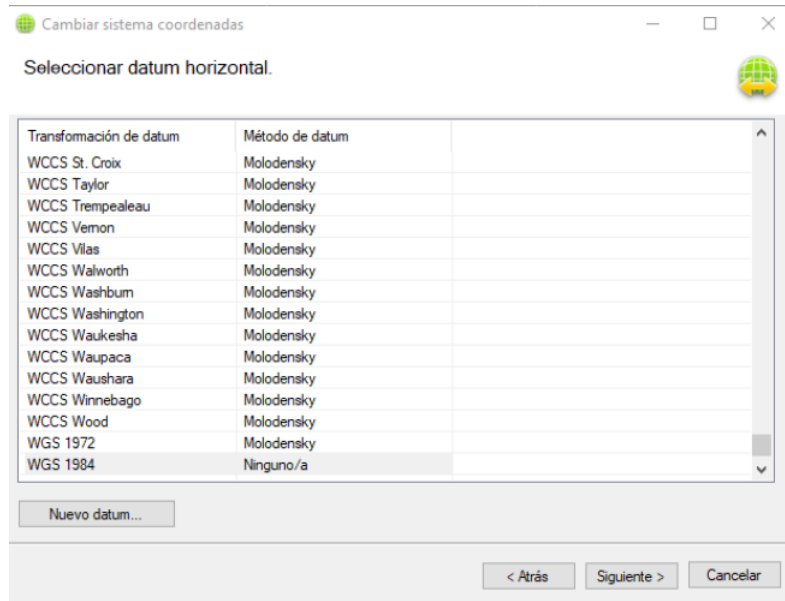
En “Sistema y zona de coordenadas” se busca el sistema de coordenadas con el que se desee trabajar. En este caso, Antigua Guatemala se encuentra en la zona 15N del sistema. Una vez seleccionado el sistema se da click en “siguiente”.

Figura 42: Cuadro para seleccionar sistema de coordenadas



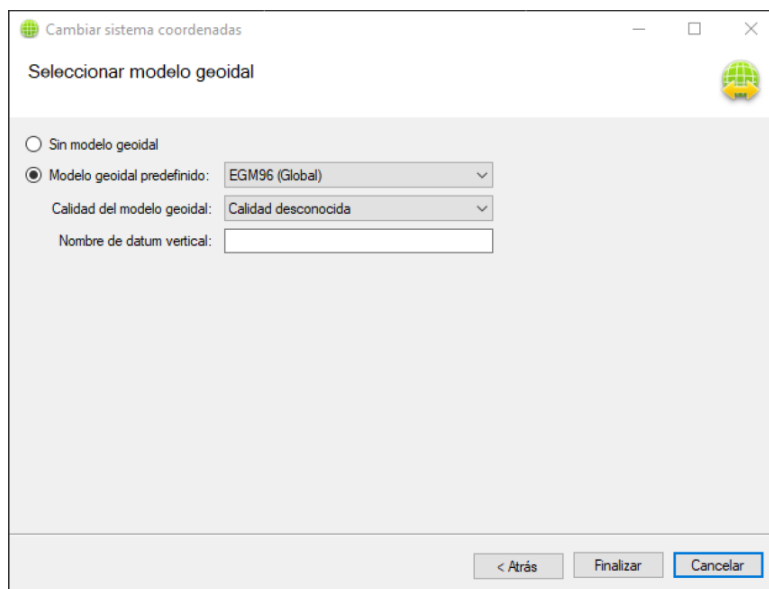
En la siguiente ventana se coloca el datum con el que se quiere trabajar. En este caso, se utilizó WGS84

Figura 43: Cuadro para seleccionar el datum del proyecto



Por último, se selecciona el modelo Geoidal. Para este trabajo, escogió el modelo geoidal predefinido EG96 (Global).

Figura 44: Cuadro para seleccionar el modelo geoidal

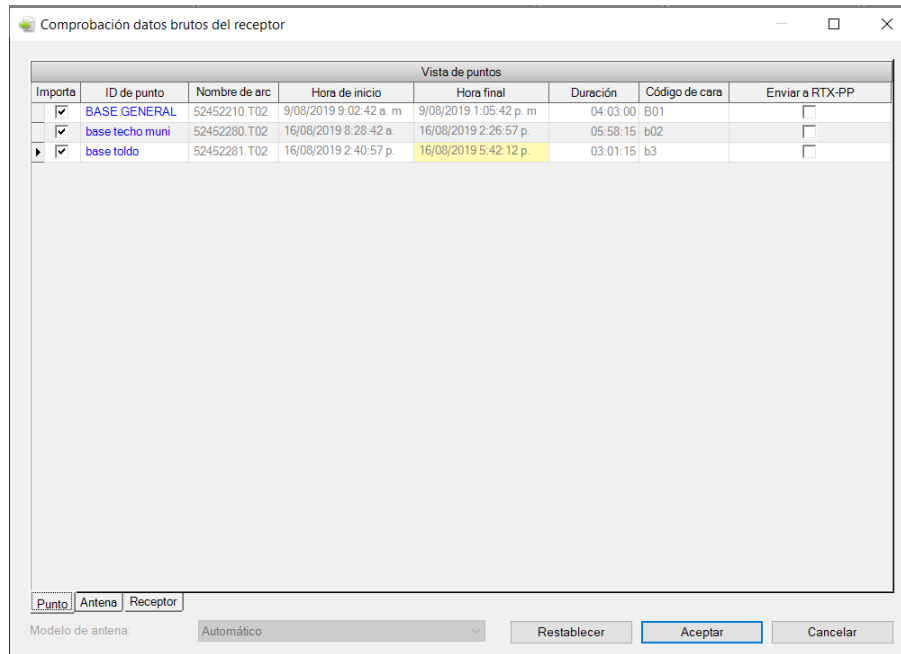


Ya teniendo definido el sistema de coordenadas, se cargan los archivos con la información de los puntos. Esto se hace desde la pestaña “Inicio” en el botón “importar”.

Primero se debe importar el punto de la base (o los puntos dependiendo de si hay varias bases) y luego los puntos del Rover.

Al importar los puntos aparece la siguiente ventana:

Figura 45: Cuadro para insertar puntos



The screenshot shows a window titled "Comprobación datos brutos del receptor" with a sub-header "Vista de puntos". It contains a table with the following data:

Importa	ID de punto	Nombre de arc	Hora de inicio	Hora final	Duración	Código de cara	Enviar a RTX-PP
<input checked="" type="checkbox"/>	BASE GENERAL	52452210.T02	9/08/2019 9:02:42 a. m	9/08/2019 1:05:42 p. m	04:03:00	B01	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	base techo muni	52452280.T02	16/08/2019 8:28:42 a.	16/08/2019 2:26:57 p.	05:58:15	B02	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	base toldo	52452281.T02	16/08/2019 2:40:57 p.	16/08/2019 5:42:12 p.	03:01:15	B03	<input type="checkbox"/>

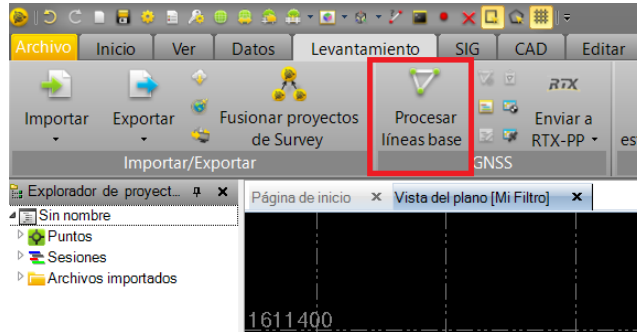
At the bottom of the window, there are tabs for "Punto", "Antena", and "Receptor". Below the tabs, there is a dropdown menu for "Modelo de antena" set to "Automático", and three buttons: "Restablecer", "Aceptar", and "Cancelar".

Aquí se verifican los datos de los puntos de control como fecha y hora de medición, duración de la toma de datos, tipo de receptor, altura a la que se midió y el nombre del punto. Se recomienda modificar este parámetro para que sea más fácil identificarlo en el programa.

5.2.2. Procesar la línea base

Para verificar que los puntos fueron tomados correctamente, se debe procesar la línea base. Este procedimiento permite distinguir los puntos que cuentan con un nivel de precisión aceptable y los que tienen una medición errónea debido a interferencias o falta de comunicación con los satélites. Para iniciar el proceso, se debe seleccionar el botón “Procesar línea base” en la pestaña “Levantamiento”

Figura 46: Botón para procesar línea base



Luego de dar click en el botón, aparece la siguiente ventana donde se observa la información de los puntos a analizar. Luego de ejecutar el comando, el programa mostrará con una línea azul los puntos que se procesaron correctamente. También dará una advertencia con una bandera roja para los puntos que presentan un error mayor al permisible según los criterios del programa. Usualmente, un error grande es causado por los siguientes factores:

- Mala comunicación con los satélites
- Interferencia de otras señales
- Poco tiempo de medición

Una vez la línea base este procesada, el siguiente paso es generar reportes para verificar que todos los puntos se hayan medido correctamente. El programa también permite exportar un archivo con el listado de puntos con sus respectivas coordenadas. En este caso se exporta un archivo de tipo .txt para poder utilizarlo en Agisoft.

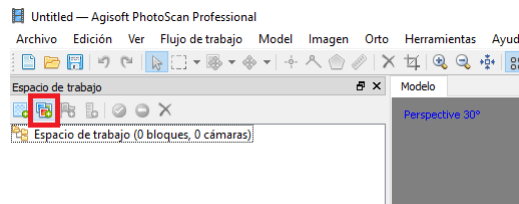
5.3. Procesamiento de imágenes utilizando Agisoft

Antes de iniciar el procesamiento, se debe tomar en cuenta la cantidad total de imágenes que se obtuvieron del levantamiento. Hay que recordar que mientras mas fotografías hay, se requiere mayor tiempo de procesamiento y recursos. Una cantidad razonable se encuentra entre 200 y 400 imágenes. En caso de que exista un mayor número de ellas, existe la posibilidad trabajar por cuadrantes o áreas. Sin embargo, trabajar por secciones ocasiona diferentes errores si no se trabaja de forma adecuada. En este caso, el equipo disponible no permite trabajar todas las fotos en un solo proceso. Por ello, se decidió trabajar cada vuelo por separado.

5.3.1. Insertar imágenes y asignar coordenadas

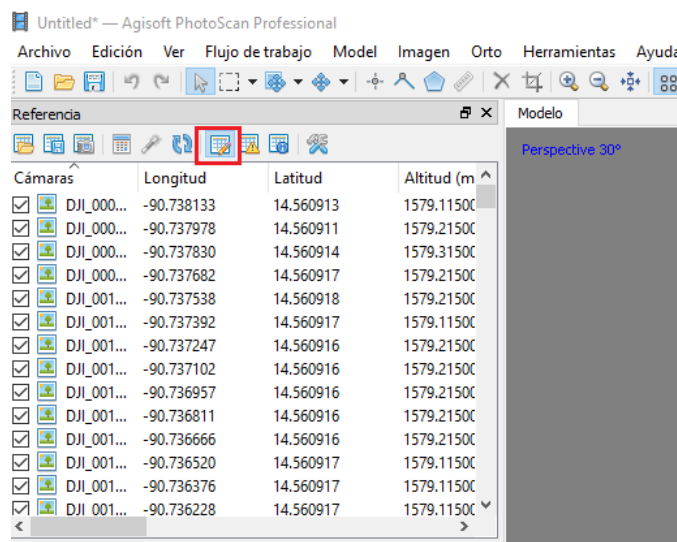
Lo primero que se debe hacer es insertar las imágenes en el programa. Para ello, se utiliza el botón “añadir fotos” en el área “espacio de trabajo”.

Figura 47: Añadir fotos



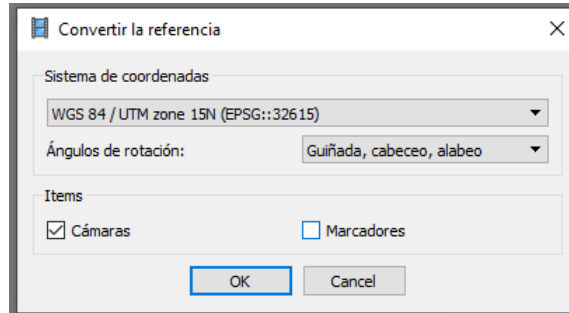
Una vez agregadas las fotografías, fue necesario convertir las coordenadas al sistema con el que se trabajaría el resto del proyecto. Para ello, en la pestaña “Referencia” se seleccionan todas las imágenes y se da click en el botón “convertir”.

Figura 48: Botón convertir coordenadas



Debe aparecer el siguiente recuadro, en el cual se escoge el sistema de coordenadas con el que se desea trabajar:

Figura 49: Recuadro para convertir la referencia

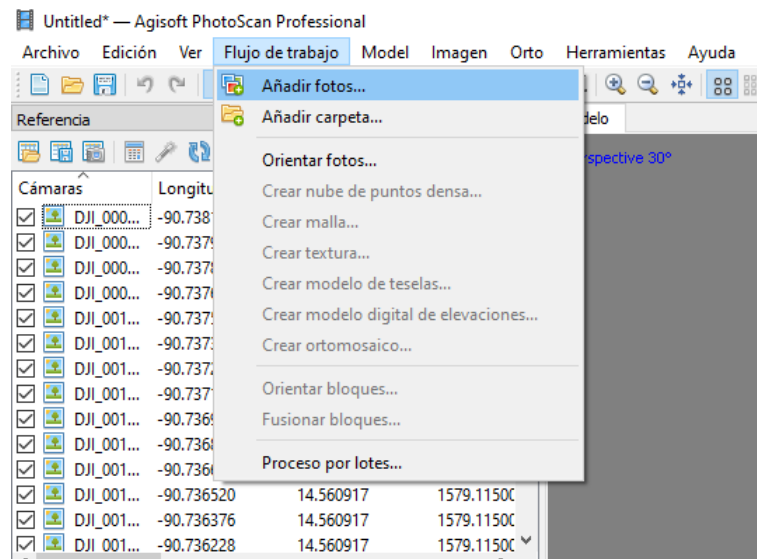


Guatemala se encuentra en dos zonas UTM, la 15 Norte y la 16 Norte. Antigua Guatemala se encuentra en la 15N, por lo que el sistema a utilizar para la conversión de coordenadas es WGS 84/UTM 15N.

5.3.2. Alineación de las fotografías

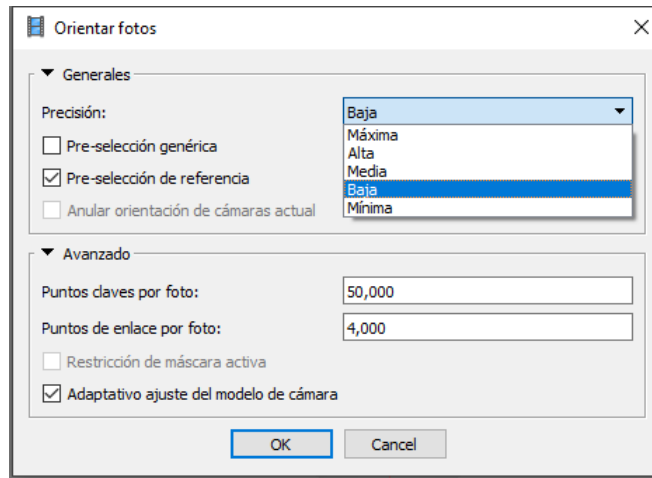
Para obtener un modelo de elevación y un ortomosaico del área de estudio, se debe seguir una serie de pasos, la cual viene dada por Agisoft en la pestaña “Flujo de trabajo”

Figura 50: Flujo de trabajo a seguir en Agisoft



Lo primero es orientar o alinear las imágenes. Para ello, se da click en la pestaña “Flujo de trabajo” y luego se selecciona “Orientar fotos”. Aparece el siguiente recuadro:

Figura 51: Recuadro para orientar fotos



En este recuadro se cambian diferentes parámetros que afectan la calidad y precisión de la orientación. Esto dependerá de lo que se espera del proyecto y de las capacidades del ordenador, ya que una mejor calidad demandará mayor cantidad de recursos y tiempo de procesamiento.

Parámetros de orientación de fotografías

Precisión

Una precisión alta permite obtener una estimación más precisa de la posición de la cámara. En cambio, una precisión baja lo hace menos preciso pero de forma más rápida [41].

Pre-selección genérica

Con esta opción habilitada, los pares de fotos superpuestas o que comparten tras-lape son seleccionadas haciendo coincidir las imágenes utilizando un alineamiento de baja calidad primero [41].

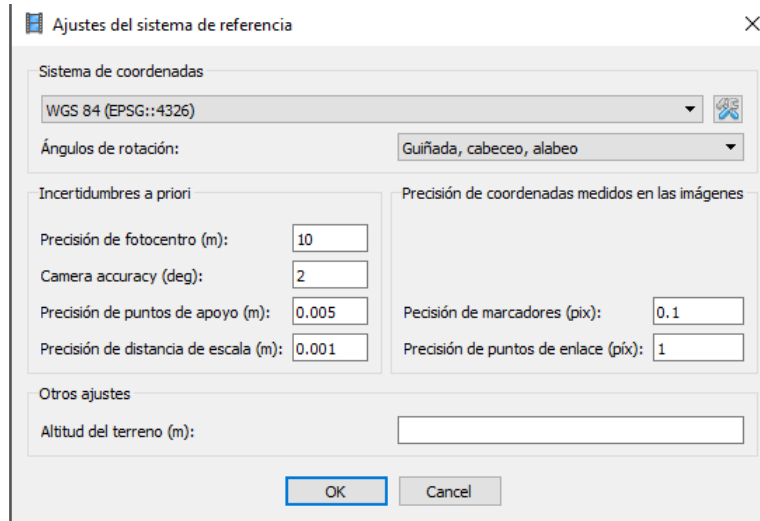
Pre-selección de referencia

Si esta opción se encuentra habilitada, los pares de fotos superpuestas se seleccionan tomando como referencia la orientación externa de las imágenes. [41]. Para fotos

oblicuas es necesario definir el valor de la altura de suelo (valor promedio de altura de suelo en el mismo sistema de coordenadas que las imágenes)[41].

En caso que se desee configurar la altura del terreno para fotografías oblicuas, se hace desde el panel de referencia en el botón “Ajustes”

Figura 52: Ajustes del sistema de referencia



El proceso de alineamiento de imágenes suele tomar un tiempo considerablemente alto. Tener habilitadas ambas opciones permite al programa acelerar un poco el procesamiento de las imágenes ya que ambas opciones permiten hacer una preselección de imágenes traslapadas tomando en cuenta los puntos que comparten y su orientación externa.

Puntos clave por foto

Indica cuantos puntos como máximo tomará en cuenta el programa durante el procesamiento de cada imagen. Usar un valor de 0 permite al programa buscar la mayor cantidad de puntos posibles, pero resulta en un mayor número de puntos poco confiables [41].

Puntos de enlace por foto

Indica el límite máximo de pares de puntos que coincidan en 2 o más fotografías. Mientras mas alto sea el número, más precisa es la orientación de las fotografías, pero requiere mayor tiempo de procesamiento [41].

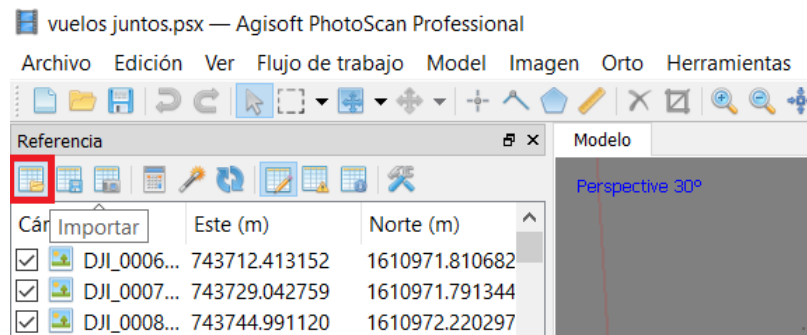
Adaptativo por ajuste del modelo de cámara

Esta opción habilita la selección automática de los parámetros de la cámara que se utilizarán en el ajuste, según las estimaciones de confiabilidad que realice el programa sobre estos. Para fotografías con baja geometría de cámara, como fotos aéreas para ortofotos, ayuda a prevenir la divergencia de ciertos parámetros [41].

5.3.3. Insertar los puntos de control

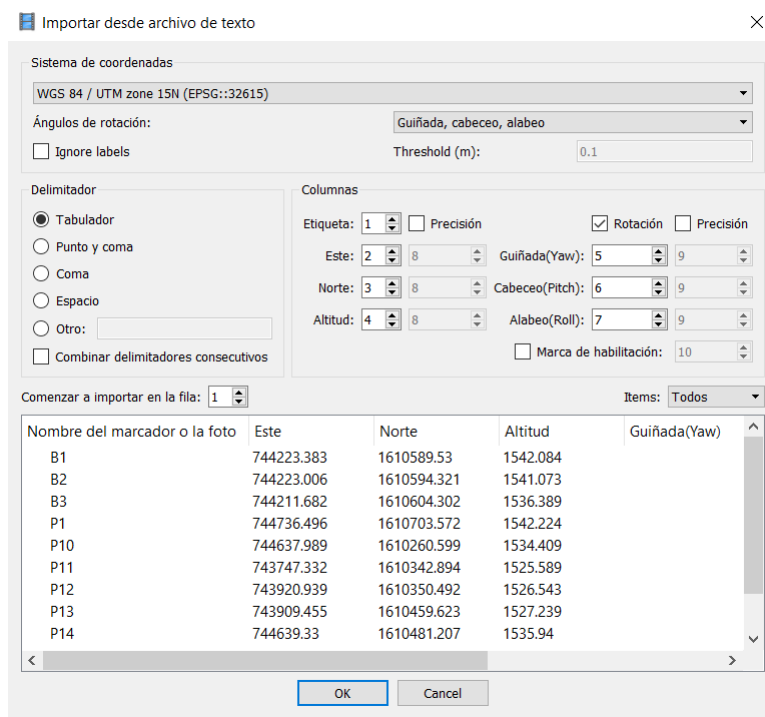
En caso de que se quieran utilizar puntos de control, es necesario insertarlos en el proyecto y luego alinear las fotos nuevamente respecto a ellos. Lo primero que se debe hacer es insertar los puntos desde un archivo .txt, generado en los pasos anteriores. Para esto, se selecciona el botón “Importar” en el panel c.

Figura 53: Botón para insertar nube de puntos



Al seleccionar el comando, deberá aparecer la siguiente ventana. En ella se configura el sistema de coordenadas que se quiere utilizar y a que columna corresponde cada valor. Es importante verificar que cada columna corresponda a la coordenada obtenida con la medición, ya que en caso contrario los puntos no serán visibles en las imágenes. Los ángulos de rotación se dejan por defecto en “Guiñada, cabeceo y alabeo”. Una vez configurados todos los parámetros, se da click en Aceptar.

Figura 54: Configuración puntos de control



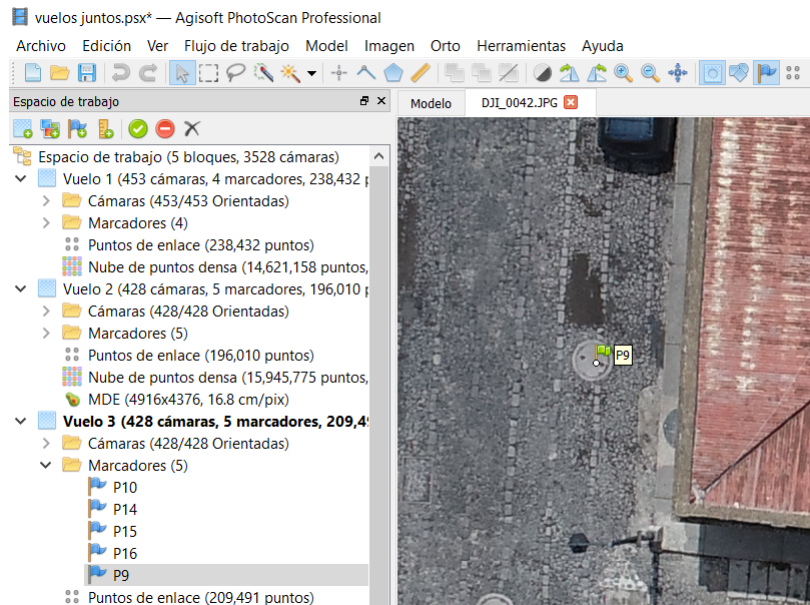
Luego de insertar los puntos, es necesario ubicarlos en las fotografías. Primero, se busca el punto que se quiere modificar en el mapa. Luego se da click derecho sobre el punto y se da click en “Filtrar puntos por foto”.

Figura 55: Opciones de punto



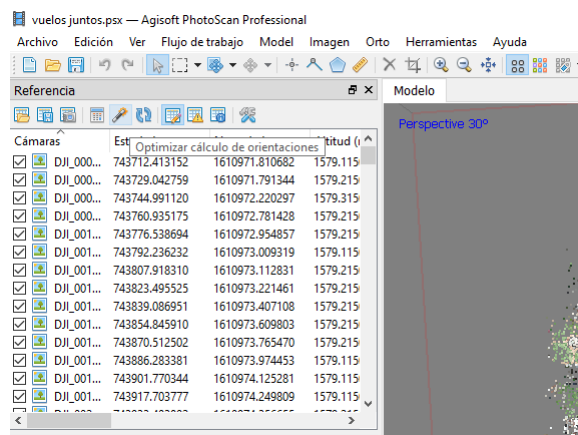
En el panel de “Imágenes” se observan todas las fotos en donde el programa cree que esta el punto de control. Usualmente el punto esta desplazado de donde realmente debería estar. Para colocar el punto donde corresponde, se mueve dando un click sostenido sobre él.

Figura 56: Colocación de los puntos en las imágenes



El siguiente paso después de colocar los puntos en su sitio, es optimizar el cálculo de orientación de las imágenes. Esto para alinear las fotografías tomando como punto de partida los puntos de control y sus coordenadas sean más precisas que las calculadas por el dron. Para ello se utiliza el botón “optimizar cálculo de orientaciones”, el cual optimiza los parámetros internos y externos de las fotos alineadas.

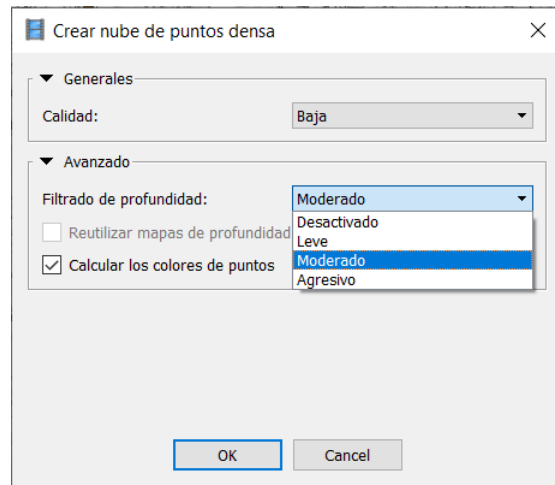
Figura 57: Botón para optimizar el cálculo de orientaciones



5.3.4. Creación de nube de puntos densa

El siguiente paso para obtener modelo digital de elevación digital y el ortomosaico es la creación de la nube de puntos densa.

Figura 58: Configuración de creación de nube de puntos



Parámetros de construcción de nube de puntos

Calidad

Con este parámetro se especifica la calidad que se desea de la nube de puntos. Mientras más alta la calidad, se obtiene una geometría del terreno más precisa y detallada [41].

Filtro de profundidad

Al crear la nube de puntos, Agisoft calcula los mapas de profundidad para cada imagen. Cada foto presenta puntos atípicos debido al ruido o fotos con mal enfoque. Este algoritmo tiene diferentes parámetros para filtrar este tipo de puntos, dependiendo del tipo de proyecto [41]:

1. Si las fotografías tienen detalles muy definidos como texturas de techos o muchas edificaciones, se recomienda utilizar el modo de filtro “Leve”.
2. Si el área que se quiere reconstruir no contiene muchos detalles, se recomienda seleccionar “Agresivo”. Con este parámetro es posible filtrar los puntos de mejor manera para detectar todos los valores atípicos. Esto aplica en casos donde el levantamiento solo contiene terreno natural.
3. El valor “Moderado” es un balance entre los dos anteriores
4. Agisoft agrega también la opción “Deshabilitado”, pero esto no es recomendable debido que el resultado sería una nube densa con excesiva cantidad de ruido.

Calcular los colores de los puntos

Esta opción permite calcular los colores de cada punto. En caso de que no se desee, deshabilitar la opción ahorra tiempo de procesamiento [41].

5.3.5. Clasificación nube de puntos

Antes de seguir con la creación del mallado y modelo de elevación digital, es necesario clasificar la nube de puntos para que el programa solo tome en cuenta la superficie que es terreno natural al generar las curvas de nivel. Si este paso se omite, el programa considerará que la vegetación, edificios, vehículos u otros objetos no deseados son parte del terreno natural. Por tanto, creara las curvas de nivel de forma incorrecta. Agisoft ofrece el método manual o el automático.

Clasificación de puntos de forma automática

Figura 59: Ruta para clasificar nube de puntos

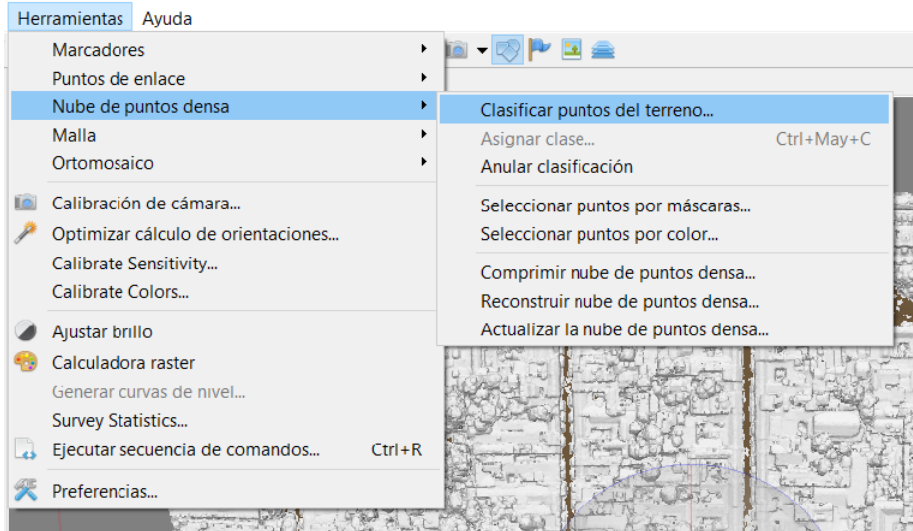
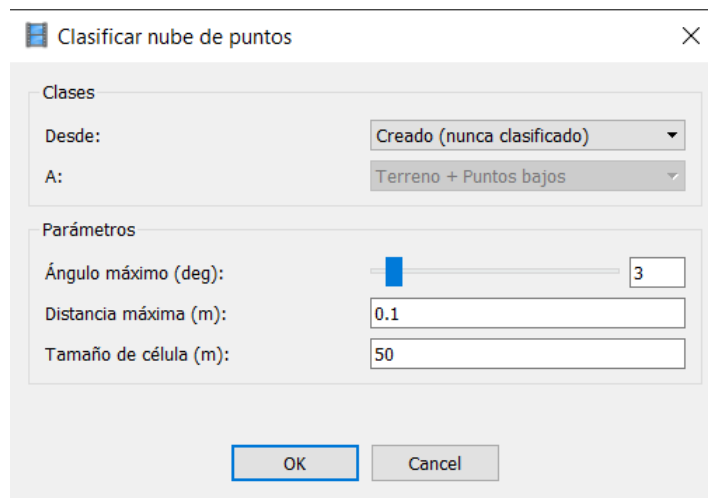


Figura 60: Configuración de la clasificación de nube de puntos



Ángulo máximo

Este parámetro limita el ángulo entre el modelo del terreno y la línea que conecta el punto en análisis con un punto previamente clasificado como tierra. Para terrenos casi planos, el programa recomienda utilizar 15 grados [41].

Distancia máxima

Limita la distancia entre el punto de análisis y el modelo del terreno. Permite establecer la suposición de la variación máxima de la elevación del terreno [41].

Tamaño de celda

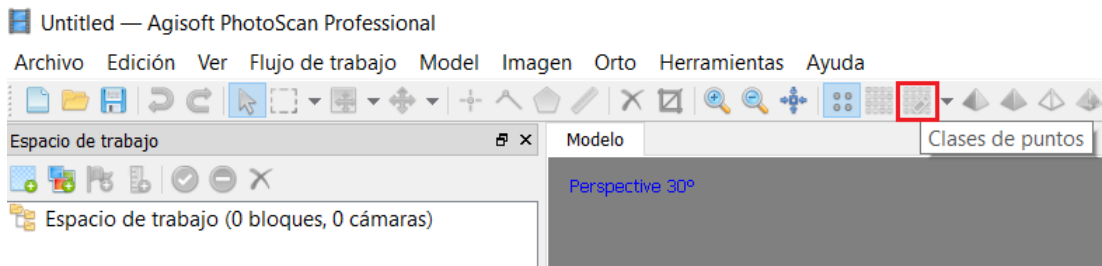
Determina el tamaño de las celdas en que se dividirá la nube de puntos [41].

Clasificación manual de la nube de puntos

Agisoft tiene la opción de clasificar los puntos de forma manual. Para esto se deben seguir los siguientes pasos [41]:

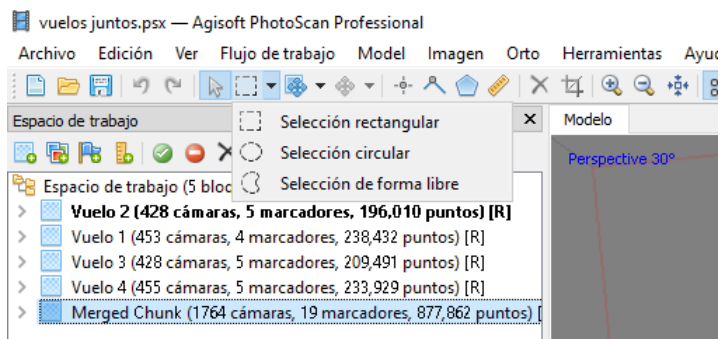
1. Primero se debe cambiar a la vista “clases de puntos” en la barra de herramientas:

Figura 61: Botón para cambiar a vista de clases de puntos



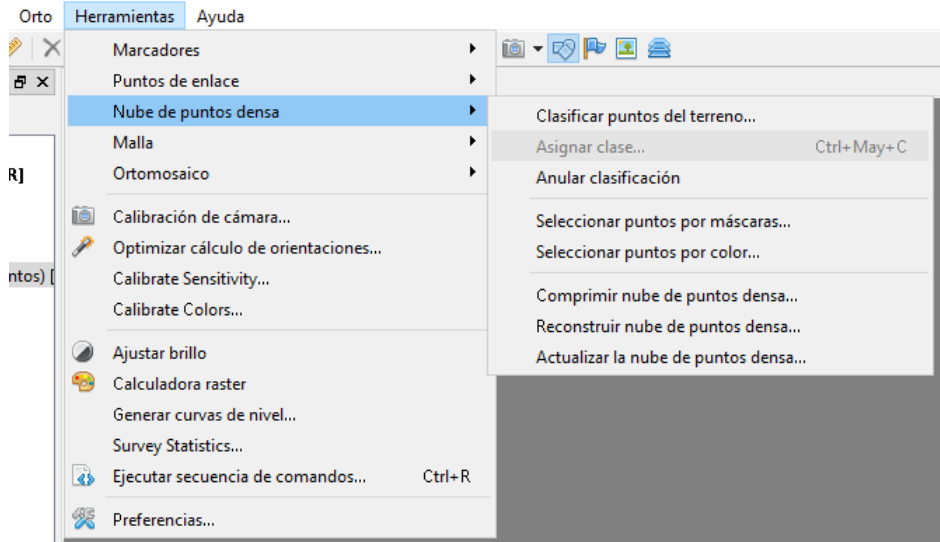
2. Luego, utilizando alguna de las herramientas de selección, se eligen los puntos que se desean clasificar. Para realizar una selección múltiple se debe mantener oprimida la tecla **Ctrl**. Para eliminar puntos se la selección actual, se mantener la tecla **Shift**.

Figura 62: Herramientas de selección de puntos



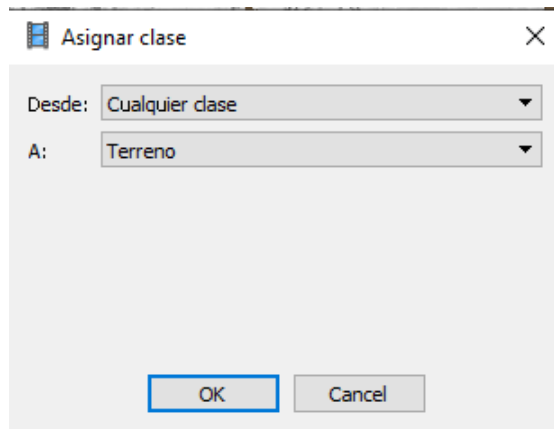
3. Teniendo los puntos seleccionados, se busca el comando “Asignar clase” en la sección “Nube de puntos” de la pestaña “Herramientas”.

Figura 63: Botón para asignar puntos a clase



4. Por último, en el cuadro para asignar puntos a clase se selecciona la fuente o desde que clase se quieren seleccionar los puntos y luego a que clase se desea asignar.

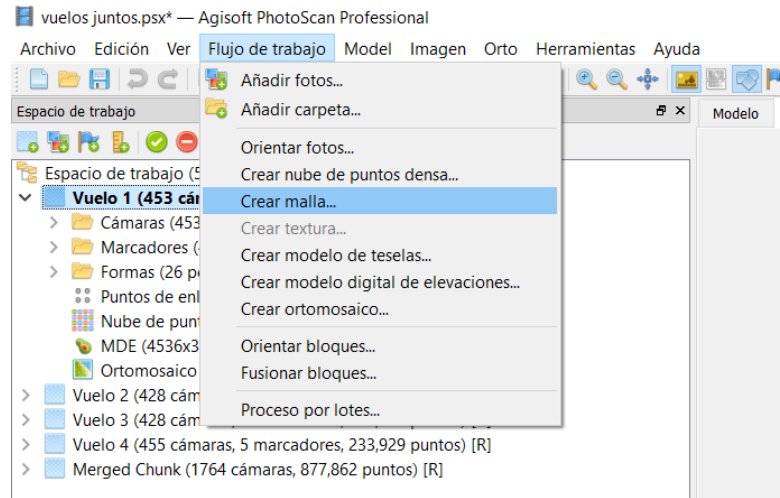
Figura 64: Botón para asignar puntos a clase



5.3.6. Creación de mallado

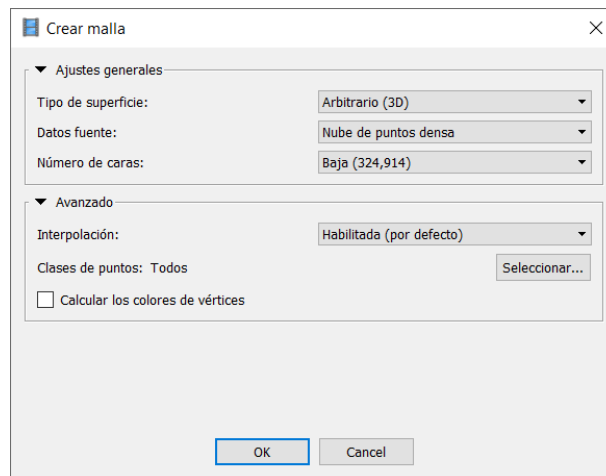
Es un modelo poligonal del levantamiento basado en la nube de puntos densa. Otra alternativa es utilizar la nube de puntos de dispersa.

Figura 65: Menú mallado



Parámetros de reconstrucción del mallado

Figura 66: Parámetros del mallado



Tipo de superficie arbitraria

Este parámetro es utilizable para cualquier tipo de objetos. Debe seleccionarse para levantamientos con edificios, estatuas u otros objetos cerrados [41].

Tipo de superficie de campo de altura

Este parámetro es más útil para optimizar modelos con superficies planas como terrenos vacíos. Debe seleccionarse para fotogrametría aérea ya que requiere menos memoria y permite procesar mayor cantidad de datos [41].

Datos fuente

El mallado también admite realizarlo tomando como base la nube de puntos dispersa o la nube densa. Hacerlo con la dispersa implica un menor tiempo de procesamiento pero con un producto final de baja calidad. En cambio, hacerlo con la nube densa implica un mallado de mejor calidad con la desventaja de que requiere más tiempo [41].

Número de caras

Este parámetro especifica la cantidad de polígonos en el mallado. El valor sugerido por Agisoft se basa en la cantidad de puntos obtenidos en la nube de puntos. No obstante, el usuario tiene la opción de escoger el valor que considere correcto. Hay que tomar en cuenta que un valor muy bajo hará que el modelo sea de baja calidad, pero un valor muy alto dificulta la visualización del modelo en otros programas [41].

Interpolación

Si este parámetro se deja como deshabilitado, permite que la reconstrucción sea más precisa ya que solo las áreas correspondientes a la nube de puntos densa son reconstruidas. Por el contrario, al estar habilitado el software interpolará ciertas áreas dentro de un círculo con un diámetro determinado alrededor de cada nube de puntos densa. Como resultado, algunos agujeros se rellenan automáticamente [41].

Por último, la opción “Extrapolar” hace que el programa rellene cada agujero que encuentre con geometría extrapolada.

Clases de puntos

El mallado se realiza tomando todos los puntos de la nube, o solo ciertos tipos según la clasificación realizada previamente. Se recomienda crear el mallado utilizando solo la superficie o punto que el usuario considere útiles en el modelo [41].

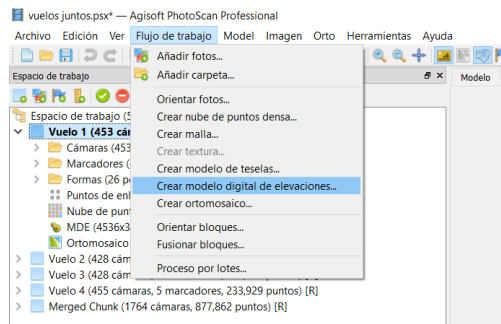
5.3.7. Modelo de teselas

El modelo de teselas es útil para la representación de modelos de ciudades a escala. Permite la visualización de un área bastante amplia en tres dimensiones y con una resolución alta. Este se construye utilizando como base la nube de puntos densa o el mallado hecho en los pasos anteriores. Esto no es requisito para la creación de ortofotos o modelo de elevación digital [41].

5.3.8. Construcción del modelo de elevación digital

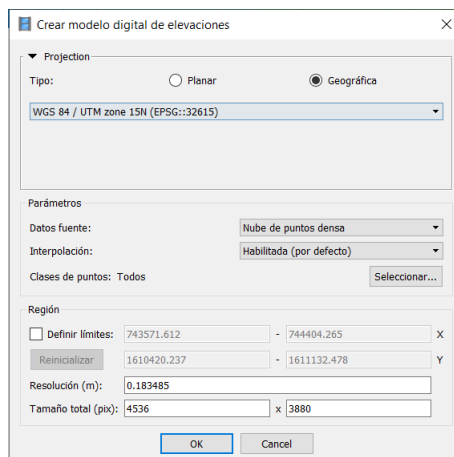
Para obtener las curvas de nivel y una representación de la superficie en análisis, debe crearse un modelo de elevación digital. El programa permite la opción de crearlo partir de la nube de puntos densa, nube densa, o del mallado. Los resultados más precisos se obtienen de la nube de puntos densa. En el MED se es posible realizar diferentes medidas como áreas, volúmenes o distancias [41].

Figura 67: Comando para crea el modelo de elevación digital



Parámetros de construcción

Figura 68: Parámetros de construcción del modelo digital de elevación



Tipo de proyección

1. Geográfica: Este parámetro permite asignar un sistema de coordenadas al modelo para que este georreferenciado. Por defecto utiliza el sistema de coordenadas del proyecto en general.
2. Planar: Agisoft permite proyectar el modelo en un plano definido por el usuario.
3. Cilíndrica: permite que el modelo se pueda proyectar en una superficie cilíndrica.

Fuente de datos

Se recomienda crear el modelo basado en la nube de puntos densa, ya que permitirá tener datos más precisos del mismo. Si se utiliza la nube de puntos dispersa se obtiene un resultado rápido pero de baja calidad.

Interpolación

1. Habilitada: el programa calculará las elevaciones para todas las áreas que sean visibles en al menos una imagen
2. Extrapolar: este parámetro genera un modelo sin agujeros con datos de elevación extrapolados

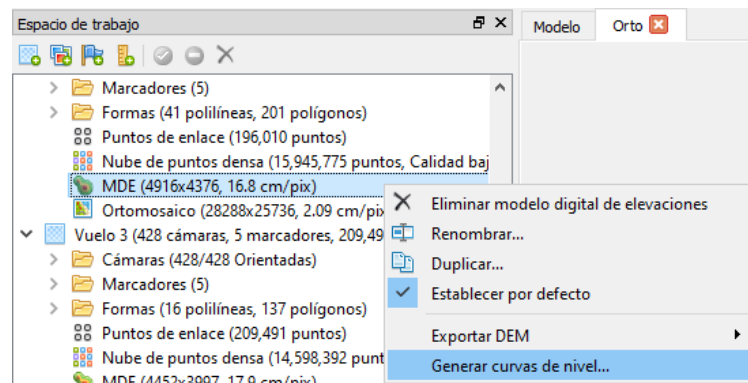
Clase de puntos

Aquí se escogen los puntos que se tomarán en cuenta para la creación del modelo. Es necesario clasificar la nube de puntos densa para evitar tomar en cuenta elevaciones que no forman parte del terreno. Por ejemplo, las alturas obtenidas de la vegetación, edificios o vehículos no forman parte del terreno natural. Por ello, si se toman en cuenta en el cálculo, las curvas de nivel obtenidas serán incorrectas.

Generación de curvas de nivel

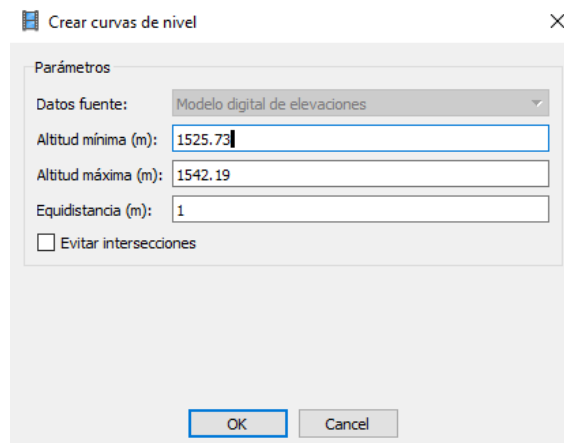
Una vez creado el MDE, se extraen las curvas de nivel del mismo. Para esto, se da click derecho sobre el modelo del que se quieren generar las curvas y se selecciona la opción "Generar curvas de nivel"

Figura 69: Comando para generar curvas de nivel



Luego aparece la siguiente ventana donde se ajustan los parámetros que desee el usuario:

Figura 70: Parámetros para generar curvas de nivel

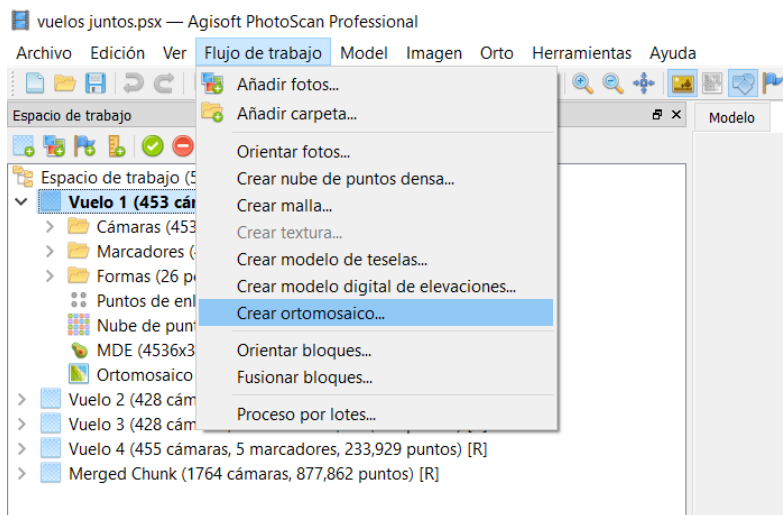


Parámetros de construcción de curvas de nivel

1. Datos fuente: en esta pestaña se escogen los datos que se utilizarán para crear las curvas de nivel.
2. Altura mínima: altura mínima que se desea mostrar en las curvas.
3. Altura máxima: altura máxima que se desea mostrar en las curvas.
4. Equidistancia: distancia entre curvas de nivel.
5. Evitar intersecciones: el programa utilizará algoritmos para evitar que las curvas de nivel se toquen entre ellas.

5.3.9. Creación de ortomosaicos

Figura 71: Menú de ortomosaico



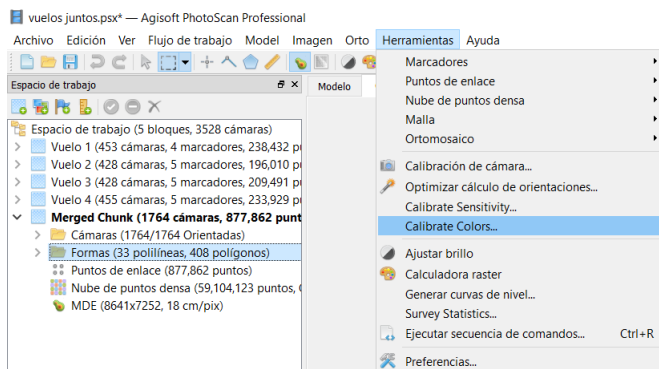
Calibración de color

Si las condiciones de luz cambiaron considerablemente durante la toma de fotografías, se recomienda usar la calibración de color previo a la creación del ortomosaico. Esta opción permite uniformizar el brillo y el color blanco de las imágenes. Hay que tomar en cuenta que este procedimiento requiere de cierta cantidad de tiempo para procesar dependiendo de la cantidad de imágenes [41].

Para calibrar el color se deben seguir los siguientes pasos:

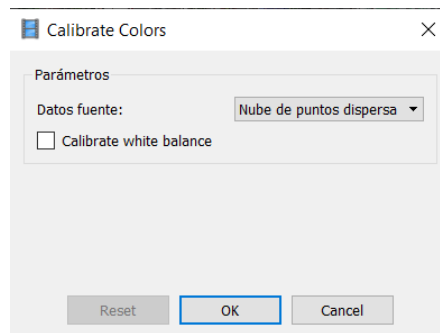
1. Se debe seleccionar el comando desde la pestaña de herramientas:

Figura 72: Comando calibrar color



2. Luego en la siguiente ventana se escogen los parámetros deseados por el usuario y se selecciona "Ok"

Figura 73: Parámetros calibración de color

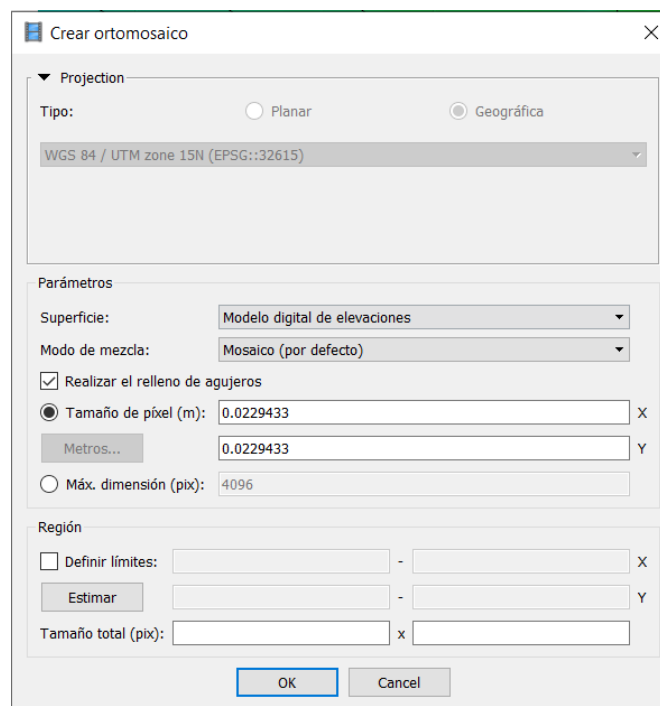


En datos fuente existen tres opciones disponibles para el usuario. Es recomendable que el usuario escoja la fuente de datos tomando en cuenta en que superficie desea proyectar la ortofoto.

1. La nube de puntos dispersa ofrece resultados rápido, pero poco precisos.
2. El modelo ofrece una precisión alta, pero con la condición de que la superficie este bien detallada.
3. Usar el modelo de elevación digital es la opción mas razonable si se tiene gran cantidad de datos y no es factible reconstruir el mallado.

Parámetros de creación de ortofotos

Figura 74: Parámetros de ortomosaico



Tipo de proyección

Geográfica: Permite seleccionar un sistema de coordenadas que se asignará a las ortofotos. Por defecto se asigna el sistema de coordenadas del proyecto, el usuario tiene la opción de escoger cualquier otro [41].

Planar: PhotoScan permite proyectar el ortomosaico en un plano definido por el usuario siempre y cuando se seleccione el mallado como tipo de superficie. Es posible seleccionar el plano de proyección y la orientación del ortomosaico. Este tipo de proyección es recomendable generar proyectos que consideren fachadas o superficies verticales [41].

Cilíndrica: Permite proyectar el ortomosaico en una superficie cilíndrica. Con esta proyección se corrigen ciertas distorsiones cuando se proyectan objetos cilíndricos como túneles, tuberías, torres redondas, etc. [41].

Superficie

Los ortomosaicos creados según modelos de elevación digital son eficientes para el procesamiento de datos de levantamientos aéreos. Otra opción es utilizar el mallado, el cual permite hacer ortomosaicos de fachadas de edificios o modelos no referenciados [41].

Modo de mezcla

Agisoft describe los parámetros del modo de mezcla de la siguiente forma:

1. Mosaico: este parámetro por defecto implementa un enfoque con división de datos en varios dominios de frecuencia que se combinan independientemente. El componente con la frecuencia más alta se mezclan a lo largo de la línea de costura. Al alejarse más de esta línea, resulta en un número inferior de dominios que están sujetos a la mezcla.
2. Promedio: usa el valor promedio ponderado de todos los píxeles de cada foto individual
3. Deshabilitado: el color de cada píxel se extrae de la foto cuya vista de cámara sea la más ortogonal posible a la superficie reconstruida sobre ese punto.

Tamaño de píxel

El valor por defecto en Tamaño de píxel es la GSD del proyecto. En este caso, no es útil colocar un tamaño de píxel menor ya que no mejorará la resolución [41].

Máxima dimensión (pix)

Este parámetro permite configurar el tamaño máximo de los datos raster resultantes [41].

5.4. Resumen de parámetros utilizados en el proyecto

Cuadro 14: Parámetros utilizados para la orientación de imágenes

Parámetros de orientación de imágenes	
Precisión	Baja
Pre-selección genérica	No
Pre-selección de referencia	Si
Puntos clave por foto	50,000
Puntos de enlace por foto	4,000
Adaptivo ajuste del modelo de cámara	Si

Cuadro 15: Parámetros utilizados para la reconstrucción de la nube de puntos densa

Parámetros de reconstrucción de nube de puntos	
Calidad	Baja
Filtrado de profundidad	Moderado
Calcular los colores de los puntos	Si

Cuadro 16: Parámetros utilizados para la construcción del MED

Parámetros de construcción del MED	
Proyección	Geográfica
Sistema de coordenadas	WGS 84/ UTM Zone 15N (EPSG: 32615)
Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Clases de puntos	Terreno

Cuadro 17: Parámetros para la construcción del ortomosaico

Parámetros de construcción de ortomosaico	
Proyección	Geográfica
Sistema de coordenadas	WGS 84/ UTM Zone 15N (EPSG: 32615)
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Interpolación	Habilitada
Realizar relleno de agujeros	Si

Cuadro 18: Parámetros para la clasificación de la nube de puntos

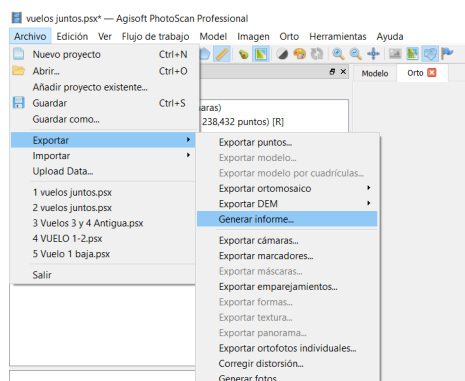
Parámetros para la clasificación de nube de puntos	
Desde	Creado (nunca clasificado)
Ángulo máximo (deg)	2.5
Distancia máxima (m)	0.18
Tamaño de célula (m)	50

Los resultados finales del procesamiento de las fotografías se analizaron a través de un informe de calidad generado por el software. En el se indican los parámetros utilizados para el procesamiento y los valores de los diferentes errores que se presentan el producto final. Además, se evaluó la calidad final de las ortofotos observando la presencia de imperfecciones y la del modelo de elevación digital analizando si las curvas de nivel generadas presentan coherencia con el comportamiento real del terreno.

6.1. Informe de calidad

Para generar el informe de calidad, se debe ir a la pestaña “Archivo” y en la sección de “Exportar” se selecciona “Generar Reporte”.

Figura 75: Generar reporte de calidad

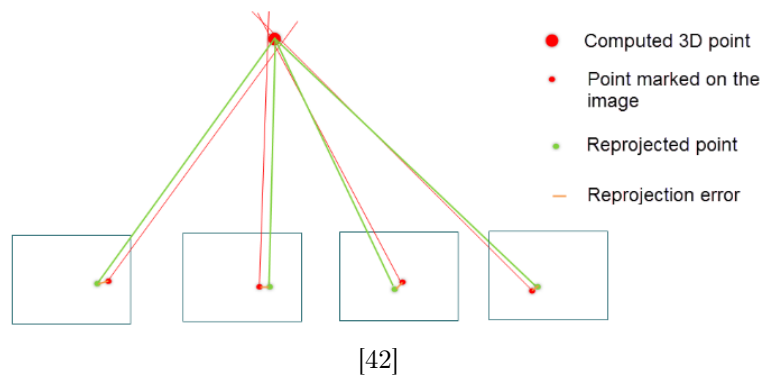


Error de reproyección

Cuando un punto se encuentra en dos o más imágenes a la vez, las coordenadas en 3D son calculados utilizando como base los parámetros internos y externos de la cámara y también la posición del punto en la imagen [42].

Una vez las coordenadas en 3D son calculadas, el punto es reproyectado en todas las imágenes en las que aparece. A la distancia entre el punto marcado y el reproyectado se le conoce como error de reproyección. Este error depende de la calidad de la calibración de la cámara y también de la calidad del punto marcado en la imagen [42].

Figura 76: Error de reproyección



Cuadro 19: Error de reproyección obtenido en el proyecto

Vuelo	Error de reproyección (píxeles)
1	2.74
2	2.74
3	2.72
4	2.84
Media	2.76

Porcentaje de imágenes orientadas

Este parámetro indica la relación entre la cantidad de imágenes que se han orientado y la cantidad total de fotografías. El que una fotografía esté “orientada”, quiere decir que el programa fue capaz de obtener su posición de forma correcta.

Cuadro 20: Criterios de aceptación según porcentaje de imágenes alineadas

Porcentaje de imágenes alineadas	Descripción
$x \geq 95\%$	La cantidad correcta imágenes se han alineado
$60\% < x < 95\%$	Un número considerable de las imágenes no fueron calibradas, por lo que se espera una precisión baja
$x < 60\%$	La mayoría de las imágenes no fueron calibradas lo que indica un problema en el procesamiento

Fuente: Pix4D, 2019

Porcentaje de optimización de cámara

Este valor indica la relación entre la distancia focal optimizada y la distancia focal inicial (la indicada por el fabricante). El reporte generado no lo indica directamente, pero se calcula con otros valores indicados en el mismo.

En el apartado de “Calibración de cámara” se encuentra un recuadro que representa los coeficientes de calibración y matriz de correlación. El cuadro es como el que se muestra a continuación:

Figura 77: Valor F en los reportes de calidad

	Valor	Error	F	Cx	Cy	P1	P2
F	3756.48	11	1.00	-0.02	0.44	-0.01	0.23
Cx	-1.41702	34		1.00	-0.01	1.00	-0.08
Cy	20.3481	0.9			1.00	-0.01	0.15
P1	0.000326315	0.003				1.00	-0.08
P2	0.00045777	6e-06					1.00

El valor de F, que se encuentra en el cuadro rojo en la figura anterior es el parámetro que servirá para calcular el porcentaje de optimización de cámara. Para ello se utilizan las siguientes expresiones:

$$f_o = \left(\frac{F * h_p}{1 * 10^6} \right) \quad (12)$$

$$P_o = \left(\frac{f_o * 1000}{f_r} \right) - 1 \quad (13)$$

Donde:

- F es el valor mostrado en la Figura 65
- h_p es el tamaño de uno de los lados del píxel
- f_o es la distancia focal optimizada

- P_o porcentaje de optimización de cámara
- f_r Distancia focal inicial o real

Cuadro 21: Criterios de aceptación según porcentaje de optimización de cámara

Porcentaje de optimización de cámara	Descripción
$x < 5\%$	El valor optimizado de la cámara se encuentra en un valor aceptable
$5\% < x < 20\%$	El error obtenido entre la distancia focal inicial y final es considerable
$x > 20\%$	Este error ya no se considera aceptable e indica un fallo grave en las fotografías

Fuente: Pix4D, 2019

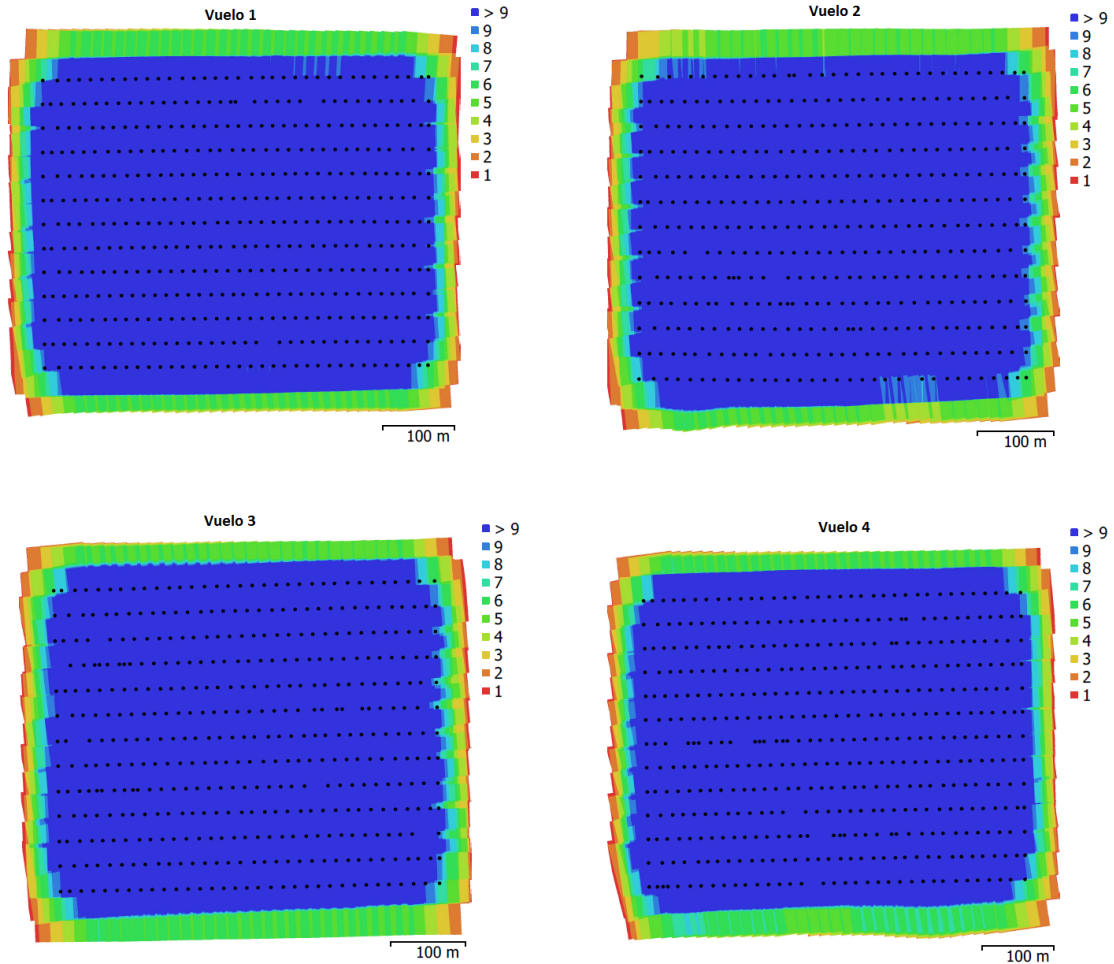
Cuadro 22: Porcentajes de optimización obtenidos en cada vuelo

Vuelo	Distancia focal inicial (mm)	Valor F	Tamaño pixel (micras)	Distancia focal optimizada (mm)	Porcentaje
1	8.8	3756.48	2.41	9.05	2.9%
2	8.8	3603.25	2.41	8.68	1.3%
3	8.8	3746.64	2.41	9.03	2.6%
4	8.8	3874.41	2.41	9.34	6.1%

Zonas de traslape

El reporte de Agisoft presenta los valores de traslapes de la siguiente forma:

Figura 78: Zonas de traslape en los vuelos

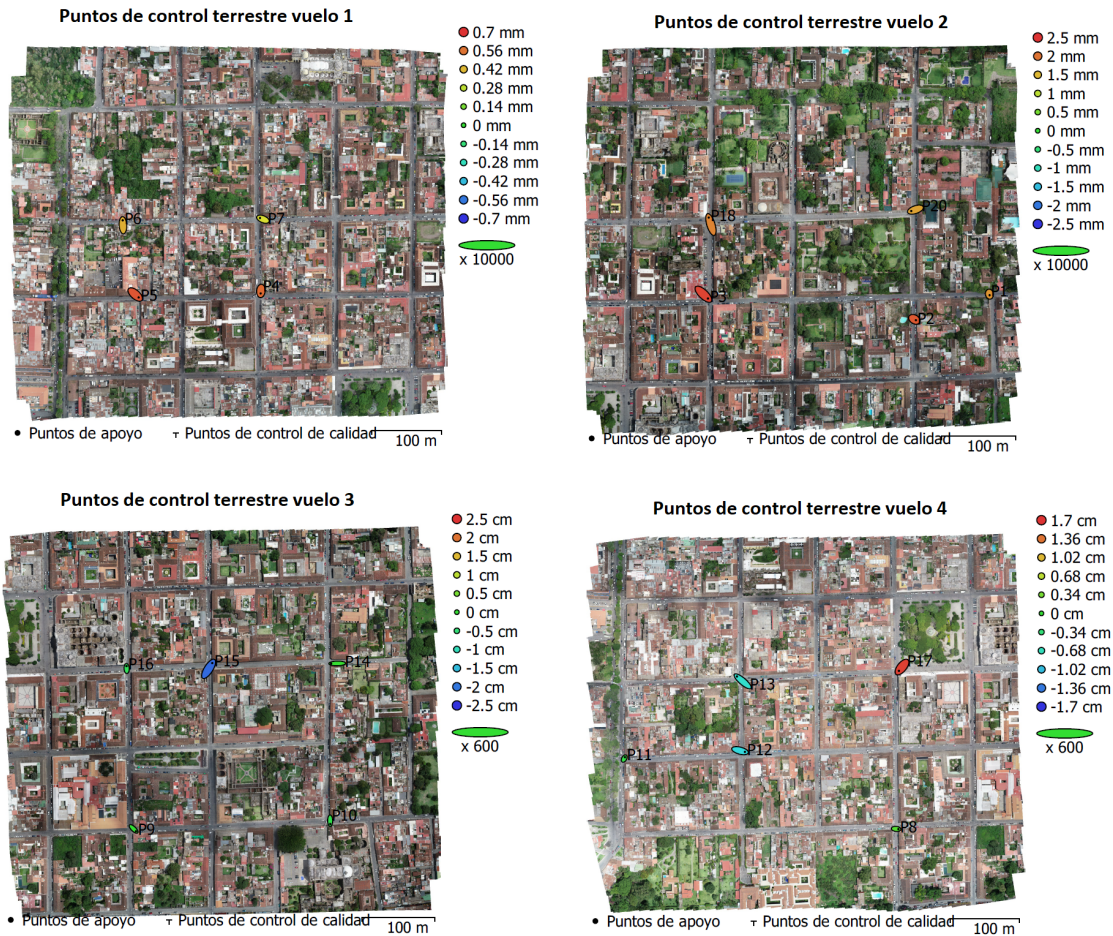


Como es de esperar, las zonas centrales son las que tienen mayor cobertura de traslape, ya que es allí donde se toma la mayor parte de las fotografías y se superponen de forma correcta. Las zonas exteriores no se llegan a cubrir de forma adecuada ya que no hay suficientes imágenes que permitan obtener un porcentaje de traslape conveniente para obtener puntos de enlace. Por tanto, son las zonas centrales la que presentan mayor calidad y precisión y las zonas exteriores son las que tendrán mas probabilidad de presentar errores.

6.1.1. Errores en los puntos de control terrestres

El uso de puntos de control es indispensable para georreferenciar las imágenes correctamente. Si el drone tiene sistemas de localización mas avanzados que los convencionales, (por ejemplo RTK), los puntos no son necesarios ya que el dispositivo puede calcular las coordenadas de forma precisa. El mínimo de puntos de control es 3, pero se recomienda tener al menos 5. Dependiendo de la complejidad del terreno, puede ser necesario utilizar más.

Figura 79: Mapa de errores en los puntos de control terrestres



Errores en los puntos de control del vuelo 1

Figura 80: Errores en los puntos de control del vuelo 1

Nombre	Error X (mm)	Error Y (mm)	Error Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
P4	-0.0670238	-0.706355	0.578145	0.91525	0.012 (10)
P5	0.959207	-0.842892	0.629172	1.42352	0.018 (14)
P6	-0.0805312	1.39083	0.443369	1.462	0.015 (12)
P7	-0.859158	0.342442	0.334191	0.983414	0.030 (11)
Total	0.645989	0.902921	0.509502	1.22154	0.020

Errores en los puntos de control del vuelo 2

Figura 81: Errores en los puntos de control del vuelo 2

Nombre	Error X (mm)	Error Y (mm)	Error Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
P1	0.0526507	-0.283858	1.77073	1.79411	0.012 (6)
P18	-0.579463	1.88604	1.88108	2.72606	0.029 (12)
P2	0.415115	-0.246509	2.19452	2.247	0.099 (9)
P20	-1.13811	-0.390917	1.68476	2.0704	0.024 (7)
P3	1.22338	-1.15804	2.35181	2.89288	0.037 (3)
Total	0.812753	1.01906	1.99295	2.38137	0.054

Errores en los puntos de control del vuelo 3

Figura 82: Errores en los puntos de control del vuelo 3

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
P10	0.0251857	-1.48536	-0.201687	1.49921	0.240 (4)
P14	-2.79295	-0.0616026	0.021366	2.79371	0.121 (3)
P15	1.67248	2.65275	-2.11727	3.78379	0.068 (3)
P16	-0.0530368	1.10901	-0.304517	1.15128	0.057 (3)
P9	1.10282	-1.06779	-0.012135	1.5351	0.168 (3)
Total	1.53736	1.52429	0.960919	2.36861	0.155

Errores en los puntos de control del vuelo 4

Figura 83: Errores en los puntos de control del vuelo 4

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
P11	0.371551	0.670616	-0.108601	0.77432	0.069 (3)
P12	2.35186	-0.60246	-0.876592	2.58121	0.164 (3)
P13	-2.76052	2.34837	-0.785085	3.70832	0.155 (2)
P17	-1.46786	-1.82081	1.6298	2.85065	0.181 (2)
P8	1.07759	-0.103514	0.161453	1.09452	0.388 (5)
Total	1.82239	1.3895	0.903203	2.46325	0.253

Cuadro 23: Resolución obtenida de cada bloque fotogramétrico

Resolución final de ortofotos (cm/píxel)	
Bloque 1	2.29
Bloque 2	2.09
Bloque 3	2.24
Bloque 4	2.37
Media	2.25

Cuadro 24: Criterios de aceptación según el error obtenido en los puntos de control

Error en los puntos de control	Descripción
El error de los puntos de control es menor al GSD promedio	El error se encuentra en un rango aceptable
El error de los puntos de control es menor a 2 veces el GSD promedio	El error de los puntos de control es considerable y se recomienda verificar si afecta en gran medida la calidad del proyecto
El error en los puntos de control es mayor a 2 veces el GSD promedio	Este error ya no se considera aceptable y puede indicar un error grave en la medición de puntos de control

[43]

Cuadro 25: Verificación del error en los puntos de control

Bloque	Error (cm)	Resolución (cm/píxel)	Verificación
1	0.122	2.29	Cumple
2	0.238	2.09	Cumple
3	2.369	2.24	Error considerable
4	2.463	2.37	Error considerable

6.1.2. Análisis de ortofotos

Los mapas de las ortofotos finales se encuentran en la parte de anexos. Aquí se resumirán los resultados obtenidos como los errores más frecuentes, resolución final, y una comparación entre las imágenes satelitales, las ortofotos del IGN, y las obtenidas como producto final.

Comparación entre Google Earth y las ortofotos obtenidas

Figura 84: Comparación de resolución de fotos a una altura de 70 metros



Evidentemente, como se observa en la Figura 84, las imágenes obtenidas con el dron tienen una calidad muy superior a las imágenes satelitales que ofrece Google Earth. Esto se debe a existe una gran diferencia entre la altura a la que son tomadas las fotografías desde el satélite y la altura a las que toma el dron. Este último vuela mucho más cerca y con una cámara adecuada es posible conseguir imágenes con gran detalle.

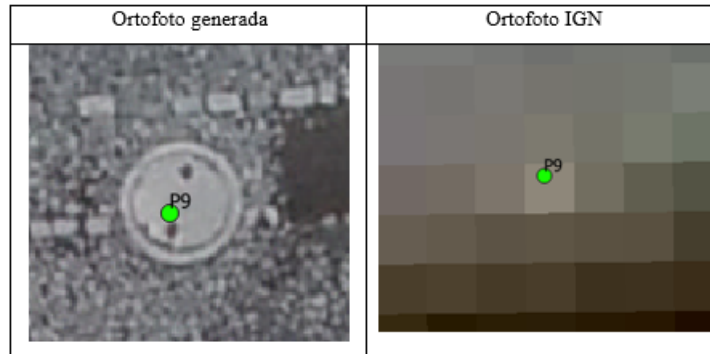
Mientras que en el lado izquierdo se ve claramente elementos de la calle como postes o tapaderas, la imagen derecha ya no permite visualizar ningún objeto. Es aquí donde se evidencia claramente una ventaja de una ortofoto generada por un usuario sobre las generadas por imágenes satélites, y es la capacidad de poder visualizar de forma clara los objetos que hay en las calles, delimitaciones de los terrenos o casas, delimitación de calles y banquetas, etc.

No obstante, es necesario comentar que también existe un cierto desfase entre las calles, sobreponiendo las ortofotos generadas en las proporcionadas por Google Earth. Esto se pudo dar debido a la calidad con las que se procesaron las fotos. Dado la cantidad de fotos y el equipo disponible, no fue posible alinear las fotografías y

crear la nube de puntos densa con alta calidad, lo cual pudo afectar en la precisión final de las ortofotos. Tomando en cuenta como referencia las calles, existen desfases entre ellas entre 1 y 2 metros entre ortofotos.

Comparación entre las ortofotos finales y las del IGN

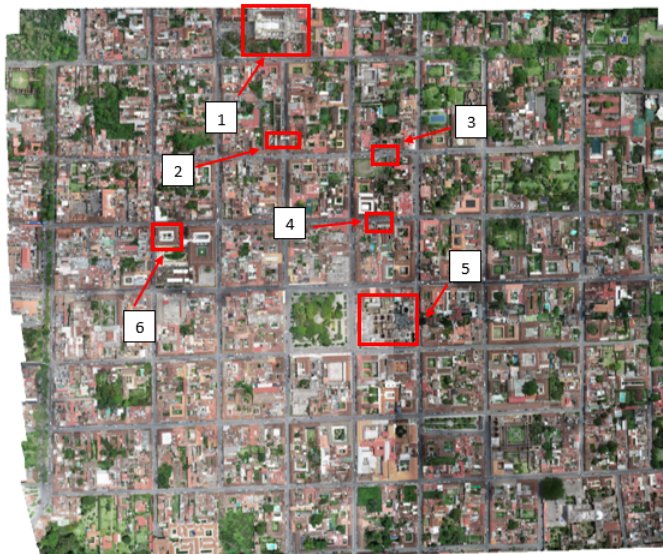
Figura 85: Comparación de resolución de fotos a escala 1/50



De igual manera, al comparar las ortofotos generadas con las del IGN, se nota una mejora en la resolución de las primeras. Dejando ambas fotografías a una escala de 1/50, en el lado izquierdo se observa claramente la tapadera del drenaje, mientras que en lado derecho no es posible distinguir ningún objeto.

Errores en las ortofotos

Figura 86: Ubicación de errores en las ortofotos finales



En la Figura 86 se observa en qué parte de la ortofoto final existen errores. En ella se marcan algunos ejemplos, pero la mayoría de errores se presentan en las uniones o donde se superponen las diferentes ortofotos. A continuación se presentan los errores según la numeración mostrada en la imagen.

Figura 87: Error 1



Una de las limitaciones de las ortofotos es que dependen de la calidad del MDS. Por tanto, los errores e imprecisiones en la determinación de la posición de la cámara en el momento del disparo y la inclinación del dispositivo afectan directamente la calidad final de la ortofoto.

Otro error es el desplazamiento con respecto a su posición real de los objetos que están situados a nivel del suelo. Esto es usual en techos de edificaciones o elementos que se encuentran a gran altura respecto al nivel del terreno. Esto se observa en la Figura 87, donde claramente se ve que la cúpula no está completa. Además, la rectificación no se hizo correctamente, pues es posible observar los muros de la iglesia en perspectiva.

Figura 88: Error 2



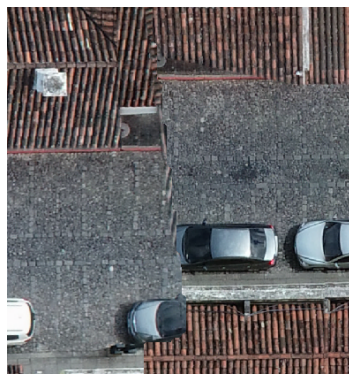
En la Figura 88 se observa que uno de los objetos salió distorsionado. Esto probablemente fue causado por el efecto rolling shutter, el cual hizo que las imágenes salieran con distorsiones que no permitieron reconstruir el objeto de forma adecuada. La mayoría de imágenes tomadas en esa zona presentan cierto nivel de inclinación (el objeto se ve en perspectiva), lo cual pudo haber causado que no se reconstruyera el objeto al momento de realizar la proyección ortogonal.

Figura 89: Error 3



Otra limitación que influye en la calidad final de las ortofotos, es la necesidad de unir varios bloques fotogramétricos, tal y como sucedió en este proyecto. El resultado de esto es una imagen continua en donde se existen desfases o imperfecciones como la que se ve en la Figura 89. Cabe destacar que procesar cada bloque por separado genera un error en cada modelo creado a partir de las fotografías. Al final, se tiene un error acumulado en cada levantamiento, lo que fue otro factor que influyó en el desfase de las imágenes.

Figura 90: Error 4



La Figura 90 es otro ejemplo del que fue el error más recurrente en las zonas de traslape de las diferentes ortofotos. En la Figura 78 se visualiza que en las partes exteriores de cada vuelo hay poco traslape entre imágenes. Por ello, en estas zonas existe mayor incertidumbre en la ubicación de los puntos estereoscópicos. El área de traslape que se dejó entre cada vuelo no fue suficiente para obtener la información necesaria y calcular la posición de las imágenes de forma correcta. Por esto, existen desfases entre las calles o en elementos como techos.

Al analizar cada bloque por separado, no se tomaron en cuenta las imágenes en común entre cada vuelo. Estas imágenes contribuyen a generar puntos de enlace ya que existe mayor zona de traslape, y por tanto, mejora la precisión. Esto es algo que se debe tomar en cuenta si el usuario se ve en la necesidad de analizar diferentes bloques fotogramétricos. Siempre se deben incluir las imágenes que comparten los diferentes vuelos para que no ocurran este tipo de desfases cuando se intenten unir todas las ortofotos.

Figura 91: Error 5



En la Figura 91 se evidencian los errores mencionados anteriormente. En esta zona existe una deficiencia de traslape que genera desplazamiento en la esquina superior derecha y desfases entre las diferentes ortofotos, por lo que la edificación se ve reconstruida por partes desalineadas. Además, se evidencia que las fotos se tomaron en horarios muy diferentes porque hay zonas con muchas luz y otras mas oscuras.

En la Figura 91 también se notan las sombras, las cuales afectan la restitución de las fotografía. Estas usualmente dificultan al programa la búsqueda de puntos homólogos, debido a la diferencia drástica de color. Este factor usualmente es algo que no es posible evitar, sin embargo se debe buscar la hora óptima en que los rayos del Sol generen la menor cantidad de sombras posibles.

Figura 92: Error 6

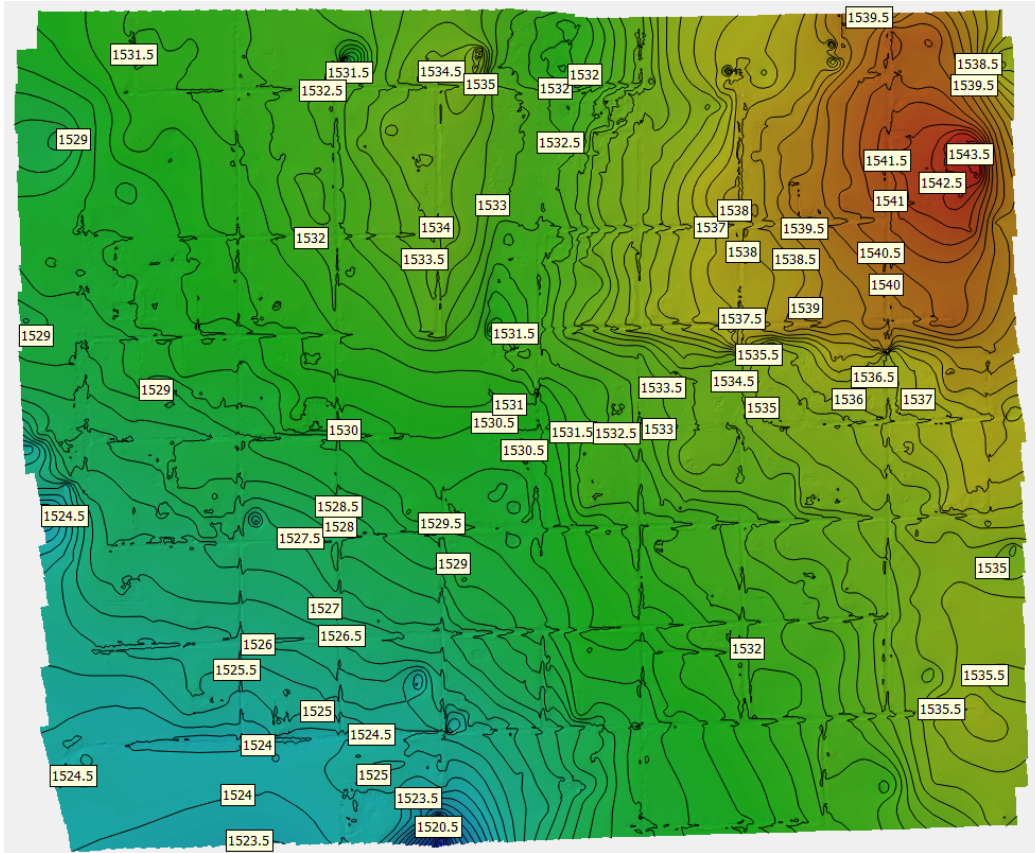


En la Figura 92 se ve un desfase en el techo de una casa. Debido a que todos los levantamientos se procesaron en baja calidad, el modelo de elevación digital cuenta con baja precisión y por tanto, genera este tipo de errores en algunas construcciones. Esto se debe que al generar la restitución, el programa considera que hay partes del tejado a diferentes alturas, por lo que se genera un desfase entre las áreas del techo.

6.1.3. Análisis de curvas de nivel

El mapa final de curvas de nivel se encuentra en la parte de anexos. En esta sección se evaluarán los resultados obtenidos y las posibles causas de los errores que se presentan en el modelo elevación digital. Las curvas obtenidas con Agisoft se muestran en la siguiente figura:

Figura 93: Curvas de nivel obtenidas (sin depurar)



Las curvas de nivel obtenidas no son del todo confiables, ya que el programa nos las genera suavizadas. Por el contrario, se observan muchas imperfecciones como agujeros o pequeños "montículos" que en realidad no existen. No obstante, estas no son completamente erróneas. Si se eliminan los pequeños errores, se visualiza el comportamiento real del terreno. En realidad, el nivel asciende desde región suroeste del casco hasta la esquina opuesta (noreste), y las curvas muestran la misma tendencia. Al comparar el MDE generado con el que realizó el IGN, las alturas sobre el nivel del mar varían entre 4 y 6 metros. Sin embargo, las elevaciones obtenidas con las fotografías del dron se alinearon con las alturas obtenidas del GPS, por lo que es probable que las del IGN tengan menos precisión. A continuación se muestran las curvas depuradas y las generadas con el MDE el IGN.

Figura 94: Curvas de nivel obtenidas (depuradas)



Figura 95: Curvas obtenidas con el modelo de elevación digital del IGN

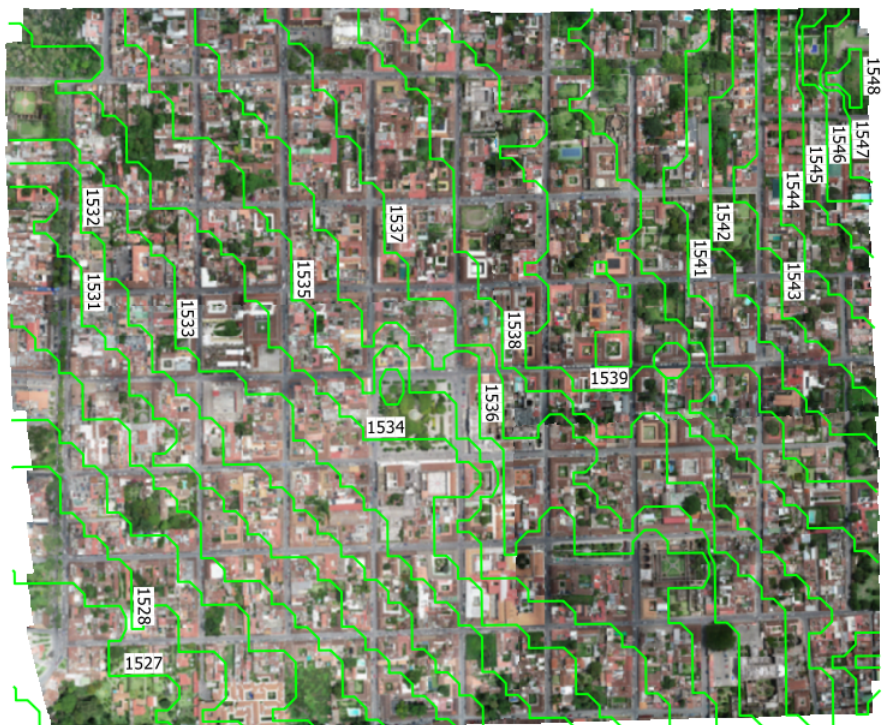
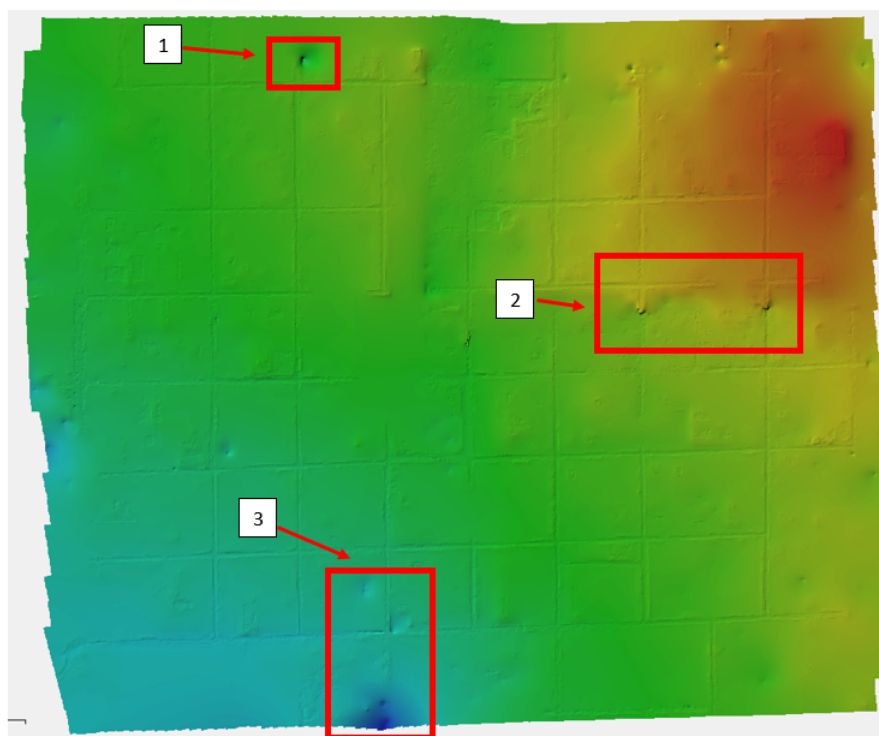


Figura 96: Imperfecciones en el modelo de elevación digital



Durante el proceso de generación del modelo de elevación digital se presentan diferentes fuentes de error. El más común de ellos es la obtención de datos erróneos de altitud. Esto se debe a que la precisión de los sensores del drone varía debido a la inestabilidad de la conexión del dispositivo con los satélites. Además, el sensor de altura del UAV se basa en las variaciones de la presión atmosférica, por lo que las condiciones climatológicas afectan su precisión.

Por otra parte, en ocasiones se dan errores de interpolación durante el procesamiento de las imágenes. El más común es la creación de hoyos (pits) o depresiones, los cuales son áreas rodeadas por celdas de mayor altitud. Así pues, existen casos contrarios en donde se forman picos (peaks) rodeadas por celdas con altitudes más bajas.

Cabe destacar que la presencia de viento hace que el traslape no sea regular durante las pasadas del drone. Esto genera zonas con menor recubrimiento de imágenes, y por tanto no es posible generar la cantidad necesaria de puntos de enlace para mejorar la precisión del modelo.

Las curvas de nivel obtenidas no representan de forma exacta el suelo del casco urbano. Esto se debe a que hay muchas imperfecciones y obstáculos en el modelo de elevación digital que no permiten obtener las alturas reales del suelo. Esto se observa en la Figura 96, donde hay ciertas partes que presentan elevaciones o hundimientos que en realidad no deberían existir. Aunque se trató de clasificar la nube de puntos para que solo tomara en cuenta las calles para generar el modelo de elevación, el

programa no es capaz de diferenciar perfectamente los objetos. Por ello aparecen algunos agujeros o pequeños “bultos”. Esto se aprecia de mejor manera en la siguiente figura.

Figura 97: Error 1 causado por la interpolación

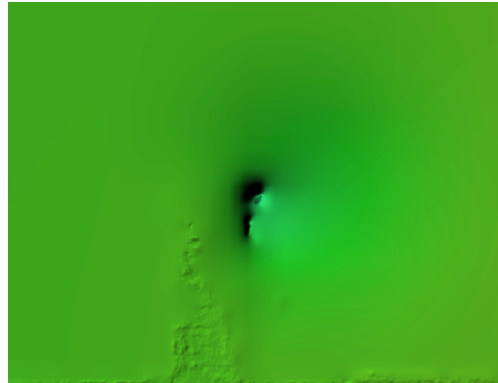
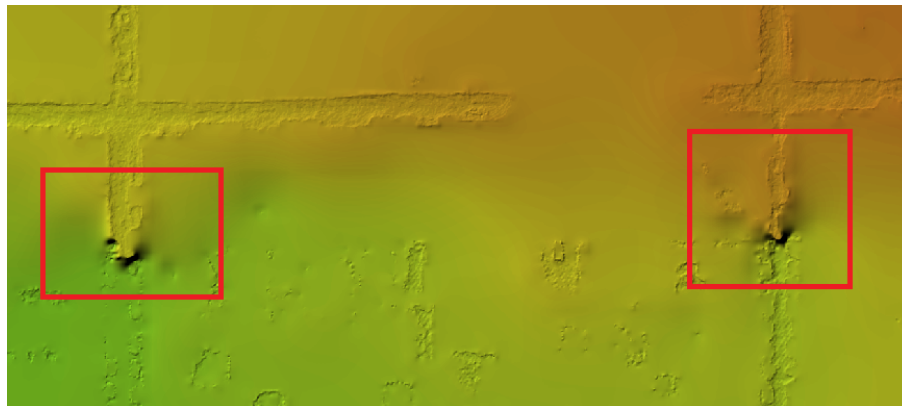


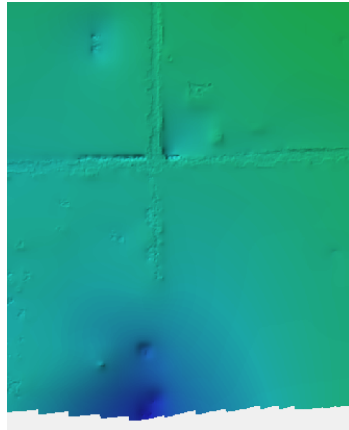
Figura 98: Error 2 en el modelo de elevación digital



En la Figura 98 se observa que existen pequeños bultos en medio de las calles. Este error tiene 2 fuentes de error probables. La primera como se mencionó anteriormente, la interpolación que hace el programa produzca este tipo de errores, lo cual causa un cálculo incorrecto de la elevación. La segunda es que el drone haya tomado una lectura de elevación errónea por un obstáculo. Al generar el modelo de elevación se notaron cuatro de obstáculos más comunes que interfirieron con la generación correcta de las curvas de nivel:

1. Vehículos
2. Vegetación
3. Construcciones en general
4. Partes de infraestructura de las calles como banquetas, postes, etc.

Figura 99: Error 3 en el modelo de elevación digital



1. La guía describe los pasos necesarios para realizar un plan de vuelo de forma adecuada. Los fundamentos teóricos y las recomendaciones generadas tomando como base la fase experimental del proyecto dan una idea general de los parámetros y las consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de realizarlo
2. El plan de vuelo realizado para la toma de fotografías en el casco urbano de Antigua Guatemala permitió obtener las imágenes de forma adecuada y sin contratiempo. Las estimaciones hechas con Pix4D capture ayudaron a hacer una estimación precisa del uso de baterías y de la cantidad de vuelos requeridos para cubrir toda el área de estudio. Un inconveniente que se notó hasta el momento de procesar las imágenes fue que no se dejó suficiente traslape entre bloques fotogramétricos lo cual provocó errores en ciertas partes de las ortofotos.
3. La guía explica todos los pasos que se llevaron a cabo para procesar las imágenes y obtener el modelo de elevación digital y las ortofotos. En ella se detallan todos los parámetros que pueden utilizarse o modificarse según las necesidades de cada proyecto. Todos ellos se describen tomando el manual de Agisoft PhotoScan como referencia.
4. El modelo de elevación digital obtenido no fue el esperado. La tecnología disponible no permite obtener las elevaciones de forma precisa. Además, se trata de una zona urbana donde hay muchos objetos que interfieren con la obtención de las alturas del suelo de forma directa. A pesar de que se intentó clasificar la nube de puntos, esto no fue suficiente para eliminar todos los elementos que no fueran parte del terreno natural. Por último, la interpolación que se generó al procesar las imágenes muestra un comportamiento aproximado al real.
5. La precisión obtenida en las ortofotos es alta, con errores de hasta 2.5 cm. Luego de proyectar las ortofotos generadas en Google Earth, estas coinciden con la posición de las imágenes satelitales. Sin embargo, existe cierto desfase entre las

calles, tanto con las imágenes satelitales como en las ortofotos provistas por el IGN. De igual forma, existen desfases entre calles y objetos al superponer los diferentes bloques fotogramétricos, error que fue causado por procesar los vuelos por separado.

6. La resolución es, por mucho, más alta que las ortofotos provistas por el IGN y las imágenes satelitales que pueden obtener de Google Earth. Se pueden distinguir objetos de forma clara, lo cual permite un análisis más profundo de las ortofotos generadas. La resolución final es en promedio 2.25 cm/píxel en los cuatro bloques fotogramétricos.

Recomendaciones

1. Se recomienda que al abarcar grandes extensiones de terreno, se utilice un dispositivo más apropiado como un dron de ala fija. Si no está disponible, se pueden realizar varios vuelos, pero tomando en cuenta ciertas consideraciones adicionales.
2. Si se quieren obtener curvas precisas, se recomienda complementar el análisis con un levantamiento topográfico tradicional o utilizando otras tecnologías, por ejemplo, LIDAR o RTK.
3. Si no hay equipo disponible como el que se menciona anteriormente, es posible mejorar la precisión de las curvas tomando mayor cantidad de puntos de control con GPS, y utilizando otras técnicas más apropiadas para la clasificación de la nube de puntos.
4. Este tipo de levantamientos se recomienda para zonas libres de vegetación y un poco más pequeñas. Por ejemplo, para obtener curvas de un terreno que se utilizará para construir
5. Si la tecnología disponible es como la del proyecto, no se recomienda aplicar el método para obtener elevaciones en zonas urbanas. La gran cantidad de obstáculos no permite generar curvas de nivel exactas.
6. Se recomienda procesar todas las fotografías en un solo bloque. Con este disminuye el error y se obtiene un mejor traslape entre las imágenes
7. Siempre se debe tomar en consideración las capacidades del equipo previo a la toma y procesamiento de las fotos. En caso contrario, la probabilidad de encontrar obstáculos. como dificultad para procesar las imágenes o no obtener el producto esperado, es bastante alta.
8. La municipalidad puede hacer una inversión en equipo que les permita aplicar este método en diferentes áreas. Este método les facilitaría el control de te-

renos y construcciones, catastro y evaluación de infraestructura por medio de ortofotos.

-
- [1] E. Quirós, *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. 2014, págs. 45-57, ISBN: 9788469713174.
 - [2] P. Wolf y R. Brinker, *Topografía*, 9a. edició. Santafé de Bogotá: ALFAOMEGA S.A., 2000, pág. 800, ISBN: 958-682-089-0.
 - [3] R. A. Claros Zelaya, A. E. Guevara Aguilar y N. R. Pacas Cruz, “Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados”, Tesis doct., Universidad de El Salvador, 2016, pág. 319. dirección: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/1/50108282.pdf>.
 - [4] V. H. Burgos y A. P. Salcedo, “Modelos Digitales de Elevación: Tendencias, Correcciones Hidrológicas y Nuevas Fuentes de Información”, *Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino*, n.º October 2014, pág. 16, 2016. dirección: <http://www.b.ns.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf>.
 - [5] D. Jiménez-Monge y M. Méndez, “Generación de Modelos de Elevación Digital (DEM) a partir del análisis fotogramétrico utilizando imágenes CARTA-2005 Generation of Digital Elevation Models (DEM) by means of Photogrammetric Techniques using CARTA-2005 Imagery Palab”, vol. 26, n.º 4, 2013.
 - [6] L. I. Virgós Soriano y F. Garcia Cepeda, “La prtografía y la cartografía catastral”, inf. téc. 5, 2015. dirección: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2007-5/34.pdf>.
 - [7] Q. Zhou, “Digital Elevation Model and Digital Surface Model”, *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, n.º October, págs. 1-17, 2017. DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg0768.
 - [8] J. Fallas, “Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones”, *Mapealo. Com*, pág. 83, 2007.
 - [9] G. Cepeda Barrera y V. Castañeda Osorio, “Evaluación de calidad en Modelos Digitales de Elevación generados a partir de métodos de captura directa e indirecta: Caso de estudio, Lote B perteneciente a la sede El Vivero de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas”, 2016.

- [10] M. Soria Molina, “Metodología Para Ejecución Y Control De Calidad Para Ortofotos , Mediante Combinación De Sensor Digital Con Lidar En Zonas Rurales . Para Ortofotos , Mediante Combinación De Sensor”, Tesis doct., Universidad Politécnica de Madrid, 2014, pág. 223.
- [11] F. Buill Pozuelo, “Técnicas de levantamiento fotogramétrico de estructuras antiguas : ejemplo de las murallas de Barcelona y de Alepo”, *Jornadas Internacionales sobre la intervención en el Patrimonio Arquitectónico. .Actas del XXXIV Curset. Jornadas Internacionales sobre la intervención en el Patrimonio Arquitectónico: Fortificaciones : intervenciones en el patrimonio defensivo".*, págs. 81-86, 2013. dirección: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/17628?>.
- [12] J. A. Sánchez Sobrino, *Introducción a La Fotogrametría*, 2006. DOI: 10.13140/2.1.1072.6722.
- [13] M. Neteler y H. Mitasova, “Processing of Aerial Photos”, en *Open Source GIS: A grass GIS Approach*, Second Edi, vol. 773, Boston, 2004, cap. 10, pág. 424.
- [14] L. Julián y S. Pérez, “Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lidar , el posible futuro de la cartografía catastral urbana”, *CT: Catastro*, vol. 53, págs. 131-154, 2005.
- [15] V. E. Ortega Cárdenas, “Procedimiento para la captura de datos fotogramétricos con la ayuda de aparatos controlados remotamente, como herramienta para la evaluación en estabilidad de taludes y difusión con realidad aumentada.”, Tesis doct., Universidad Nacional de Colombia, 2018, pág. 231, ISBN: 9788566800197. arXiv: [arXiv: 1011 . 1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- [16] E. E. Santana Cruz, “Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área”, Tesis doct., Universidad Autónoma de Barcelona, 2017, pág. 154. dirección: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/456309/eesc1de1.pdf?sequence=1>.
- [17] J. Santamaría Peña y T. Sanz Méndez, *Fundamentos de Fotogrametría*. 2011, pág. 70, ISBN: 978-84-694-0865-0.
- [18] F. Reuter, “Práctico 3: Determinación De Escala En Fotografías Aéreas Mediciones Sobre Fotografías Aéreas”, *Carpeta de Trabajos Prácticos: Teledetección Forestal Determinación*, págs. 17-22, 2002.
- [19] J. Aber, I. Marzloff y J. Ries, *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. 2015.
- [20] J. A. Soler, *Aprende a realizar topografía con drones*, 2016. dirección: <https://www.udemy.com/course/topografia-con-drones-parte-1/>.
- [21] B. Ruzgiene, “Requirements for aerial photography”, *Geodezija ir kartografija*, vol. 1541, n.º May 2015, págs. 37-41, 2004. DOI: 10.1080/13921541.2000.10552894.
- [22] Pix4D, *Pix4D Mapper*, Lausanne, 2012.
- [23] J. L. Berné, A. B. Anquela y N. Garrido, *GNSS.GPS: fundamentos y aplicaciones en geomática*. 2014, pág. 438, ISBN: 9788490482612. dirección: www.lalibreria.upv.es.
- [24] P. González, “Levantamiento Mediante GPS”, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, inf. téc., 2007. dirección: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4651/pfc5890.pdf?sequence=1>.

- [25] A. Ayala Ramírez y M. M. Hasbun Bardales, “Aplicaciones y uso de la tecnología GPS diferencial de doble frecuencia con precisión centimétrica en el área de levantamiento y replanteo topográfico georreferenciado”, Tesis doct., Universidad de El Salvador, 2012.
- [26] C. Perdomo, J. Caicedo, N. Nuñez, D. Machado, J. Garcia y M. C. Pineda, “Establecimiento De Puntos De Control Terrestre Para La Corrección Planialtimétrica De ...”, *Conference Paper*, n.º March, pág. 8, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3415.4640.
- [27] M. Pistarelli, T. Pire y E. Kofman, “Caracterización de un Sistema GPS RTK de Bajo Costo”, *Revista Tecnología y Ciencia*, n.º 35, págs. 94-107, 2019. DOI: 10.33414/rtyc.35.94-107.2019.
- [28] Colorado Department of Transportation, “Survey Manual - Chapter 4: Aerial Surveys”, pág. 40, 2015. dirección: <https://www.codot.gov/business/manuals/survey/chapter-4/chapter4.pdf>.
- [29] C. Portalés y J. Lerma, “Georreferenciación GPS/INS de imágenes aéreas adquiridas con escáneres rotacionales: ejemplo práctico y resultados”, *Topografía Y Cartografía*, vol. 20, n.º 116, págs. 4-9, 2003. dirección: http://www.cartesia.org/data/articulos/fotogrametria/georreferenciacion%7B%5C_%7Dgps%7B%5C_%7Dins/georreferenciacion%7B%5C_%7Dgps%7B%5C_%7Dins.pdf.
- [30] Instituto Geográfico Nacional, *Red de estaciones de referencia de operación continua-CORS-*, 2019. dirección: <http://www.ign.gob.gt/redgeodesica.html> (visitado 19-06-2019).
- [31] J. G. Rejas Ayuga, “Tratamiento Digital Previo De Las Imágenes”, *Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008 Módulo*, vol. Módulo VII, 2008.
- [32] Wikipedia, *Ejes del avión*, 2019. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Ejes%7B%5C_%7Ddel%7B%5C_%7Davi%C3%B3n.
- [33] CEFOCCA, “Planificación del vuelo”.
- [34] C. Cabrera, A. Monaldi y G. Romero, “Corrección de la aberración de fase por efecto persian de sensores CMOS en microscopía holográfica digital”, vol. 25, págs. 75-79, 2013.
- [35] J. Vautherin, S. Rutishauser, K. Schneider-Zapp, H. Fai Choi, V. Chovancova, A. Glass y C. Strecha, “Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras”, vol. III, n.º July, págs. 12-19, 2016. DOI: 10.5194/isprsannals-III-3-139-2016.
- [36] PIX4D, *Rolling Shutter: The Drone Mapping Problem No One’s Talking About*, 2016. dirección: <https://medium.com/the-science-of-drone-mapping/rolling-shutter-the-drone-mapping-problem-no-one-s-talking-about-138945fe523d> (visitado 14-07-2019).
- [37] Geocom, *TRIMBLE R8S GNSS*, 2019. dirección: <https://www.geocom.cl/products/trimble-r8s-gnss>.
- [38] DJI, *PC GROUND STATION*, 2019. dirección: <https://www.dji.com/pc-ground-station/feature> (visitado 25-06-2019).
- [39] P. Gabrlik, “Boresight calibration of a multi-sensor system for UAS photogrammetry”, *12th International Conference ELEKTRO 2018, 2018 ELEKTRO Conference Proceedings*, n.º May, págs. 1-6, 2018. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398362.

- [40] DroneDeploy, *How do i use ground control points?*, 2018. dirección: <https://www.dronedeploy.com/blog/what-are-ground-control-points-gcps/> (visitado).
- [41] Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan User Manual*, 2018. dirección: www.agisoft.ru.
- [42] Pix4D, *Reprojection error – Support*, 2019. dirección: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-error> (visitado 11-10-2019).
- [43] —, *Pix4D*, 2019. dirección: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software> (visitado 25-06-2019).

Figura 100: Reporte entregado por la aplicación Pix4D 1

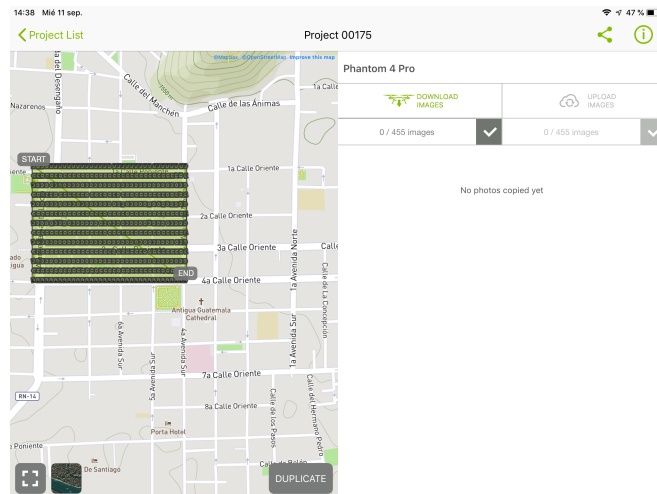


Figura 101: Reporte entregado por la aplicación Pix4D 2

Drone Type	Date	Time	Type
Phantom 4 Pro	Aug 9, 2019	9:36 AM	Grid
Flight Time	Location	Dimensions	Overlap
20min30s	14.559120°, -90.735649°	409m x 544m	80% - 70%
Camera Angle	Look Grid Center	Altitude	Path
90°	No	80m	7343m

Ok

Figura 102: Mapa de ortofotos finales

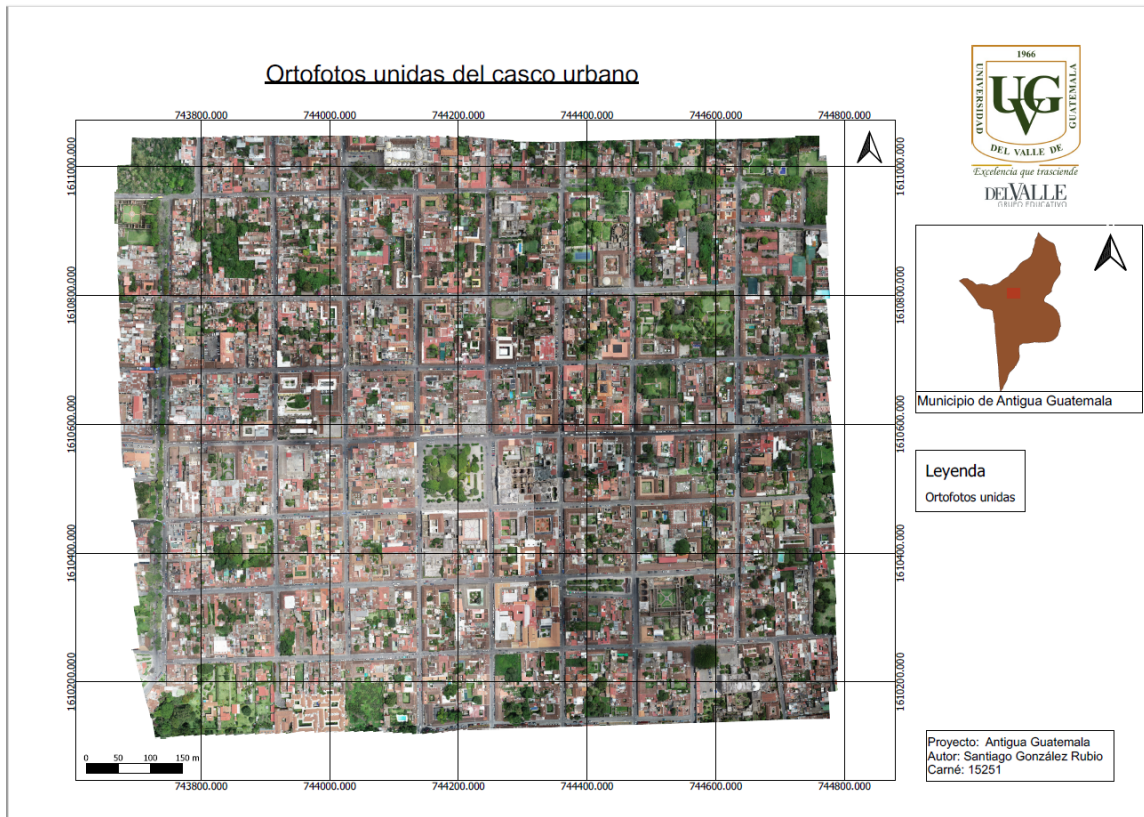


Figura 103: Mapa de división de vuelos

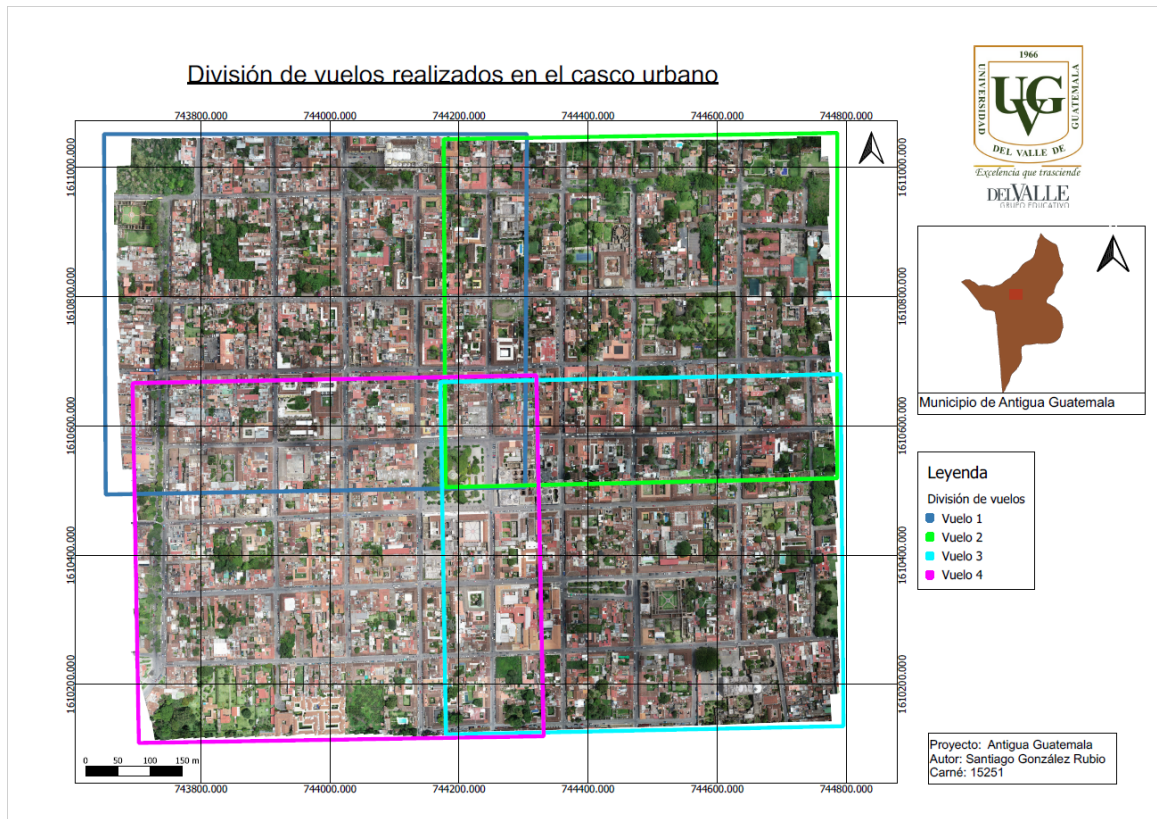


Figura 104: Ortofoto de vuelo 1

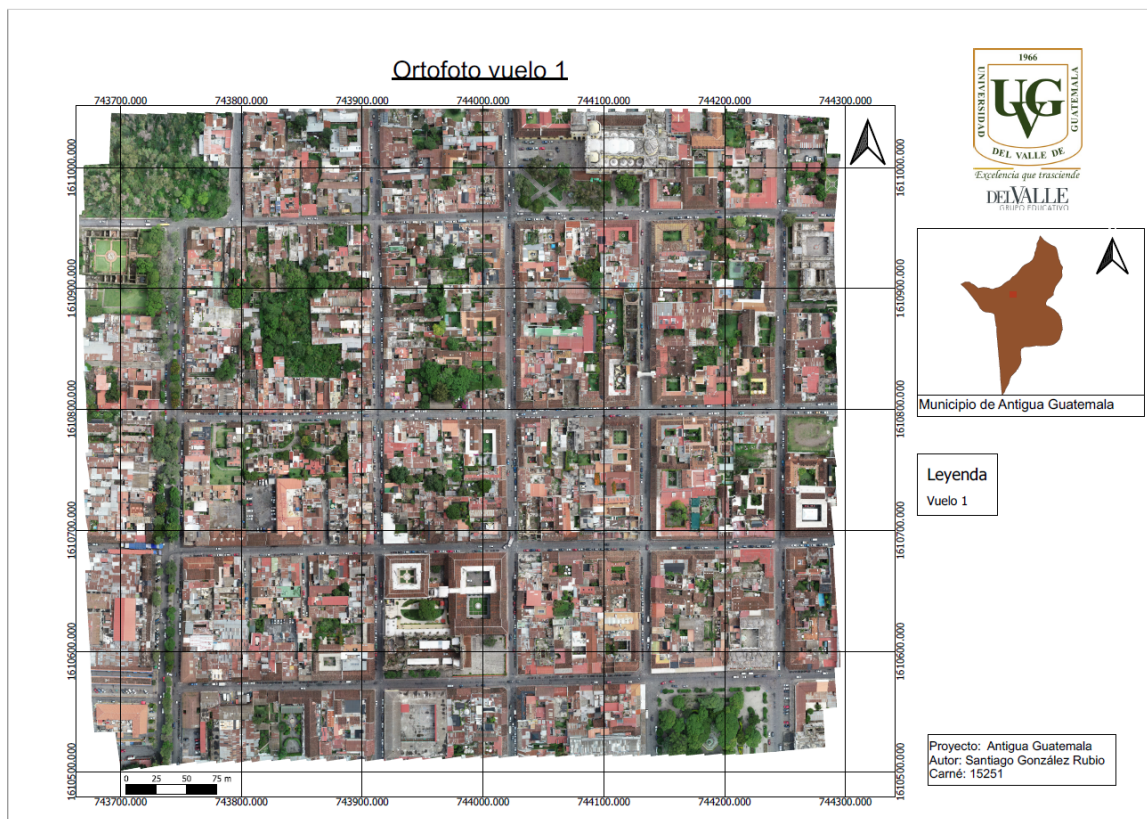


Figura 105: Ortofoto de vuelo 2

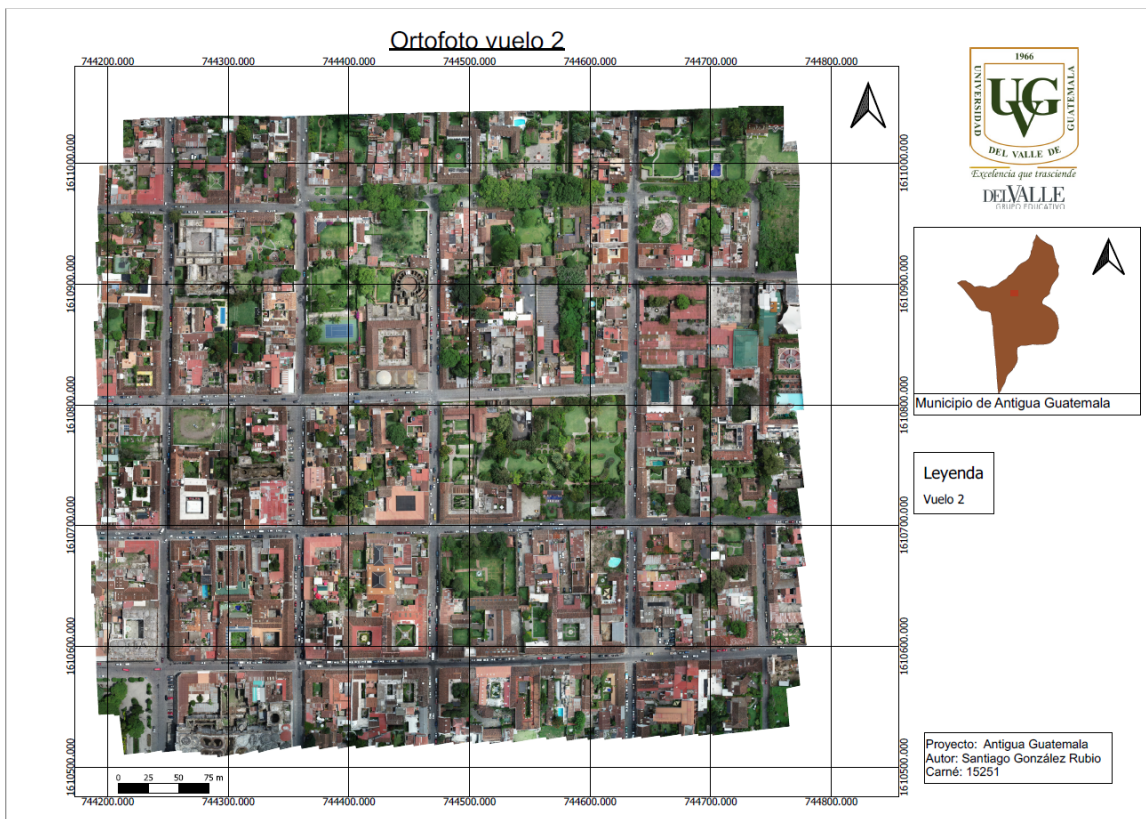


Figura 106: Ortofoto de vuelo 3

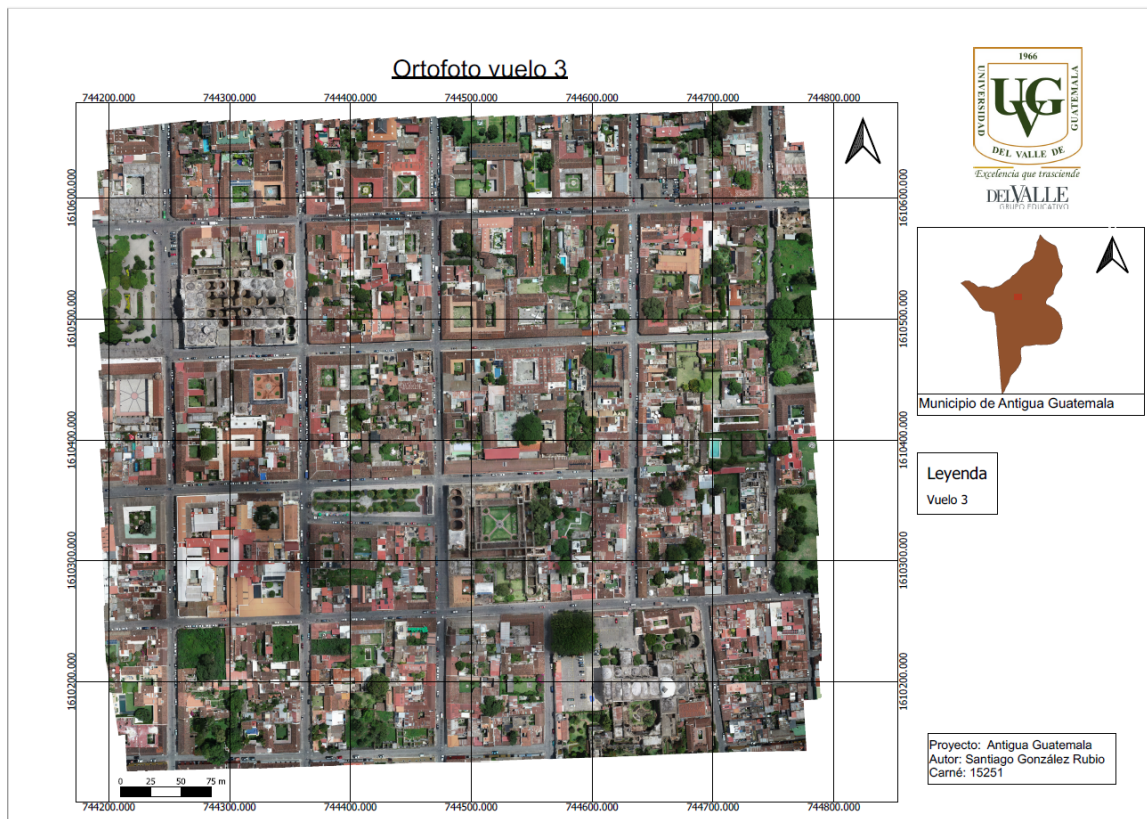


Figura 107: Ortofoto de vuelo 4

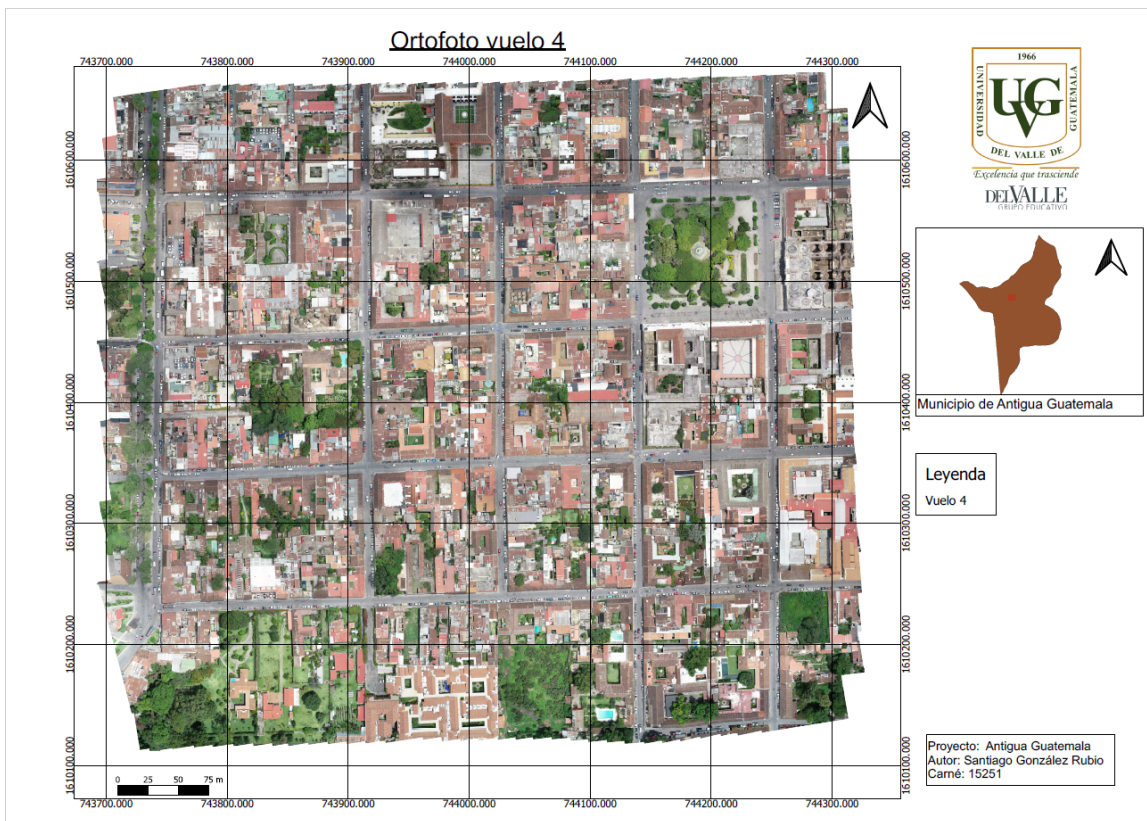


Figura 108: Mapa de curvas de nivel

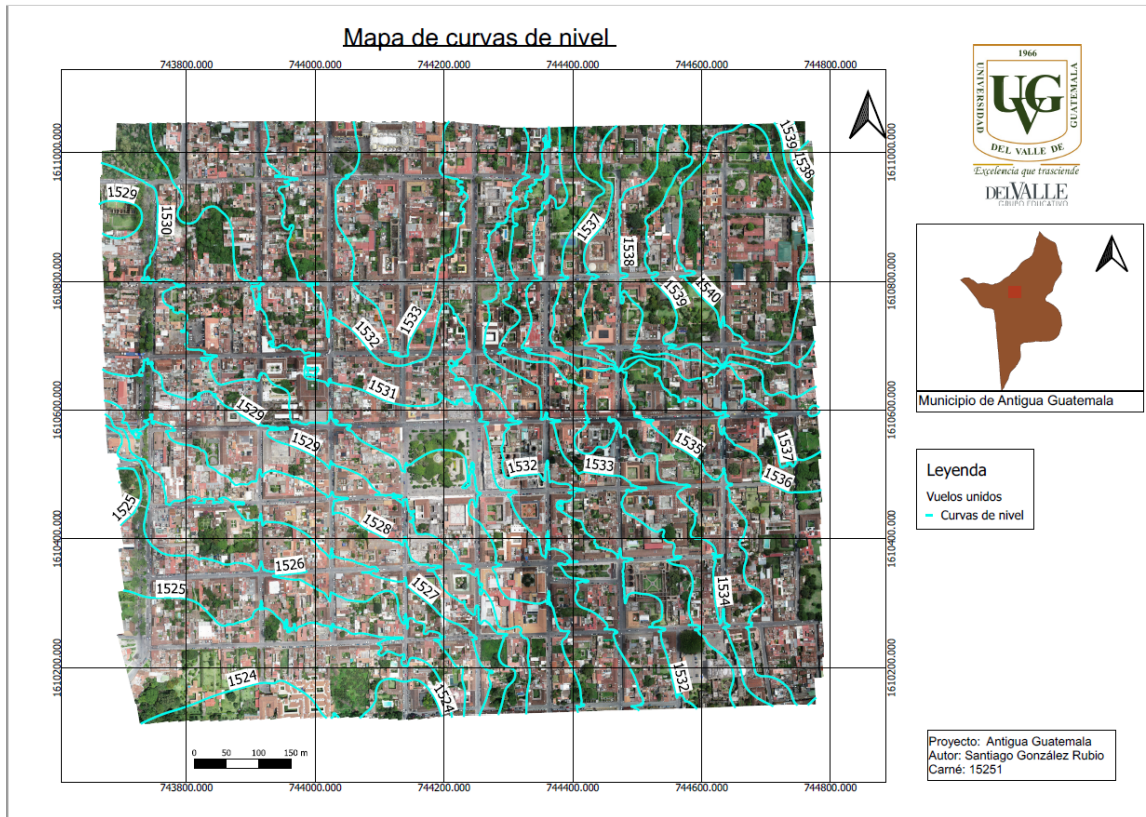


Figura 109: Mapa de curvas de nivel del IGN

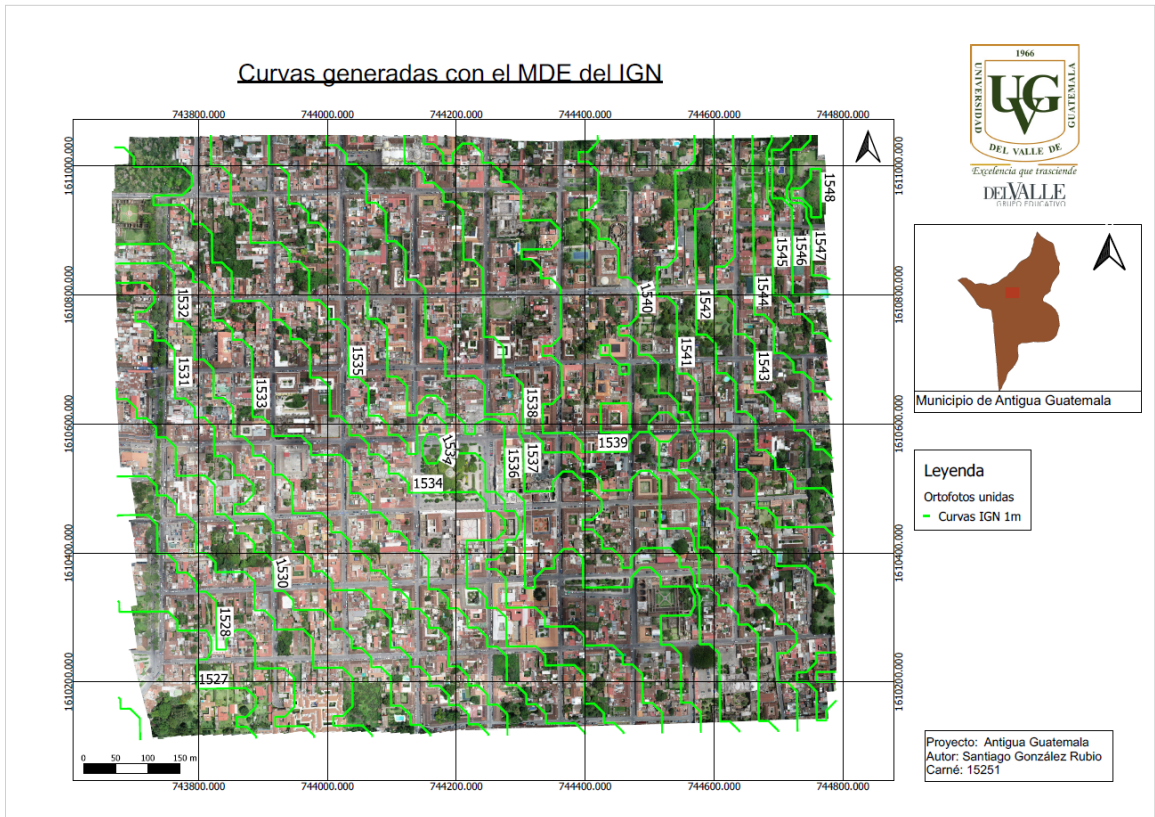


Figura 110: Ficha técnica para medir puntos de control 1

Medición de puntos					
Proyecto		Levantamiento Antigua Guatemala		Fecha	09-08-2019
Encargado medición		Enck Ries / Diego Franco		Lugar	Antigua Guatemala / Sacatepequez
No. Punto	ID Punto	Descripción	Número de Satélites	Hora inicio	Tiempo medición
1	P01	Tapadera frente a cafetería aminum	6	9:42	12
2	P02	Banqueta frente a Alamothená San Francisco	8	10:12	15
3	P03	Tapadera doble frente a mercado de artesanías	8	10:42	10
4	P04	Tapadera metálica frente a El Viejo Café	8	11:06	10
5	P05	Tapadera concreto frente a La Vieja terraza	8	11:23	10
6	P06	Tapadera concreto frente a Registro Ciudadanos	7	11:41	10
7	P07	Esquina NE frente a tapadera concreto	8	12:00	15
8*	P08	Tapadera rectangular metálica frente a La Ventana Internet	8	9:02	10
9	P09	Tapadera concreto frente a café Nepal	7	9:21	15
10	P10	Esquina entrada a monumento "Hermano Pedro"	8	9:50	10
11	P11	Tapadera metálica intersección 6a calle y av. Santa Lucía	8	10:23	10
12	P12	Tapadera metálica frente a café Rainboon	8	10:42	10
13	P13	Esquina frente a Iglesia 5a calle y 7a ave.	8	11:02	15
14	P14	Esquina SE intersección 1a ave y 5a calle	9	11:46	10
15	P15	Esquina NE intersección 2a ave y 5a calle	9	12:07	15
16	P16	Esquina sobre tapadera rectangular de concreto	7	12:28	15
17	P17	Esquina SE cercano a tapadera de concreto circular	7	1:16	15
18	P18	Tapadera doble metálica, la más cercana a esquina	8	4:24	15
19	P19	Banqueta opuesta a Posada Don Rodrigo	8	4:48	10
20	P20	Esquina NO intersección 1a ave 2a calle	8	5:11	15

Figura 111: Ficha técnica para medir puntos de control 2

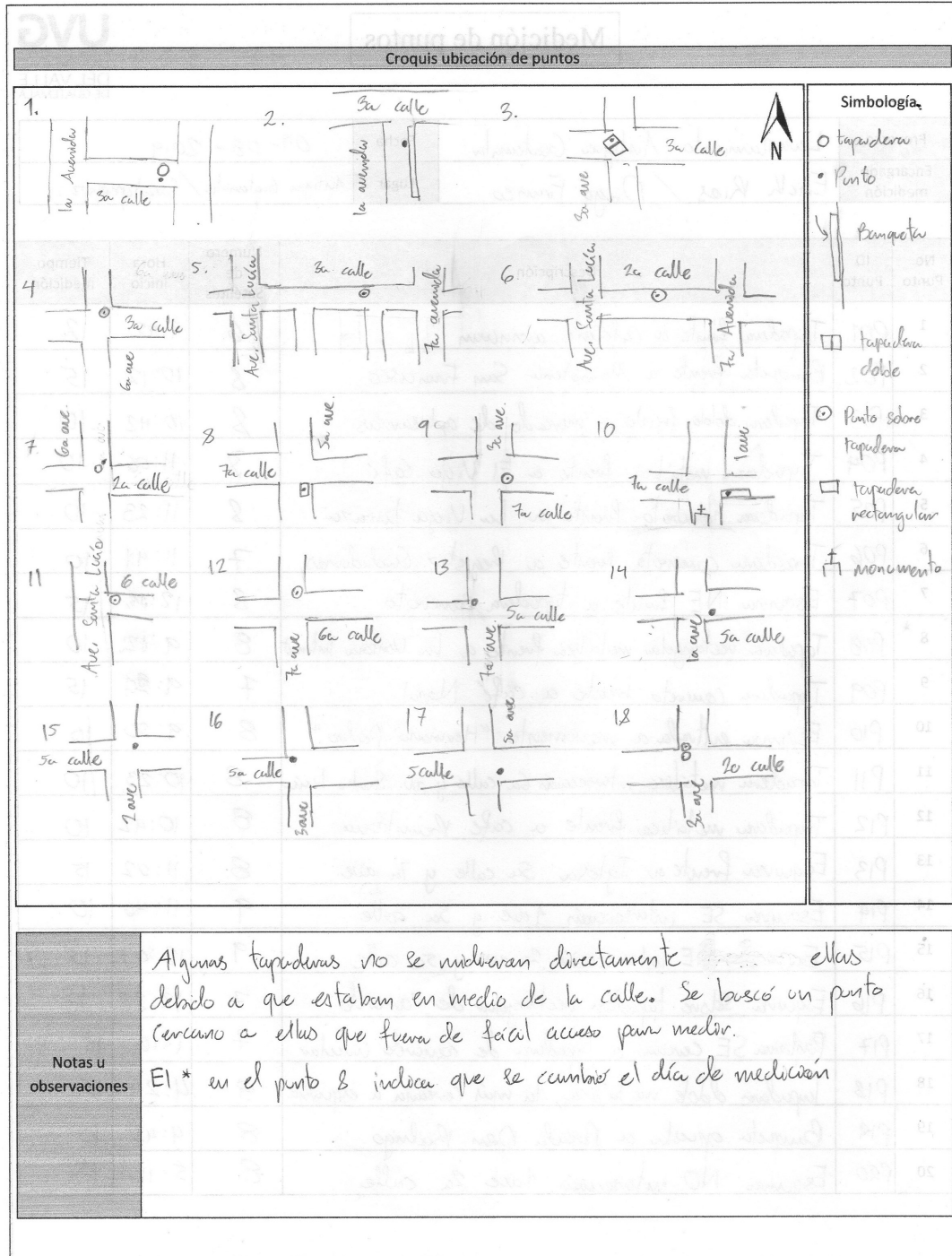



Figura 112: Ficha para toma de datos de vuelo en campo

Control de vuelo


 UNIVERSIDAD
 DEL VALLE
 DE GUATEMALA

Proyecto	Antigua Guatemala	Fecha	09-08-2019
Piloto	Santiago Ganzañer Rubio	Hora	9:36 a.m.
No. Vuelo	1 de 4		

Lugar de despegue	Latitud	Longitud	Elevación
Techo municipalidad	14.559120°	-90.735649	

Croquis área de vuelo

* Sa avenida = Avenida Santa Lucía

Altura de vuelo (m)	30m/92m	GSD (cm/píxel)	2.18	Velocidad	Medida
Duración (min)	20 min 30s	Ángulo cámara	90°	Tipo grilla	20
No. Batería	1 de 7	Traslape horizontal (%)	70	Traslape frontal (%)	70

Medidas del terreno					
Ancho (m)	544	Alto (m)	409	Área (m ²)	222,496

Figura 113: Ficha para elaborar un plan de vuelo 1


Plan de vuelo							
Elaborado por	Santiago González Rubio	Fecha	01/08/2019				
Departamento	Sacatepéquez	Municipio	Antigua Guatemala				
Proyecto	Levantamiento casco urbano de Antigua Guatemala	Uso de fotos	Generación de ortofotos y modelo de elevación digital				
Mapa de ubicación							
							
Dimensiones área de trabajo							
Área (hectáreas)	70.1	Perímetro (m)	3364				
Datos del dron							
Marca	Modelo	Tipo					
DJI	Phantom 4 Pro	Multirotor					
Parámetros de cámara							
Ancho (pixeles)	5472	Alto (pixeles)	3648	Resolución (MP)	20	Distancia focal real (mm)	8.8
Sensor							
Tipo	CMOS	Ancho (mm)	13.2	Alto (mm)	8.80		

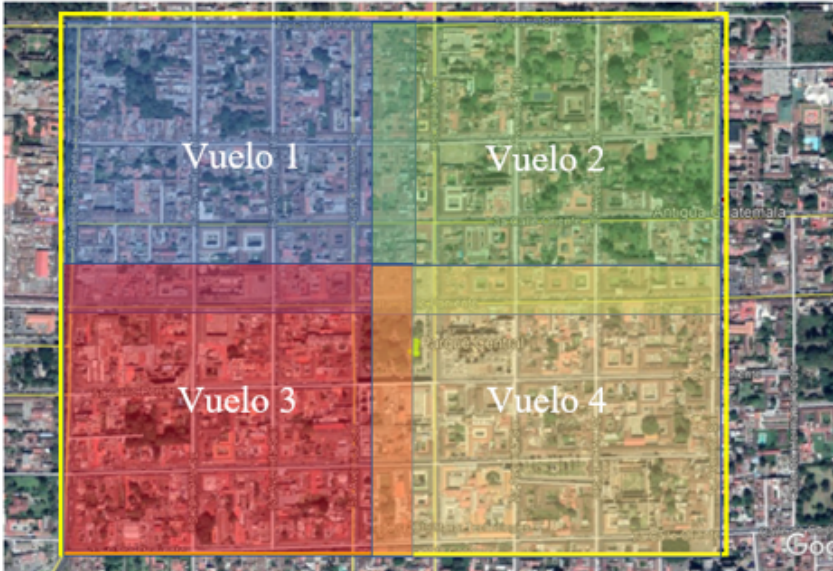
Figura 114: Ficha para elaborar un plan de vuelo 2

Parámetros de vuelo							
GSD (cm/píxel)	2.5	Altura de vuelo (m)	96	Traslapes (%)	70	Ángulo de cámara (grados)	90

Vuelos	Vuelo 1	Vuelo 2	Vuelo 3	Vuelo 4	Vuelo 5	Vuelo 6	Vuelo 7	Vuelo 8	Vuelo 9	Vuelo 10
Duración (min)	20	20	20	20						
Área (hectáreas)	22.2	21.1	21.1	22.0						

Lugar de despegue	Parque Central de Antigua Guatemala	Tiempo total estimado (hh:mm)	1:20	No. Baterías	4	Área total (hectáreas)	86.4
-------------------	-------------------------------------	-------------------------------	------	--------------	---	------------------------	------

Mapa de distribución de vuelos



Notas o descripción	
---------------------	--

Figura 115: Hoja de cálculo para estimar altura de vuelo

Plan de vuelo		
Drone		
Marca	DJI	
Tipo	4 rotores	
Modelo	Phantom 4 PRO	
Características cámara		
Ancho	5472	píxel
Alto	3648	píxel
Resolución	20	MP
Tipo Sensor	CMOS	
Tamaño sensor	1	in
Ancho sensor	13.20	mm
Alto sensor	8.80	mm
Distancia focal real	8.8	mm
GSD deseado	2.5	cm/píxel
Altura de vuelo	91	m
Huella imagen (Ancho)	136.8	m
Huella imagen (Alto)	91	m
Área de imagen	12476	m ²
	Sidelap	Frontlap
Traslapes	75%	75%
Longitud eje pasadas	454	m
Distancia entre pasadas	34.2	m
No. Pasadas	13	

Bloque fotogramétrico: Pasada o conjunto de pasadas que realiza un dron para obtener todas las fotografías de una zona de interés. También se refiere al conjunto de fotografías que se obtuvieron de un vuelo específico. 34

CCD: Charge-Coupled Device. 9

CMOS: Complementary metal-oxide-semiconductor. 41

CORS: Continuously Operating Reference Station. 36

Datum: cualquier cantidad numérica o geométrica que sirve como referencia o base para todos los datos. En geodesia, un datum tiene asociado un elipsoide, el cual sirve de referencia para calcular las coordenadas de los puntos de la tierra. 7

Drone: Término en inglés que se utiliza para referirse a vehículo aéreos no tripulados . 14

Georreferenciación: Proceso por el cual se le asignan coordenadas en un determinado sistema de referencia, a los puntos que conforman un elemento. 34

GNSS: Global Navigation Satellite System. 28

GPS: Global Positioning System. 10

GSD: Ground Sampling Distance. 23

IGN: Instituto Geográfico Nacional. 47

MDE: Modelo digital de elevación. 11

MDS: Modelo digital de superficie. 8

MDT: Modelo digital de terreno. 8

- Ortofoto:** Imagen que representa un terreno u objeto en proyección ortogonal. 11
- Pancromáticas:** Término que hace referencia a que los sensores tienen aproximadamente la misma sensibilidad para todos los colores. 9
- Planimetría:** Parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de todos los detalles del terreno sobre una superficie plana. 11
- Píxel:** (Del inglés picture element) es la unidad más pequeña en que se descompone una imagen digital. 23
- Rectificación:** Proceso fotogramétrico en el cual se cambia la proyección cónica de una fotografía a una proyección ortogonal. 11
- RIC:** Registro de Información Catastral. 47
- Rover:** Término que se refiere al dispositivo GPS, vinculado a una base, con el cual se miden los puntos en campo. 33
- RTK:** Real Time Kinematics. 32
- Ráster:** Formato de datos que se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdas pequeñas. 9