ANÁLISIS DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS GENERADOS CON IMÁGENES ADQUIRIDAS POR MEDIO DE PLATAFORMAS AEREAS NO TRIPULADAS

JOSÉ TARICICIO QUIROGA VELÁSQUEZ &
EDERSON MACANA TUTA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MANIZALES/CALDAS
2019

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS GENERADOS CON IMÁGENES ADQUIRIDAS POR MEDIO DE PLATAFORMAS AÉREAS NO TRIPULADAS

JOSÉ TARCICIO QUIROGA VELÁSQUEZ &
EDERSON MACANA TUTA

Orientador: Dr. JESÚS EMILIO PINTO LOPERA
Coorientador: MSc. JOSÉ VÉLEZ HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de
MAGISTER EN TELEDETECCIÓN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MANIZALES/CALDAS
2019

Dedico este trabajo a Dios, que es nuestro guía y fortaleza en los momentos más difíciles, a mis padres por su gran ejemplo de vida que siempre he intentado practicarlo de la mejor manera, a mi esposa compañera de vida y mi hijo que es el motor de mi vida.

AGREDECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Manizales por brindarnos la oportunidad de estudiar la primera maestría en teledetección del país.

Al Dr Jesús Emilio Pinto y a MSc José Vélez Hernández por el acompañamiento en el desarrollo del proyecto, a sus comentarios y observaciones que fueron muy importantes para direccionar correctamente el presente trabajo.

A nuestras familias por estar siempre a nuestro lado, incentivándonos y apoyándonos incondicionalmente para poder culminar esta meta.

A Martha Páez, por permitirnos el uso del espacio para la realización de las prácticas para obtener los datos necesarios en el desarrollo del presente trabajo.

A nuestros profesores y compañeros de estudio, de los cuales aprendimos y compartimos grandes momentos.

RESUMEN

En los últimos años se ha producido una revolución en el modo de producir cartografía, gracias a la aparición de las aeronaves remotamente tripuladas las cuales permiten acceder a terrenos difíciles a muy bajo costo y en tiempos cortos. ¿Pero cuál es la exactitud posicional horizontal y vertical alcanzada por estos sensores a bordo de estas plataformas? Para responder esta pregunta se abordó una metodología en la cual, por medio de procedimientos fotogramétricos convencionales, se consigue un modelo estéreo, con cuatro escenarios diferentes de control terrestre y recubrimiento longitudinal, el cual se compara con información de mayor precisión levantada por métodos topográficos. La prueba mostró variaciones en el orden de las decenas de milímetros en cada escenario, pero mantuvo la exactitud posicional para satisfacer especificaciones para cartografía 1:500. Para la generación automática de nube de puntos los resultados mostraron sensibilidad a los escenarios planteados. Estos resultados mostraron que los drones prometen ser una alternativa real para producir cartografía, no obstante, el test realizado fue para un dron especifico y un terreno pequeño, por lo que no se pueden tomar estos resultados como concluyentes y si como una primera etapa de investigación.

ABSTRACT

In recent years there has been a revolution in the way of producing cartography, thanks to the appearance of remotely manned aircraft which allow access to difficult terrain at very low cost and in a short period of time. But what is the horizontal and vertical positional accuracy achieved by the sensors on board these devices? To answer this question a methodology was developed in which, by means of conventional photogrammetric procedures, a stereo model is achieved, with four different scenarios of terrestrial control and longitudinal overlap, which is compared with more accurate information acquired by topographic methods. The test showed variations in the order of tens of millimeters in each scenario, but maintained the positional accuracy to satisfy specifications for 1: 500 cartography. For the automatic generation of a point cloud the results showed sensitivity to the proposed scenarios. These results showed that the drones promise to be a real alternative to producing cartography, however, the test performed was for a specific drone and a small terrain, so these results can not be taken as conclusive and rather, as a first stage of research.

CONTENIDO

RESUMEN V

ABSTRACT VI

LISTA DE TABLAS XII

LISTA DE FIGURAS XIV

LISTA DE ABREVIATURAS XVIII

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. JUSTIFICACIÓN 4

1.2. OBJETIVOS 5

1.2.1. Objetivo General *5*

1.2.2. Objetivos Específicos *6*

2. ANTECEDENTES 7

3. MARCO TEORICO 11

3.1. TELEDETECCIÓN 11

3.1.1. Radiación electromagnética *12*

3.1.2. Sistema sensor *14*

3.1.3. Tipos de cámaras *15*

3.2. VEHICULOS ÁEREOS NO TRIPULADOS 17

3.2.1. Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados *18*

3.3. FOTOGRAMETRIA 23

3.3.1. Método fotogramétrico *24*

3.4. DISEÑO DE FOTOCONTROL 31

3.4.1. Cantidad de puntos de control *31*

3.4.2. Señalización de los puntos de control *34*

3.4.3. Determinación de las coordenadas de los puntos de control terrestre *35*

3.5. TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL 35

3.5.1. Levantamientos topográficos 35
3.5.2. Levantamientos GNSS 37
3.6. AEROTRIANGULACION 38
3.6.1. Orientaciones 41
3.7. CORRESPONDENCIA DE IMAGEN 45
3.8. FOTOGRAMETRIA UAV 48
3.8.1. Structure from Motion (SfM) 49
3.8.2. Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) 50
4. METODOLOGIA 57
4.1. DISEÑO DE FOTONTROL 57
4.1.1. Preseñalización 59
4.1.2. Determinación de las coordenadas de los puntos de control 60
4.1.2.1.GNSS 60
4.1.2.2. TOPOGRAFIA 60
4.1.3. Determinación de la elevación de los preseñalizados 61
4.2. ESQUEMA DE MODELO FOTOGRAMETRICO 63
4.2.1. Área de trabajo 64
4.2.2. Equipo RPA Phantom 4 pro Obsidian 67
4.2.3. Captura y procesamiento de las imágenes aéreas 69
4.3. VALIDACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL. 81
4.3.1. Verificación de la exactitud posicional de la aerotriangulación 81
4.3.2. Verificación de la exactitud posicional absoluta. 81
4.3.3. Estadígrafo utilizado 82
4.4. METODOLOGÍA EXPERMENTAL 85
4.4.1. ***Verificación de la exactitud posicional de la aerotriangulación*** 88
4.4.2. Verificación de la exactitud posicional absoluta 90
4.4.3. Verificación de la exactitud posicional absoluta 91
5. RESULTADOS 94

5.1. GENERACIÓN DE BLOQUES DE TRIANGULACIÓN 94
5.2. REVISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS 94
5.3. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN 95
5.3.1. Variación de la exactitud posicional de la aerotriangulación en (x, y) *95*
5.3.2. Variación de la exactitud posicional de la aerotriangulación en (z) *95*
5.3.3. Exactitud posicional de la aerotriangulación para el escenario 4 ..... *96*
5.4. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN 97
5.4.1. Variación de la exactitud posicional absoluta en (x, y) *97*
5.4.2. Variación de la exactitud posicional absoluta en (z) *98*
5.1.1. Exactitud posicional absoluta para el escenario 4 ..... *99*
6. ANALISIS DE RESULTADOS. 100
6.1. GENERACION DE BLOQUES DE AEROTRIANGUALCION 100
6.2. REVISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE LOS BLOQUES 100
6.3. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN 101
6.4. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN EN EL ESCENARIO CON CINCO GCP Y 60% DE RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL 102
6.5. HALLAR LA VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS USANDO 25 PUNTOS DE CHEQUEO 104
6.6. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA CON EL ESCENARIO DE CINCO (5) GPC Y 60% DE RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL 106
6.7. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA DEL DSM 107
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 111
BIBLIOGRAFÍA 114

ANEXOS **117**
ANEXO A. RESUMEN DE COORDENADAS DE LOS PUNTOS PRESEÑALIZADOS **117**
ANEXO B. RESUMEN DE COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CHUEQUEO **118**
ANEXO C. BITÁCORA DE VUELO. **120**
ANEXO D. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 1. ..... **121**
ANEXO E. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 2. ..... **122**
ANEXO F. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 3. ..... **123**
ANEXO G. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 4. ..... **124**
ANEXO H. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 1. ..... **125**
ANEXO I. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 2. ..... **126**
ANEXO J. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 3. ..... **127**
ANEXO K. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (X, Y, Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 4. ..... **128**
ANEXO L. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 1 CON DSM. **129**
ANEXO M. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 2 CON DSM. **130**
ANEXO N. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 3 CON DSM. **131**
ANEXO O. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 4 CON DSM. **132**
ANEXO P. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 1 CON DSM (FILTRO) **133**

ANEXO Q. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 2 CON DSM (FILTRO) 134
ANEXO R. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 3 CON DSM (FILTRO) 135
ANEXO S. VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD ABSOLUTA (Z) DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO 4 CON DSM (FILTRO). 136

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Información de la cámara CMOS 1”, de 20 Megapíxeles ubicada en el dron Phantom 4 Pro 17
Tabla 3.2. Clasificación completa de sistemas existentes de UAV (Van Blyenburgh, 2006) 18
Tabla 3.3. Clasificación de UAV, de acuerdo con las clases con o sin motor, así como las más o menos ligeras que el aire (Eisenbeiss, 2009) 19
Tabla 3.4. Parámetros de diseño del vuelo. Del software UGSC para dji 27
Tabla 3.5. Relación escala-tamaño de pixel (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016) 32
Tabla 3.6. Nivel de tolerancia por resolución 33
Tabla 3.7. Rangos de precisión según el tipo de trabajo para cota geométrica (Torres & Villate, 1983) 36
Tabla 3.8. Exactitud horizontal para puntos de control 37
Tabla 3.9. Exactitud vertical para puntos de control 37
Tabla 4.1. Parámetros de diseño del vuelo. Del software UgSC 57
Tabla 4.2. Resumen de coordenadas puntos de apoyo 60
Tabla 4.3. Precisión del levantamiento 61
Tabla 4.4. Medición de la discrepancia entre el método trigonométrico y geométrico 62
Tabla 4.5. Características RPA Phantom 4 pro 69
Tabla 4.6. Coordenadas del área de interés 72
Tabla 4.7. Resumen del diseño de vuelo 74
Tabla 4.8. Exactitud posicional de aerotriangulación por escalas 81
Tabla 4.9. Exactitud posicional absoluta por escalas 82
Tabla 4.10. estadígrafo para medir los RMS de las discrepancias 83
Tabla 4.11. Resumen de escenarios planteados 85
Tabla 4.12. Relación de lectura de los puntos de chequeo por escenario 89
Tabla 4.13. Relación de lectura de los puntos de chequeo por escenario 90
Tabla 5.1. Características generales de los bloques aerotriangulados 94

Tabla 6.1. Puntos de chequeo validados 109

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Componentes de un sistema de teledetección 12

Figura 3.2. Onda electromagnética. 13

Figura 3.3. Espectro electromagnético 13

Figura 3.4. Cámara CMOS 1", de 20 Megapíxeles. Tomado de sitio web DJI https://www.dji.com/phantom-4-pro consultado el 15 de diciembre de 2018. 16

Figura 3.5. Modelo de UAV de ala fija eBee X de senseFly. Tomado de sitio web senseFy https://www.sensefly.com/drone/ebee-x/ consultado el 15 de diciembre de 2018..... 20

Figura 3.6. UAV de ala rotatoria con único rotor. Tomado de sitio web dronespain https://dronespain.pro/tipos-de-drones-aereos/ consultado el 15 de diciembre de 2018..... 21

Figura 3.7. UAV de ala rotatoria con único rotor md4-1000. Tomado de sitio web Microdrones https://www.microdrones.com/en/drones/md4-1000/ consultado el 15 de diciembre de 2018..... 21

Figura 3.8. Rotación de los rotores. Tomado de sitio web: https://www.ingenieriaparatodos.com/2017/07/diseno-y-construccion-de-drone.html / consultado el 15 de diciembre de 2018..... 22

Figura 3.9. Ángulos de orientación del UAV de cuatro rotores (Kumar et al., 2015) . 23

Figura 3.10. Recubrimiento longitudinal (u) 26

Figura 3.11. Recubrimiento lateral (v) 26

Figura 3.12. Ejemplo de diseño de vuelo con tipo de altitud AMSL altura constante y su perfil topográfico. Fuente: elaboración propia sobre software UgCS..... 28

Figura 3.13. Ejemplo del diseño de vuelo con tipo de altitud AGL altura variable. ... 29

Figura 3.14. Ejemplo del diseño de vuelo con tipo de altitud AGL altura variable. ... 31

Figura 3.15. Control directo. Cada modelo está controlado por control terrestre..... 32

Figura 3.16. Movimientos del avion en el aire 33

Figura 3.17. Marca para preseñalizado. Fuente: elaboración propia. 35

Figura 3.18. Distribución de control y marcación de puntos de paso y de enlace entre fajas 39
Figura 3.19. Elementos de la orientación interna. Fuente: tomado de (Schenk, 2002) 41
Figura 3.20. Parámetros de la orientación exterior. Fuente: tomado de (Orellana, 2006) 42
Figura 3.21. Condición de coplanareidad y orientación relativa. Fuente: tomado de (Schenk, 2002)..... 44
Figura 3.22. Parámetros de la orientación exterior. Fuente: tomado de (Lerma, 2002) 45
Figura 3.23. Correspondencia por áreas. Fuente: tomado de (Schenk, 2002)..... 46
Figura 3.24. Ejemplo del equipo phantom usado para fotogrametria. Tomado de sitio web: https://civilaxia.blogspot.com/2017/10/fotogrametria.html#.XBU6Robia71 consultado el 15 de diciembre de 2018. 48
Figura 3.25. Esquema del principio de funcionamiento del Structure from Motion (SfM). Tomado del sitio web: http://www.theia-sfm.org/sfm.html consultado el 15 de diciembre de 2018. 50
Figura 3.26. Proceso de identificación de valores extremos. Fuente: tomado de (Lowe, 2004) 53
Figura 3.27. Proceso de comparación de valores extremos. Fuente: tomado de (Lowe, 2004) 54
Figura 3.28. Descriptor de puntos clave. Fuente: tomado de (Lowe, 2004) 56
Figura 4.1. Área huella y área efectiva 58
Figura 4.2. Esquema de fotografías y control 58
Figura 4.3. Distribución de punto de control (Control directo) 59
Figura 4.4. Señal de preseñalizado. Fuente: Elaboración propia..... 59
Figura 4.5. Poligonal topográfica 61
Figura 4.6. Esquema de modelo fotogramétrico. Fuente: Elaboración propia. 63
Figura 4.7. Localización del Municipio de Sopó. Fuente: Elaboración propia. 64
Figura 4.8. Localización área de interés en la Hacienda Buenavista, Municipio de Sopó 65

Figura 4.9. Vista panorámica del área de interés del predio Hacienda La María, Municipio de Sopó. Fuente: Elaboración propia. 66
Figura 4.10. Mapa de pendientes. Fuente: Elaboración propia. 67
Figura 4.11. Equipo Phantom 4 pro Obsidian y radio control. Tomado de sitio web DJI https://www.dji.com/phantom-4-pro consultado el 15 de diciembre de 2018. 68
Figura 4.12. Área de interés Sopó. Fuente: Elaboración propia. 71
Figura 4.13. Área para el diseño de vuelo Sopó. Fuente: Elaboración propia. 71
Figura 4.14. Diseño de vuelo fotogramétrico constante. Fuente: Elaboración propia. 73
Figura 4.15. Diseño de ruta fotogramétrica, Hacienda Buenavista. 74
Figura 4.16. Perfil de la ruta fotogramétrica, Hacienda Buenavista..... 75
Figura 4.17. Distribución de control terrestre. Fuente: Elaboración propia. 76
Figura 4.18. Cargue y alineación de las imágenes. Fuente: Elaboración propia. 77
Figura 4.19. Cargue y medición del control terrestre. Fuente: Elaboración propia. .. 78
Figura 4.20. Optimización del ajuste. Fuente: Elaboración propia. 79
Figura 4.21. Generación del archivo blk, para ERDAS IMAGINE (versión 2014). ... 80
Figura 4.22. Bloque con 25 puntos de control. Fuente: Elaboración propia. 86
Figura 4.23. Bloque con 17 puntos de control. Fuente: Elaboración propia. 87
Figura 4.24. Bloque con cinco puntos de control. Fuente: Elaboración propia. 88
Figura 4.25. Distribución de los puntos de chequeo. Fuente: Elaboración propia. 91
Figura 4.26. Parámetros para la elaboración de MDS. Fuente: tomado de Agisoft. ... 92
Figura 4.27. Modelos digitales de superficie 93
Figura 5.1. Variación EMC (x, y) de la aerotringulación. 95
Figura 5.2. Variación EMC en (z) de la aerotringulación..... 96
Figura 5.3. variación EMC en (x, y) y (z) de la aerotringulación del bloque 4..... 97
Figura 5.4. Variación EMC en (x, y) de posición absoluta..... 98
Figura 5.5. Variación EMC en (z) de posición absoluta 98
Figura 5.6.Comparación de la variación EMC en (z) de posición absoluta para todos los escenarios. 99
Figura 6.1. Comparación del EMCr con el EMC permitido 101

Figura 6.2 Comparación del EMCz con el EMC permitido 102
Figura 6.3. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3 y4 103
Figura 6.4. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y4 104
Figura 6.5. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3..... 105
Figura 6.6. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3..... 105
Figura 6.7. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3 y 4 106
Figura 6.8. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4 107
Figura 6.9. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4 con respecto al EMC permitido 108
Figura 6.10. Ejemplos de puntos de chequeo.. 109
Figura 6.11. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4 con respecto al EMC permitido 110

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
4k	Mejora en la resolución (1096 x 2160) píxeles
AGL	Above ground level
AMSL	Above Mean Sea Level
ASLSM	Accuracy Standards for Large-Scale Maps
asmn	Altura sobre el nivel medio del mar
cm	Centímetros
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DATUM Geodésico	Orientación y ubicación del elipsoide asociado a un sistema coordenado ortogonal (X, Y, Z).
DATUM Vertical	Datum que describe la relación de las alturas o profundidades relacionadas con la gravedad de la Tierra.
DEM	Digital Elevation Model
DJI	Empresa de tecnología china (www.dji.com)
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EMAS	Enineering Map Accuracy Standard
EMCr	Error Medio Cuadrático de la componente (x, y)
EMCz	Error Medio Cuadrático de la componente (z)
ERDAS	Software de sensores remotos.
GDOP	Disposición geométrica de los satélites
GLONASS	Sistema global de navegación por satélite
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPC	Ground control point
GPS	Sistema de posicionamiento global
GSD	Ground Sample Distance, tamaño del pixel proyectado sobre el terreno

ha	Hectáreas
IACO	International Civil Aviation Organization
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IMU	Unidad de medición inercial
ISPRS	International society photogrammetry and remote sensing
Kg	Kilogramos
Km	Kilómetros
LIDAR	Light Detection and Ranging
m	Metros
mm	Milímetros
msnm	metros sobre el nivel del mar
NMAS	National Mediator Accreditation Standards
NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy
px	Pixeles
RADAR	Radio Detection and Ranging
RMSE	Root-Mean-Square Error
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
STANAG	North Atlantic Treatment Organization (NATO) developed Standardization Agreement
UAV	Unmanned aerial vehicle
UgSC	Universal Ground Station Software
VANT	Vehículo aéreo no tripulado

1. INTRODUCCIÓN

Este documento expone una metodología para establecer y cuantificar los alcances de los productos cartográficos obtenidos a partir de fotografías adquiridas por medio de plataformas aéreas no tripuladas. Específicamente se trabajó con el sensor 1" CMOS de 20 megapíxeles a bordo del dron *Phantom* 4 Pro. Este sensor es una cámara no métrica y por tanto se necesita establecer sus alcances en cuanto a exactitud posicional, con el objetivo de satisfacer las especificaciones de los productos cartográficos. Hasta la fecha las cámaras usadas para la generación de datos geoespaciales que cumplan especificaciones son cámaras métricas, en las cuales los parámetros internos se conocen con certeza.

El desarrollo en el campo de los UAVs (*unmanned aerial vehicles*) o vehículos aéreos no tripulados, en términos de tamaño de la plataforma, autonomía de vuelo, capacidad de carga entre otras variables, junto al desarrollo de sensores montados en estas plataformas aéreas, han llevado la fotogrametría a otro nivel, permitiendo el levantamiento de información geoespacial a un costo bajo en comparación con técnicas de captura de información geográfica, como es la fotogrametría aerotransportada con cámaras métricas, y tecnología LIDAR (*light detection and ranging*).

Por otro lado, la adopción de técnicas de procesamiento de imágenes digitales y visión computacional disponibles en los softwares, libres o comerciales, han permitido automatizar procesos fotogramétricos que se realizaban manualmente. La calibración de las cámaras, las orientaciones de las mismas y el ajuste de los bloques fotogramétricos se puede resolver ahora de manera automática. Esto es posible gracias a técnicas como SfM (*Structure from Motion)*, que permiten reconstruir escenarios 3D a partir de imágenes 2D, sin importar las características sensibles en la fotogrametría tradicional como son las posiciones de las cámaras, la escala de las imágenes, la distorsión del lente, entre otras.

No obstante, debido a las condiciones propias de los UAVs, como la limitada autonomía de vuelo, las restricciones reglamentarias impuestas por la Aeronáutica Civil a la altura de vuelo, la demanda de hardware de alta capacidad para el almacenamiento y el

procesamiento de la información, hacen que su uso se enfoque por ahora al levantamiento de áreas pequeñas. Por otro lado, cada día los fabricantes de UAVs y de tecnologías asociadas a ellos proponen innovaciones y mejoras para buscando salvar las restricciones, lo que puede generar también una oferta especulativa en cuanto a precisión, que amenaza la credibilidad de los productos ofrecidos sino se tienen en cuenta todas las especificaciones. Por tanto, la exactitud posicional de los productos cartográficos obtenidos con estos sistemas requiere ser testeada para obtener cartografía de precisión.

En particular, esta investigación cumple con el principio de oportunidad, pues el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) está abordando la obligación de avalar proyectos ejecutados con esta tecnología, y a su vez, las empresas consultoras se están enfrentando a un escenario incierto, pues no hay metodología establecida desde el ente rector, el mismo IGAC. En esta investigación, la realización del test que permite medir la exactitud posicional, vertical y horizontal para el sensor a bordo del dron *Phantom* 4 Pro, requiere cumplir con una serie de etapas propias del proceso de producción cartográfica. Cada etapa del proceso debe cumplir con unas especificaciones definidas por el IGAC y su cumplimiento es obligatorio para el aseguramiento de la calidad final del producto.

De esta forma, se seleccionó un terreno de aproximadamente tres ha de extensión con dos tipos de pendiente predominante, una porción plana y otra con pendiente promedio del 35%. El terreno está ubicado en el municipio de Sopo Cundinamarca. Sobre imágenes disponibles en internet se realizó el plan de vuelo, atendiendo criterios de recubrimiento longitudinal y lateral, así como altura de vuelo y GSD (*Ground sample distance*). También se tuvo en cuenta la autonomía de vuelo del dron y una inspección preliminar de las condiciones climáticas, como régimen de viento y lluvia, para la fecha de ejecución de la misión de vuelo.

Para el diseño de fotocontrol se optó por el método de control directo, el cual exige cuatro puntos de control terrestre por modelo y su materialización se realizó con puntos preseñalizados. El levantamiento de los puntos de control, para realizar la aerotringulación y de los puntos de chequeo para realizar la comparación, se realizó mediante el método

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para la georreferenciación y el método de poligonal con estación total para determinar las coordenadas de los puntos de control preseñalizados.

La toma de fotografía aérea se realizó siguiendo el plan de vuelo y su ejecución se llevó a cabo sin mayores contratiempos, hacia las horas de medio día, con buenas condiciones climáticas. Una vez obtenidas las imágenes se continuó con el proceso de aerotringulación, utilizando para ello el software Agisoft el cual presenta como elemento innovador la aplicación de los algoritmos SfM y SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*). Aquí se plantearon cuatro escenarios de aerotringulación, variando las condiciones de control terrestre y de recubrimiento longitudinal, y se generaron cuatro bloques aerotriangulados, los cuales son utilizados para compararlos con el set de puntos de chequeo y establecer las diferencias de exactitud posicional, en cada escenario.

La medición de la exactitud posicional y sus variaciones en los cuatro escenarios propuestos se realizó montando los bloques aerotriangulados en la estación fotogramétrica utilizando el software ERDAS con la *suite Photogrammetry* de la casa Leica y los datos fueron procesados con las fórmulas estadísticas utilizadas por el IGAC. La medición la llevo a cabo un operador con suficiente experiencia en captura tridimensional. Una de las dificultades para realizar las mediciones se presentó en algunos puntos preseñalizados en los cuales la visión estereoscópica no se formó entre modelos consecutivos, sino entre modelos de diferente faja.

Las coordenadas extraídas de las lecturas de los puntos de control y de chequeo fueron almacenadas y organizadas en un archivo Excel programado con las fórmulas estadísticas que el IGAC usa para la verificación de exactitud posicional. Los resultados fueron graficados para una mejor visualización, la cual permite realizar un análisis del comportamiento de los diferentes bloques para poder concluir cuales escalas cartográficas cumplen la exactitud posicional encontrada.

Finalmente se hizo una retroalimentación, confirmando que los objetivos propuestos fueran llevados a buen término y se consignaron las recomendaciones para la realización de futuras investigaciones. Este trabajo permite tener un punto de partida para aumentar variables como terrenos de alta y baja pendiente, áreas de mayor extensión, cubiertas vegetales que limiten la óptima correlación, calibración de cámaras, cantidad y distribución de puntos de control. Futuros trabajos deberán incluir comparaciones entre diferentes programas que ofrezcan soluciones en fotogrametría para drones, y vincular el amplio mercado de los mismos, permitiendo generar cada día más y mejores resultados, y orientar de una mejor forma a los usuarios, tanto clientes como consultores.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La resolución 1364 del 11 de noviembre de 2016 plantea que para áreas menores que 500 hectáreas su cartografía se puede obtener utilizando vuelos, control terrestre y aerotringulación con variaciones respecto de las especificaciones establecidas en esta fuente, siempre y cuando demuestre que cumple con la exactitud posicional. En este sentido, se entiende que abre la posibilidad de que incursionen los UAV como alternativas para generar productos cartográficos. Sin embargo, cuando no se cuenta con un procedimiento técnico para realizar un producto, de alguna manera permite cierto grado de improvisación o de prueba y error que podría impactar la calidad final del producto. El aseguramiento de la calidad de un producto consiste en controlar la calidad de cada proceso y no se continúa con el siguiente si el anterior no cumple. En este sentido un procedimiento técnico a la vez que da orden en el proceso permite crear un cronograma de trabajo y establecer una ruta crítica; si el producto final no es aceptado por qué no cumple la norma, es el procedimiento técnico el que se debe revisar en cada una de sus fases para determinar donde estuvo el error, a que área dentro el organigrama corresponde y por su puesto el responsable. Desde el punto de vista económico se pueden correr riesgos pues el presupuesto de los costos implica el conocimiento minucioso de cada etapa del proceso para asignar los recursos técnicos y humanos. Un procediendo técnico se constituye en norma y guía para el ejecutor pues es la carta de navegación. De otra parte, al no existir un procedimiento técnico oficial que dicte el ente contratante, podrían generar vacíos

conceptuales al tratar de interactuar con el interventor del proyecto dando espacio a las subjetividades.

Se torna difícil crear normas o procedimientos cuando no existe una estandarización en los equipos con los cuales se realizará el trabajo. Existen varios fabricantes de drones y muchas versiones, pero hasta la fecha las lentes de las cámaras no vienen con una ficha técnica que las describa en cuanto a su distorsión y distancia focal, los cuales son dos de los elementos diferenciadores entre las cámaras métricas y no métricas. Sin embargo, la comunidad universitaria y los entes rectores de la cartografía en Colombia se deben pronunciar en cuanto a la posibilidad real de obtener productos cartográficos desde drones, empezando por testear los resultados obtenidos con cada dron que se ofrece en el mercado de tal manera que los usuarios puedan conocer la exactitud posicional lograda. En este escenario habría una ganancia para todas las partes involucradas, de un lado los usuarios, contratistas y contratantes tendrían claridad sobre la pertinencia de usar uno dron determinado y de otra parte se demandaría de los fabricantes un mayor esfuerzo en estandarizar más que sus drones, sus sensores.

Es evidente la pertinencia de estudios serios en buscar métodos que agilicen y bajen los costos de los procesos de producción cartográfica, por cuanto se constituye en insumo de primera necesidad para planear un mejor país, y dar solución a problemas como la consecución y consolidación de la paz (Bases del plan Nacional de Desarrollo 2014-2018), desde la perspectiva de un país con políticas más vinculantes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Establecer mediante test comparativo la exactitud posicional de los productos cartográficos obtenidos a partir de imágenes del sensor 1" CMOS de 20 megapíxeles a bordo del dron Phantom 4 Pro, utilizando la metodología convencional para procesos fotogramétricos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Generar los bloques de aerotriangulación con diferente escenario, referente a la cantidad de puntos de control (GCP), a partir de imágenes provenientes del sensor 1" CMOS de 20 megapíxeles a bordo del dron Phantom 4 con traslape de imágenes del 80% longitudinal y 70% lateral.
- Determinar la variación del paralaje y saltos verticales de los bloques aerotriangulados.
- Hallar la variación posicional de la aerotringulación de los diferentes escenarios.
- Hallar la variación de la exactitud posicional de la aerotringulación con el escenario de cinco GPC y 60% de recubrimiento longitudinal.
- Hallar la variación posicional absoluta de los diferentes escenarios usando 25 puntos de chequeo.
- Hallar la variación posicional absoluta con el escenario de cinco GPC y 60% de recubrimiento longitudinal.

2. ANTECEDENTES

El área de la fotogrametría sobre plataformas UAV ha tenido numerosos estudios en donde se evalúa la precisión de los productos cartográficos obtenidos, como son los modelos digitales de terreno, las nubes de puntos generados con imágenes de sensores no métricos en software basados en algoritmos SfM y las ortofotos, comparándolos frente a diferentes técnicas de captura de información espacial como son topografía convencional, técnicas LIDAR y fotogrametría con cámara métrica entre otras.

Finalizando la década del 2010, Eisenbeiss (2009) propone un flujo de trabajo para la automatización de procesos con la integración de la planificación de vuelo, demostrando que los UAV controlados manualmente no son tan estables como el controlado. Adicional comprobó las precisiones suministrados por los fabricantes en una zona de prueba aplicando un método automático de seguimiento de la trayectoria 3D de los UAV. Una ventaja descubierta frente al LIDAR es una reducción en la oclusión de zonas, en los modelos de elevación generados. Unos años más adelante, se realizaron test comparativos entre software fotogramétricos especializado y softwares emergentes.

Gini et al. (2013) comparan las precisiones obtenidas de un bloque aerotriangulado, realizando mediciones en software LPS y mediciones automáticas con el software Agisoft. Los resultados en software fotogramétrico requieren más tiempo y la intervención de operadores en algunas fases como son la validación de la orientación exterior, así como en la selección de puntos en áreas críticas, haciéndolo en comparación con el software Agisoft más cotoso. Las mediciones en puntos de control en términos de RMSE (*root-mean-square error*), son mejores en los softwares fotogramétricos ya que restringen los parámetros de la orientación exterior. Sin embargo, esta realidad fue cambiando, en la medida en que se fueron desarrollando algoritmos que flexibilizaron la rigidez de los movimientos kappa, phi y omega. La utilización de técnicas de visión por computador y (Castillo Carrión, 2014) fotogramétricas para imágenes obtenidas por sensores no métricos y el uso fundamental del algoritmo SIFT que permiten generar modelos en 3D. La optimización de los parámetros de SIFT les permitió obtener un modelo más estable y con mejor correlación.

Otros autores investigaron sobre la precisión de productos cartográficos, como el orto foto, obtenidos por RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), es así como (Mesas-Carrascosa, Rumbao, Barrera Berrocal, & Ferrer Porras, 2014) aplican diferentes pruebas (NMAS, EMAS, ASLSM, NSSDA, STANAG) para evaluar los productos obtenidos de un RPA multi rotor, en donde comparan coordenadas extraídas de la ortofoto generada con respecto a los puntos obtenidos con receptor GNSS. El producto generado como es la ortofoto con un GSD 0,05 m obtuvo resultados positivos en las pruebas NMAS con aplicabilidad desde escala 1:250 a 1:1000, demostrando que estos productos pueden ser utilizados como insumos para actualización de cartografía urbana.

La obtención de modelos topográficos mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas y combinadas con otros productos que sirven para la caracterización de superficies en procesos geomorfológicos es analizado por (Muñoz Narciso, Tena, Béjar Maceiras, & Vericat, 2014) permitiendo obtener resultados validos con errores aceptables para el estudio de cambios topográficos de un tramo fluvial.

La fotogrametría para proyectos lineales como corredores para el diseño de vías férreas y carreteras representa otro reto en la adquisición de imágenes desde un RPA. (Tournadre, Pierrot-Deseilligny, & Faure, 2015) presentan un proceso de calibración automática e inclusión de imágenes oblicuas lo cual ha permitido mejorar la precisión de las orientaciones, donde estas se ajustan con GCP's, indicando que se debe tener un GCP cada 100 metros lineales con el fin de obtener errores abajo del centímetro.

En cuanto al resultado obtenido en terrenos con fuerte inclinación, se realizaron estudios posteriores, como en (Martínez Carricondo, 2016) que presenta en su capítulo 1 una serie de parámetros que pueden influir en la caracterización topográfica con altos grados de inclinación. La toma de imágenes perpendiculares a la superficie del área de estudio y la ubicación idónea de los GCPs necesarios para obtener la georreferenciación del proyecto, permitieron obtener errores de 0,058 y 0,100 m en planimetría y altimetría respectivamente. Otras variables analizadas en el capítulo 2 como son la altura de vuelo, la morfología del

terreno y el número de GCPs en los resultados del DEMs y las ortoimagenes, indican que la primera variable no tiene influencia significativa en la precisión en (x,y) para el rango de alturas (50 – 120m). En el número de GCPs si presentó influencia significativa en la precisión (x,y) y para la precisión en (z), la morfología del terreno tiene influencia, para zonas planas se obtuvo mejores resultados.

Aplicando técnicas fotogramétricas desde un RPA Phantom 4 pro y con GCP para la caracterización geotécnica en zonas de pendiente (Tung, Kumar, & Mohamad Ismail, 2018) aplican un método que les permite obtener datos confiables y precisos aplicando SfM para generar la nube de puntos y el DSM, reduciendo costos aumentando la accesibilidad y bajando el riesgo. También se destaca en este estudio la importancia de incluir GPC para mejorar la precisión. Estudios más recientes han demostrado la efectividad de la aplicación del algoritmo SfM , en (Nyimbili, Demirel, Seker, & Erden, 2016) aplican el SfM como parte del flujo de trabajo, comparando los resultados obtenidos con otras tecnologías de mayor costo y requerimientos en equipos de procesamiento, demostraron la alta aplicabilidad del SfM en la fotogrametría con RPA para la obtención de nubes de puntos densas.

También se han realizado estudios tendientes a encontrar la cantidad óptima de GCP, sin embargo, no se especifica para que escala cartográfica, como en (Prajwal, Rishab, Vaibhav, & Karthik, 2016) que realizan un mapeo para corredores con la información de UAV y de puntos de control, donde evalúan el número óptimo de estos puntos para garantizar el grado de precisión de la información. Se concluye que la cantidad mínima de puntos de control para corregir las imágenes alienadas son tres, y el aumento de GCP’s no influye de manera significativa en términos de precisión.

Otros estudios rescatan otra aplicación importante del uso de RPA , como alternativa a los levantamientos topográficos, en (Soto Márquez, 2016) se muestra otro tipo de aplicación de los productos cartográficos obtenidos desde una plataforma RPA, gracias a las escalas grandes de estos productos (escala 1:1000 – 1:500) que permite estar en un campo de acción entre la fotogrametría y los levantamientos topográficos. La generación de

cartografía catastral a partir de la captura de información por medio de la restitución fotogramétrica de los productos obtenidos con drones. La alta resolución espacial de las imágenes permite tener un grado alto en la definición de los elementos y la aplicación de algoritmos orientados a la detección automática de coberturas vegetales contribuyó a reemplazar la captura manual de este nivel de información y realizando una edición anual permitiendo ahorrar tiempo.

Estudios más recientes muestran la combinación de la fotogrametría tradicional con técnicas modernas, como una contribución importante al desarrollo de la cartografía, en (Krzysztof & Andrzej, 2017) se puede observar una aplicación de los UAV's en técnicas fotogramétricas, donde obtienen las imágenes con un RPA multirotor de la serie Phantom 3. Los resultados presentados confirman las ventajas en tiempos y costos de esta tecnología, haciendo recomendaciones en las limitaciones climáticas, observaciones en el diseño del vuelo, donde recomiendan mantener el 80% de superposición de las imágenes con el fin que el procesamiento se realice una óptima vinculación de los datos.

3. MARCO TEORICO

3.1. TELEDETECCIÓN

La teledetección o percepción remota (*Remote sensing)* puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a través de análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Reddy, 2008). En el medio de ciencias de la tierra, esta definición se debe ampliar a técnicas de captura la información, tratamiento y análisis de estas.

Indicando la relación que existe entre la superficie terrestre y el sensor en términos de interacción energética que puede que sea energía artificial o natural, y que esta energía recibida por el sensor debe ser almacenada e interpretada, se puede indicar que la teledetección es un sistema y que puede definirse en seis (6) componentes (Chuvieco, 2010), definidos a continuación y representados en la Figura 3.1.

I. Fuente de energía, puede ser fuente natural (el sol), o emitidos por el propio sensor.
II. Superficie Terrestre, es la que contiene la información espacial, y recibe la energía emitida procedente de las fuentes naturales o artificiales, y reflejadas según la característica propia de cada elemento.
III. Sistema Sensor. Está compuesto por el sensor y la plataforma que lo transporta, es donde se recibe la energía emitida por la superficie y enviarlas al sistema de recepción.
IV. Sistema recepción – comercialización. Es donde se recibe la información captada por el sensor, grabada en el formato indicado para ser distribuido.
V. Interprete. Es el que interpreta y reproduce la información captada por el sensor en datos temáticos de interés.
VI. Usuario final. Es el consumidor final.

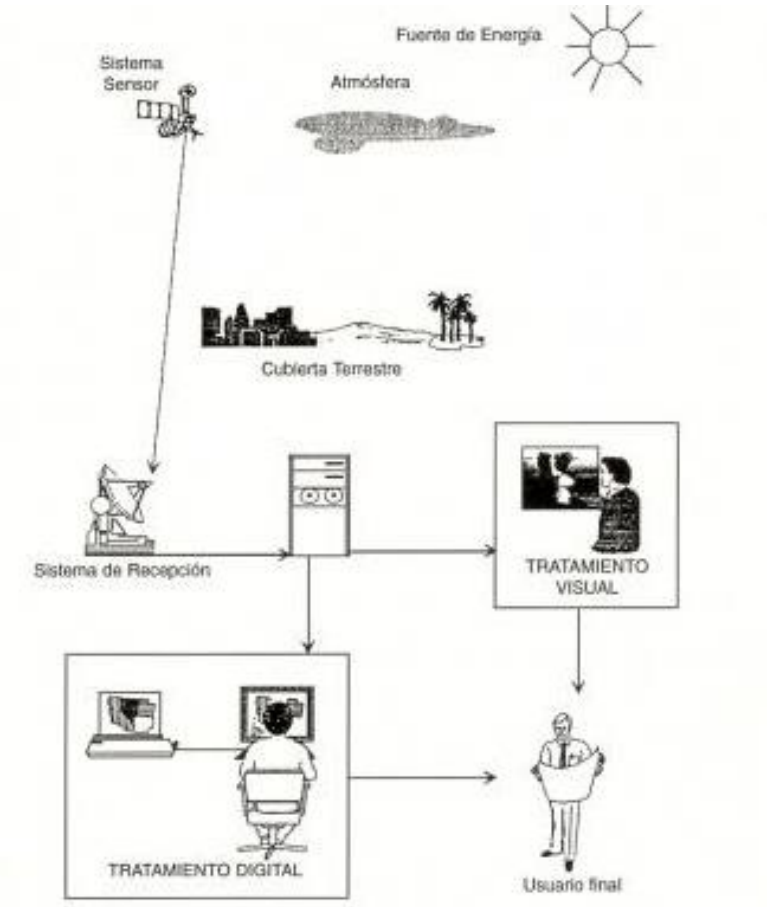


Figura 3.1. Componentes de un sistema de teledetección

Fuente: tomado de Chuvieco (2010)

3.1.1. Radiación electromagnética

En general, la energía electromagnética se trasmite de un lugar a otro a la velocidad de la luz, siguiendo un modelo continuo, conteniendo dos fuerzas de campo, el eléctrico y el magnético, como se ilustra en la Figura 3.2.

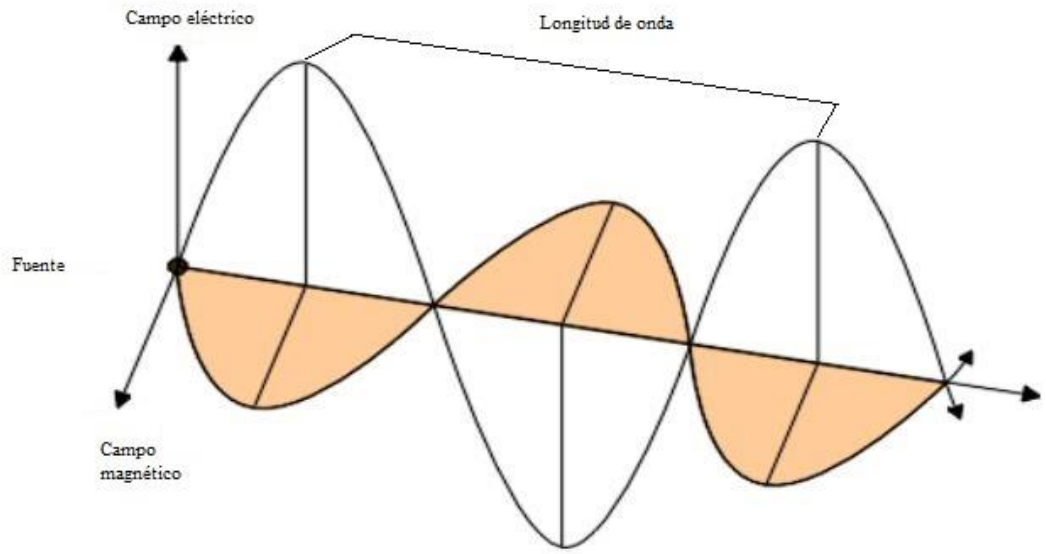


Figura 3.2. Onda electromagnética
Fuente: Adaptado de (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006)

Por otro lado, la energía se puede definir en función de su longitud de onda, en donde se pueden agrupar, desde las más cortas como los rayos gamma, hasta longitudes de onda largas, como las ondas de radio y televisión. A este espacio de agrupaciones, se le denomina el espectro electromagnético como se observa en la Figura 3.3.

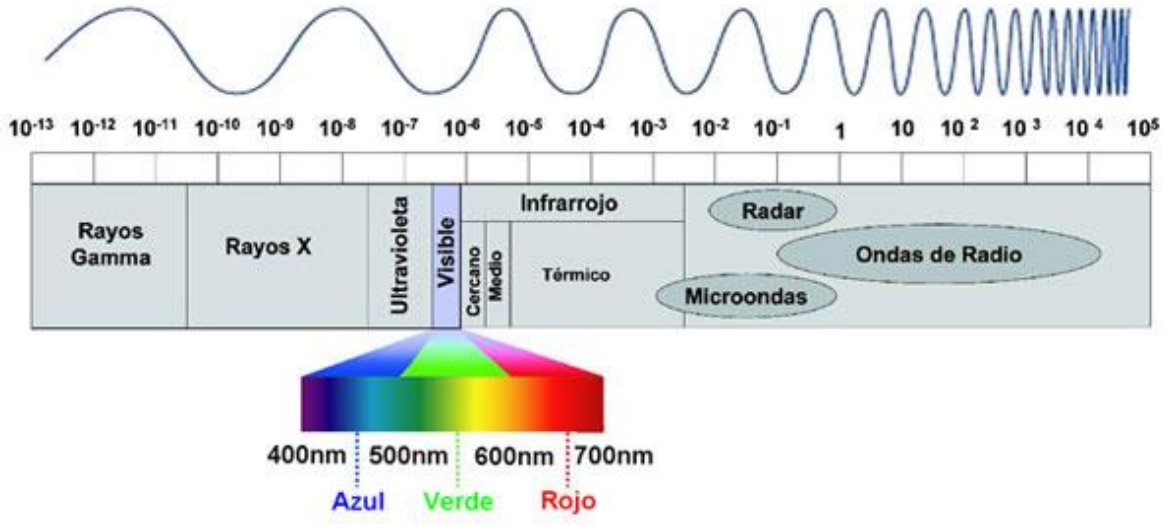


Figura 3.3. Espectro electromagnético
Fuente: tomado de (Acevedo, 2013)

Así mismo, se puede decir también que la radiación electromagnética es un fenómeno de transporte de energía que porta información del sistema que la genera o la reemite (Chavez, 2010). Así, la teledetección hace uso de esta propiedad, utilizando la interacción de la radiación con la superficie terrestre capturándolas en diferentes longitudes de onda y, de esta forma, extraer información que permita generar cartografía temática del medio ambiente. Por otro lado, se destaca que la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos es la que oscila entre longitudes de onda de 400nm hasta 700 nm, a este rango se le conoce como el espectro visible.

3.1.2. Sistema sensor

Dependiendo de la fuente de energía para transmitir la radiación los sensores remotos se clasifican como sigue.

3.1.2.1. Sensores Activos

Este tipo de sensores son aquellos que emiten su propia fuente de radiación para iluminar y para obtener información superficial. El más común es el sistema RADAR, por sus siglas en ingles *Radio Detection And Ranging*. Estos sensores trabajan en el rango de las microondas dentro del espectro electromagnético.

3.1.2.2. Sensores Pasivos

En este caso y en el contexto de la teledetección, este tipo de sensores requieren de la luz del sol para obtener información de los objetos en estudio. El rango de longitudes de onda en las que trabajan se encuentra dentro del espectro electromagnético visible e infrarrojo. En esta denominación entran las cámaras fotográficas llamadas también sensores ópticos. Por otro lado, es importante destacar que cuando se habla de un sistema sensor en realidad se está hablando de la combinación de dos elementos: uno es el sensor y el otro es la plataforma sobre la cual está montado el sensor y es transportado.

La variedad de plataformas en donde se puede transportar un sensor es muy amplia, desde las plataformas satelitales y las aeronaves tripuladas, hasta las plataformas de bajo costo como los UAV, también conocidos en español como VANT (vehículo aéreo no tripulado).

A partir de las imágenes obtenidas, tanto de los sensores remotos pasivos como activos, se produce cartografía a diferentes escalas y con diferentes propósitos, entre los cuales se encuentra la producción de cartografía social, general, temática y conceptual, entre otras. En Colombia la cartografía oficial, la cual es una cartografía básica general, se realiza a través del uso de sensores remotos pasivos denominados cámaras fotográficas y su gestión y producción está a cargo del IGAC, el cual produce escalas 1:25.000 a 1:1000 y para lo cual utiliza la a aplicación del método fotogramétrico.

3.1.3. Tipos de cámaras

Un hecho importante que ayudó al desarrollo de la producción cartográfica a partir de procesos fotogramétricos fue la aparición del hibrido, cámara análoga y el escáner, facilitando la obtención de imágenes digitales para ser tratadas a través del ordenador mediante software especializado. Es te hecho impulsa el desarrollo de las cámaras digitales haciendo migrar la tecnología análoga a una completamente digital.

3.1.3.1. Cámaras Métricas

Estas cámaras son clasificadas así por sus parámetros de precisión. Son cámaras muy estables y precisas construidas especialmente para producir mapas de precisión. Sus elementos tales como la distancia focal de la lente y marcas fiduciales están calibrados y se conoce la curva de distorsión de la lente; además sus parámetros de orientación interna perduran (i.e.) son constantes en el tiempo

3.1.3.2. Cámaras no Métricas

Estas cámaras son de geometría inestable y los parámetros de orientación interna se desconocen total o parcialmente. El diseño de estas cámaras no está direccionado inicialmente para fotogrametría, pero su uso está en aumento, ya que ofrecen un menor peso, mayor facilidad de transporte, flexibilidad en variabilidad en las distancias principales (zoom), objetivos intercambiables, facilidad de adquisición y costos reducidos (Lerma, 2002). Las cámaras no métricas presentan limitaciones frente a las cámaras métricas, debido a que su geometría interna no es conocida, pues la distancia principal no es precisa y puede diferir de lo que indica el fabricante. Otra limitación importante es el desconocimiento de la curva de distorsión geométrica del lente.

Dado estas características de las cámaras no métricas, se puede decir que las mismas son más susceptibles a perder precisión en comparación a las cámaras métricas, por esto se debe ser más rigurosos en el método y procesamiento de la información y se debe tener en cuenta la determinación de los parámetros de calibración de la cámara. A modo ilustrativo, la Figura 3.4. Ilustra una cámara digital no métrica diseñada específicamente para ser montada en una plataforma UAV y corresponde al sensor a utilizar en el presente trabajo.

Figura 3.4. Cámara CMOS 1”, de 20 Megapíxeles. Tomado de sitio web *DJI* https://www.dji.com/phantom-4-pro consultado el 15 de diciembre de 2018

Las características físicas de la cámara equipada en el sensor utilizado en el desarrollo de esta investigación se describen en la Tabla 3.1. Información de la cámara CMOS 1”, de 20 Megapíxeles ubicada en el dron Phantom 4 Pro , estos parámetros allí consignados se

requieren para la determinación de las variables necesarias para la planeación y desarrollo del vuelo.

Tabla 3.1. Información de la cámara CMOS 1”, de 20 Megapíxeles ubicada en el dron Phantom 4 Pro

CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD DE MEDIDA
Peso	0,3	kg
Ancho sensor	13,13	mm
altura sensor	8,76	mm
Resolución horizontal del sensor	5472	px
Resolución vertical del sensor	3648	px
Distancia focal	8,8	mm

3.2. VEHICULOS ÁEREOS NO TRIPULADOS

Los vehículos aéreos no tripulados se definen como “una aeronave sin piloto, que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar o que ha sido programada y es plenamente autónoma” (Circular 328, 2011). El uso de vehículos aéreos no tripulados se remonta desde el siglo XIX, con el uso del planeador no tripulado, y su desarrollo ha sido en su mayoría con fines militares. Es en los últimos años, cuando estos sistemas han pasado al uso civil y se ha visto un crecimiento en su desarrollo y aplicabilidad, ampliando el interés, la investigación y regulación de los mismos.

Los diferentes sensores que se han adoptado para ser transportado por los UAV como son LIDAR**,** RADAR, cámaras ópticas, cámaras infrarrojas y cámaras termales han hecho que estas plataformas se conviertan en una herramienta útil de captura y adquisición de información en rangos de tiempos muy cortos, a bajo precio y en diferentes tipos de zonas que por diferentes motivos no pueda acceder el hombre. En la actualidad, uno de los términos más usados para referirse a los drones es RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System).* Este hibrido está compuesto por el RPA, su estación o estaciones conexas de pilotaje a distancia, los enlaces requeridos de mando y control, y cualquier otro componente según lo especificado en el diseño de tipo (Circular reglamentaria 002, 2015).

3.2.1. Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados

La clasificación de los UAV's según la OACI, por sus siglas en inglés, *International Civil Aviation Organization*, sugiere diferentes elementos para evaluarlos y clasificarlos (Energía cinética, peso, criterios de performance, tipo de operaciones, áreas de operación, entre otras), dado a que no han definido límites claros en sus postulaciones. Para la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) se toma como parámetro de clasificación de los UAV's el peso, teniendo como límite de peso máximo de despegue (MTOW) menor o igual a 25 Kg, clasificadas como RPA Pequeños, y con un peso máximo de despegue mayor a 25 Kg, como RPA grandes. Una posible clasificación se basa en el peso, distancia (alcance), altura de vuelo y resistencia (autonomía), como se observa en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación completa de sistemas existentes de UAV (Van Blyenburgh, 2006)

			Masa(kg)	Distancia (km)	Altura vuelo (m)	Resistencia (h)
Táctico	Micro	Micro	<5	<10	250	1
	Mini	Mini	< 20/25/30/150*	<10	150/250/300*	<2
	Alcance cercano	CR	25–150	10–30	3000	2-4
	Alcance corto	SR	50–250	30 - 70	3000	3-6
	Alcance medio	MR	150-500	70-200	5000	6-10
	Autonomia media	MRE	500-1500	>500	8000	10-18
	Altitud baja, penetración profunda	LADP	250-2500	>250	50-9000	0,5-1
	Autonomia alta, altitud baja	LALE	15-25	>500	3000	>24
	Autonomia alta, altitud media	MALE	1000-1500	>500	3000	24-48
Estratégico	Autonomia alta, altitud alta	HALE	2500-5000	>2000	20000	24-4
	Estratosférico	Strato	>2500	>2000	>20000	>48
	Exo- Estratosférico	EXO	TDB	TDB	>30500	TDB
Tareas Especiales	Combate	UCAV	>1000	+/-1500	12000	+/-2
	Ofensivo	LETH	TDB	300	4000	3-4
	Señuelo	DEC	150-500	0-500	50-5000	<4

* Varia según restricciones legales de los países

La clasificación de los UAV se puede hacer dependiendo de los criterios de análisis, como lo es por el tamaño del UAV (descritas en la Tabla 3.2), por su motor (de turbinas, eléctrico), por la forma de despegue (despegue vertical y no vertical), entre otros. En la Tabla 3.3, indica la clasificación de las plataformas UAV que pueden ser utilizados para capturar información con fines fotogramétricos.

Tabla 3.3. Clasificación de UAV, de acuerdo con las clases con o sin motor, así como las más o menos ligeras que el aire (Eisenbeiss, 2009)

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Más liviano que el aire</td><td colspan="3">Más pesado que el aire</td></tr>
<tr><td>Ala flexible</td><td>ala fija</td><td>ala rotatoria</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sin motor</td><td>Globo</td><td>Ala delta</td><td>Planeadores</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td>Parapente</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">Con motor</td><td>Aeronave</td><td>Parapente</td><td>Aeroplano</td><td>Rotor único</td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td></td><td>Coaxial</td></tr>
<tr><td>Hélice</td><td>Cuatro rotores</td></tr>
<tr><td></td><td>Multi-rotor</td></tr>
</table>

Se debe señalar desde que esta tecnología está disponible para uso civil, y accesible en términos económicos, la fotogrametría como tal ha dejado de ser un nicho especializado de un grupo cerrado y se ha vuelto a popularizar en muchos sectores, lo que ha permitido que las empresas públicas y privadas capturen, procesen y generen sus propios productos a un menor precio y en tiempos más cortos. Dado a que la autonomía de vuelo es corta, y los sensores no son siempre los óptimos para procesos fotogramétricos, han limitado el uso de esas tecnológicas en términos de escalas grandes y áreas pequeñas (comparado a las áreas de la fotogrametría con cámaras métricas sobre una plataforma de avión).

3.2.1.1. Ala fija

Los UAV de ala fija son aeroplanos que requieren un recorrido horizontal para el despegue, ya sea por catapulta o pista. La elevación de estos UAV se da por el avance que le da los motores o hélices en su parte trasera y la aerodinámica del equipo. En la Figura 3.5 vemos ejemplos de este tipo de aeronaves. Existen aeronaves sin motor, como los planeadores, que

utilizan las corrientes de aire para el ascender moverse hacia delante. El tipo de aterrizaje de estas aeronaves puede ser horizontal o vertical por medio de paracaídas.

Figura 3.5. Modelo de UAV de ala fija eBee X de senseFly. Tomado de sitio web *senseFy* *https://www.sensefly.com/drone/ebee-x/* consultado el 15 de diciembre de 2018

La estructura simple de estos equipos, con su eficiencia aerodinámica permite que la autonomía de vuelo sea mayor con relación a los de ala rotatoria. Estos pueden ascender más y recorrer mayores distancias a mayor velocidad, por lo que son ideales para cubrir grandes extensiones de áreas, adicional, permiten transportar una carga adicional mayor que el de los de ala rotatoria.

3.2.1.2. Ala rotatoria

Los UAV de ala rotatoria, también conocidos como los equipos de despegue vertical, pueden clasificarse según el número de rotores que posee. El sistema de rotor único consta de un rotor principal (rotor que da la elevación) y un rotor en la cola, que se usa para contrarrestar los movimientos, como el ejemplo que se observa en la Figura 3.6. El sistema de doble rotor se diferencia al sistema de rotor único en el aumento de carga útil y pueden operar a mayor altitud con la misma potencia.

Figura 3.6. UAV de ala rotatoria con único rotor. Tomado de sitio web *dronespain* https://dronespain.pro/tipos-de-drones-aereos/ consultado el 15 de diciembre de 2018

Los sistemas de cuatro rotores, como el que se puede observar en la Figura 3.7 no tienen aspas de cola para controlar la rotación, como los de rotor simple o doble, por lo que dos de los rotores rotaran en sentido horario y los otros dos en sentido anti horario para compensar la rotación y que el equipo se pueda mantener estable y flotando, como se indica en la Figura 3.8.

Figura 3.7. UAV de ala rotatoria con cuatro rotores md4-1000. Tomado de sitio web *Microdrones* https://www.microdrones.com/en/drones/md4-1000/ consultado el 15 de diciembre de 2018

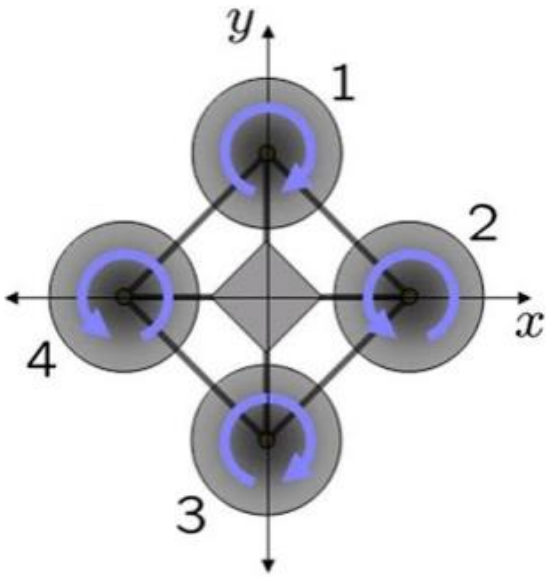


Figura 3.8. Rotación de los rotores. Tomado de sitio web:
https://www.ingenieriaparatodos.com/2017/07/diseno-y-construccion-de-drone.html /
consultado el 15 de diciembre de 2018

Estos sistemas tienen menor carga útil que los de un rotor o doble rotor, por esto se equipan con sensores más livianos, y tienden a ser más pequeños, por lo que son más susceptibles a condiciones ambientales. El radio de operación es más pequeño, pero tienen gran maniobrabilidad y pueden volar más cerca de objetos en comparación con los de UAV de sistema de ala fija, por lo que pueden volarse en interiores como en exteriores.

Las variaciones de aceleraciones en cada uno de los ángulos *pitch* y *roll* se logra aumentando la velocidad de cada uno de los rotores, en el ángulo *pitch*, son producidas por variación de las hélices 1 y 3, como se observa en la Figura 3.9, lo que hace una traslación hacia delante y hacia atrás. Si se realiza la misma acción para las hélices 2 y 4, generamos cambios en el ángulo *roll* y genera traslación lateral. La rotación *Yaw* es producida por un desequilibrio de los rotores, lo que genera problemas de estabilidad, por lo cual se requiere conocer el estado del cuadricóptero por medio de sensores, como los giroscopios y a acelerómetros.

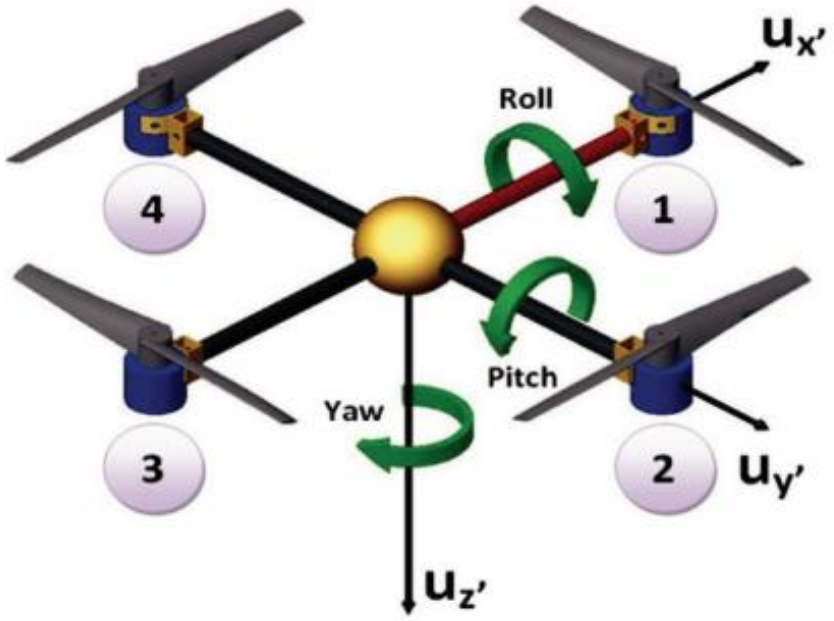


Figura 3.9. Ángulos de orientación del UAV de cuatro rotores
Fuente: tomado de (Kumar et al., 2015)

3.3. FOTOGRAMETRIA

Las técnicas fotogramétricas se derivan de las técnicas de percepción remota y de fotointerpretación, y tiene como principio la captura de información superficial, con el fin de representar espacialmente la superficie terrestre en mapas. La fotogrametría se puede definir como la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición) del objeto fotografiado, según la ISPRS (*International society photogrammetry and remote sensing*).

La fotogrametría con imágenes no métricas obtenidas desde plataformas RPAS ha crecido en los últimos años, al igual que los los software de procesamiento, permitiendo la aplicación de técnicas fotogramétricas a cámaras no métricas de bajo costo. La fotogrametría digital tiene sus inicios alrededor de la década de los sesenta y su mayor desarrollo inicia en la década de los ochenta, donde van de la mano con el desarrollo y evolución de la informática, los ordenadores y las cámaras digitales.

Según Schenk (2002), la fotogrametría se puede organizar históricamente en cuatro generaciones. Inicialmente a partir de la invención de la fotografía, en el año 1839, donde se toman las primeras fotos desde globos. Seguido de la fotogrametría analógica, donde se desarrolla la fotogrametría estereoscópica, siendo allí donde se formulan los principios fundamentales de la técnica que hasta el día de hoy siguen vigentes. Después la fotogrametría analítica, que inicia con la invención de los computadores y su desarrollo, la cual va acorde las con innovaciones tecnológicas. Finalmente la fotogrametría digital, donde se integra a la fotogrametría las imágenes digitales, e igual que la generación anterior, va de la mano con los avances tecnológicos, no solo en hardware si no en software especializado. En esta última generación, podremos referenciar y dar un espacio especial a la fotogrametría con drones, una evolución por el cambio de plataformas convencionales, como son los aviones o helicópteros, y la utilización de cámaras digitales no métricas.

3.3.1. Método fotogramétrico

La obtención de cartografía por métodos fotogramétricos se realiza mediante un proceso que involucra los siguientes pasos.

3.3.1.1. Diseño de vuelo

El diseño para la ejecución del plan de vuelo consiste en determinar la trayectoria de la aeronave, tanto en coordenadas horizontales como en vertical, calculando la separación entre líneas de vuelo, así como la distancia entre cada exposición, sobre cada línea de vuelo. Usando las fórmulas para fotogrametría convencional (Deagostini, 1990) , se tiene:

$$Si = s \cdot Ei \tag{3.1}$$

$$Zi = Ei \cdot c \tag{3.2}$$

$$Ai = s \cdot Ei(1 - vi) \tag{3.3}$$

$$Bi = s \cdot Ei(1 - ui) \tag{3.4}$$

$$Si^2 = (s \cdot Ei)^2 \tag{3.5}$$

$$vi = 1 - (Ai/(s \cdot Ei)) \quad (3.6)$$

$$ui = 1 - (Bi/(s \cdot Ei)) \quad (3.7)$$

$$NFLV = \left(\frac{L}{Bi}\right) + 1 \quad (3.8)$$

$$NLV = \left(\frac{A - Si}{Ai}\right) + 1 \quad (3.9)$$

$$NFT = \sum NFLV \quad (3.10)$$

$$NFT = \sum NFLV$$

, donde:

s : Tamaño de la fotografía;

Si: Lado de la fotografía;

c: Distancia principal;

Zi: Altura de vuelo;

Ai: Separación entre líneas de vuelo;

Bi: Base en el aire;

Si^2: Área de fotografía;

vi: Recubrimiento lateral (%);

ui: Recubrimiento longitudinal (%);

$NFLV$: Número de fotografías por líneas de vuelo;

L: Longitud de línea de vuelo;

NLV : Número de líneas de vuelo;

A: Ancho del terreno a volar;

NTF: Número total de fotos.

Las Figura 3.10 y Figura *3.11* ilustran las relaciones geométricas de las cuales se deducen las ecuaciones (3.1) a (3.10).

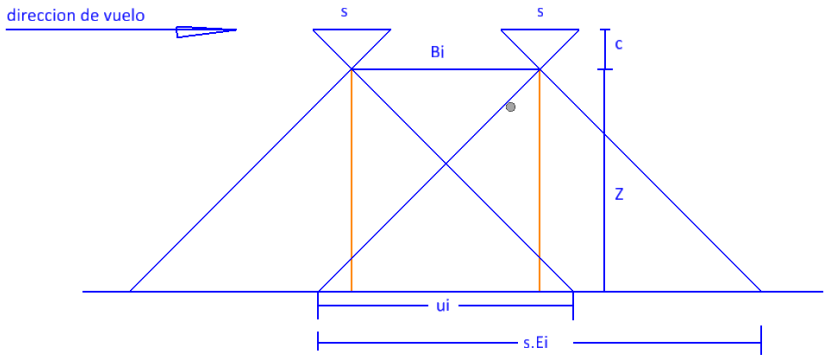


Figura 3.10. Recubrimiento longitudinal (u)
Fuente: Elaboración propia

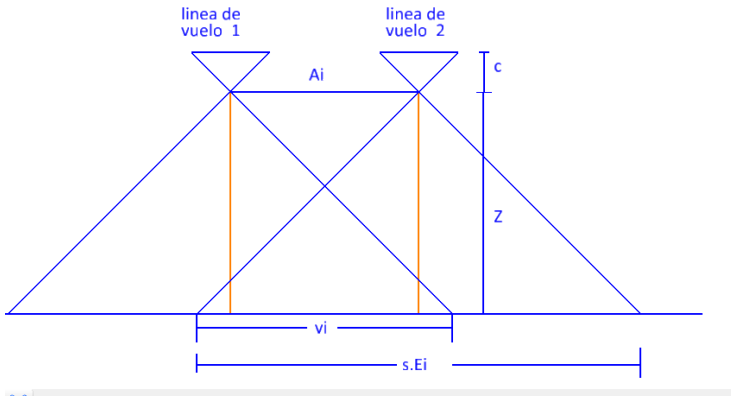


Figura 3.11. Recubrimiento lateral (v)
Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Diseño de vuelo para el dron Phantom 4 pro Obsidiam.

El software UgSC es una herramienta creada para realizar planes de vuelo y soporta varios drones entre ellos el Phantom 4 pro Obsidiam. Tiene la posibilidad de asociar a la zona de toma el DTM (*digital terrain model*) disponible en internet y lo utiliza para mantener constante el GSD variando la altura de vuelo, no solo en cada línea de vuelo sino también en cada exposición. En la Tabla 3.4 se pueden observar los parámetros que el software, UgSC para *dji*, arroja.

Tabla 3.4. Parámetros de diseño del vuelo. Del software UGSC para dji

Resolución (3GSD)	Frontal (%)	Lateral (60%)	Angulo Dir.	Pasadas	Tamaño de huella	Altura promedio de vuelo (m)
3	80	70	30°	6	164,04m x 109,44m	110

El GSD es la mayor representación que un pixel muestra de un objeto en la superficie terrestre y es función directa de la altura de vuelo y de la resolución de la cámara, es decir, cuánto más alto vuele el dron menos resolución se tiene por qué el pixel cubre más área, pero a coste de menor detalle. De otra parte, en cuanta más resolución tenga el sensor se tiene más detalle.

La columna 2, **Frontal (%)**, hace referencia al concepto de recubrimiento longitudinal que en fotogrametría convencional se calcula como en la ecuación (3.7). La columna 3, **Lateral (60%)**, se refiere al recubrimiento lateral y se calcula como en la ecuación (3.6). La columna 4, **Angulo Dir**, se refiere al azimut de la línea de vuelo y generalmente lleva la orientación del sentido de la curva de nivel, para minimizar la variación de escala. La columna 5, **Pasadas**, hace referencia al número de líneas de vuelo y se calcula con la ecuación (3.9). La columna 6, **Tamaño de huella**, da las dimensiones de cubrimiento del terreno.

La formulación para el diseño de vuelos según Deagostini (1990) está basada en la geometría del formato de las cámaras de la época, e.g. la Wild rc 30 la cual tiene un formato cuadrado de 23cm. x 23 cm. Sin embargo las cámaras usadas en los RPAS no tienen un formato cuadrado sino rectangular, por lo que en la aplicación de la fórmula (1) se debe usar un valor (s) para par el recubrimiento lateral y otro valor de (s) para el recubrimiento longitudinal. La columna 7, **Altura prom vuelo (m)**, se refiere a la altura promedio de altura del dron sobre el terreno para satisfacer un GSD de diseño.

Definición de la altura de vuelo

En la determinación del tipo de altitud que va a tomar el RPA, el software UgCS nos permite realizar el diseño el vuelo fotogramétrico con dos tipos de altitud con características diferentes según las necesidades de los objetivos, estos tipos se conocen como AMSL (*Above Mean Sea Level*) y AGL (*Above ground level*).

Altitud AMSL

En el tipo de altitud AMSL se calcula el punto más bajo de terreno en el área de interés, y a partir de este punto se determina el GSD y con la definición de la resolución espacial define la altura de vuelo. Esta última se mantiene constante y no tiene en cuenta el relieve, como se observa en la Figura 3.12.

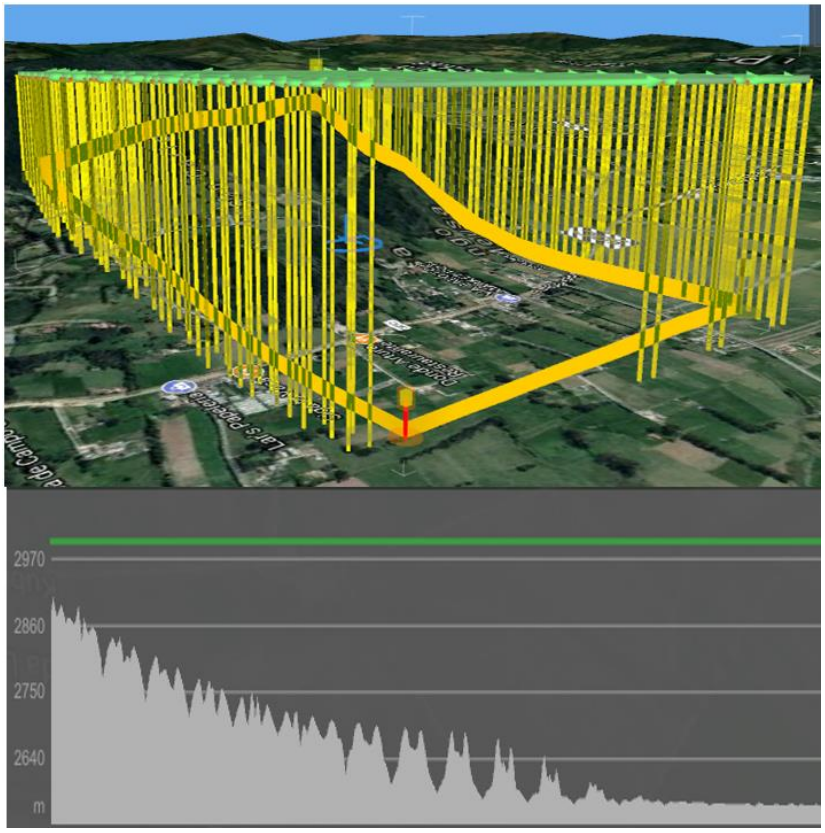


Figura 3.12. Ejemplo de diseño de vuelo con tipo de altitud AMSL altura constante y su perfil topográfico. Fuente: elaboración propia sobre software UgCS

Esto que implica que, al tener variaciones de alturas de terreno, el GSD podría verse afectado al no ser constante (por ejemplo, si el punto más bajo se encuentra en las zonas planas, el GSD de las imágenes en estas zonas va a ser constante, en zonas de montaña el GSD va a ser mayor, ya que la distancia entre el sensor y la superficie terrestre va a ser menor) y presentar variación en las escalas de la imagen.

El tipo de altitud AGL (ya definido) para el diseño de vuelo fotogramétrico, permite tener en cuenta los cambios de altura o pendiente del terreno, con el objeto de tener al dron una trayectoria constante con relación a la superficie terrestre. En la Figura 3.13 se puede observar como el RPA, mantiene siempre su altura de vuelo con relación a los cambios dependiente, como dibujando la superficie terrestre en las líneas de vuelo intentado mantener la altura sobre la superficie terrestre constate.

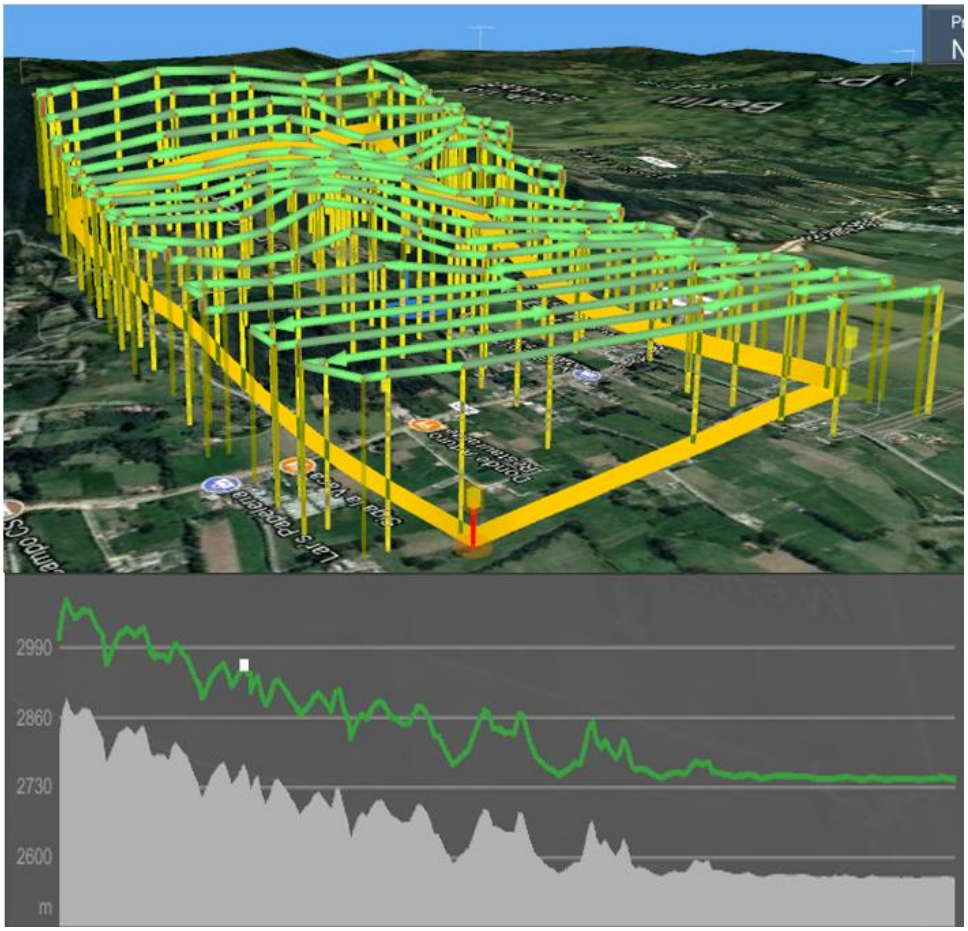


Figura 3.13. Ejemplo del diseño de vuelo con tipo de altitud AGL altura variable.
Fuente: elaboración propia sobre software UgCS

La determinación de los valores de tolerancia para el tipo de altitud AGL va a incidir en el grado de detalle del vuelo con respecto a la superficie terrestre y en el rendimiento del equipo. Para tolerancias mayores, habrá menor cantidad de *waypoints* (puntos donde el dron encuentra variación en el eje de la ruta, tanto en horizontal como en vertical), por lo que podría verse afectada la escala de la imagen al presentarse cambios de pendientes fuertes en el área e interés. Para las tolerancias con tendencia cercana a cero, mayor cantidad de *waypoints*, si se define la tolerancia en cero, la cantidad de *waypoints* podría ser demasiado alta, lo que limitaría la operación optima del dron, al realizar mayor esfuerzo por cumplir con la ruta indicada, perdería autonomía de vuelo.

La definición de la altitud AGL se obtiene a partir de:

$$Alt_Agl = (f * GSD * AnchoSensor(px))/AnchoSensor \quad (3.11)$$

$$Alt_Agl = (f * GSD * AlturaSensor(px))/AlturaSensor \quad (3.12)$$

En donde f es la distancia focal de la cámara, GSD es la resolución espacial de la imagen, el $AnchoSensor(px)$ y $AlturaSensor(px)$ es la resolución horizontal y vertical del sensor medido en pixeles respectivamente. El $AnchoSensor$ y $AlturaSensor$, corresponden al ancho y altura del sensor medido en milímetros respectivamente.

Definición del tamaño de la huella

Debido a que las imágenes obtenidas de la cámara del UAV tienen un formato rectangular como se observa en la Figura 3.14, se debe determinar la altura y el ancho del marco, para ello se requiere los parámetros consignados en la Tabla 3.4, información obtenida del metadato de la cámara.

Figura 3.14. Ejemplo del diseño de vuelo con tipo de altitud AGL altura variable
Fuente: Elaboración propia.

Estos parámetros correspondientes al tamaño de la imagen, se obtiene de las siguientes relaciones:

$$AnchoMarco = (AnchoSensor * Alt_Agl)/f \quad (3.13)$$

$$AlturaMarco = (AlturaSensor * Alt_Agl)/f \quad (3.14)$$

Donde Alt_Agl se obtiene del resultado de las ecuaciones (3.11) o (3.12).

3.4. DISEÑO DE FOTOCONTROL

3.4.1. Cantidad de puntos de control

La cantidad de puntos de control depende de muchas variables, como la precisión, la escala y el sensor. Por otra parte, si el proyecto requiere control directo, como es el caso que nos ocupa, entran en juego otras variables que tienen que ver con las características geométricas del sensor, como las dimensiones de la huella y el recubrimiento longitudinal y transversal. Se denomina control directo al diseño o arreglo de puntos de control de un proyecto en el

cual todos los modelos estereoscópicos están controlados, es decir, cuatro puntos de control por cada par de fotografías consecutivas, como se puede observar en la Figura 3.15.

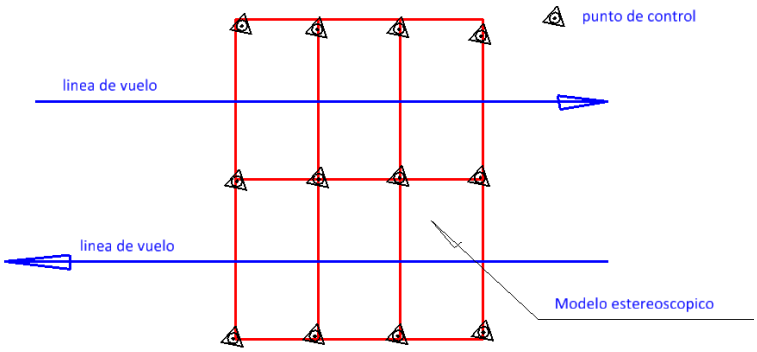


Figura 3.15. Control directo. Cada con control terrestre. Fuente: Elaboración propia

En fotogrametría clásica se usa el control directo para proyectos de escala 1:1000 y mayores y no se necesita el proceso de aerotringulación. Para proyectos cartográficos a escala 1: 2000 el control se hace cada dos o tres modelos, y para escalas menores se puede reducir aún más cantidad de puntos de control, bajando también así la precisión.

Actualmente, los procesos cartográficos se adelantan con tecnologías digitales y empiezan a reemplazar algunos criterios de diseño de la cartografía convencional, por ejemplo, la relación escala de la foto y escala de la carta a producir, la cual es de 1 a 5. En ese caso, para producir una carta a escala 1: 1000 se diseñaba el vuelo para obtener una fotografía a escala 1:5000, ahora esta relación se maneja desde la resolución espacial. La Tabla 3.5 muestra estos nuevos criterios de diseño.

Tabla 3.5. Relación escala-tamaño de pixel (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016)

Escala Cartografía	**Resolución mínima de aerofotografía/imagen**	**Especificación requerida**
1:1.000	10 cm	Toma de aerofotografía GSD 10
1:2.000	20 cm	Toma de aerofotografía GSD 20
1:5.000	30 cm	Toma de aerofotografía GSD 30
1:10.000	1 metro	Toma de aerofotografía GSD 50
1:25.000	2.5 metro	

Las precisiones de captura de los elementos a partir de restitución fotogramétrica se establecen como se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Nivel de tolerancia por resolución

Escala	Tolerancia (m)
1:1000	0,125
1:2000	0,250
1:5000	0,625
1:10000	1,250
1:25000	3,125

Otro criterio de diseño que ha cambiado drásticamente es la cantidad de puntos de control, esto debido a los grandes avances obtenidos al aplicar tecnologías como el GNSS y el IMU en la descripción geométrica de la imagen en el momento de la toma. Por su parte el GNSS permite la obtención de la coordenada (x y z) de la foto centro de cada imagen, mientras el IMU permite medir los ángulos κ, φ, ω, también para cada imagen, movimientos representados en la Figura 3.16.

.

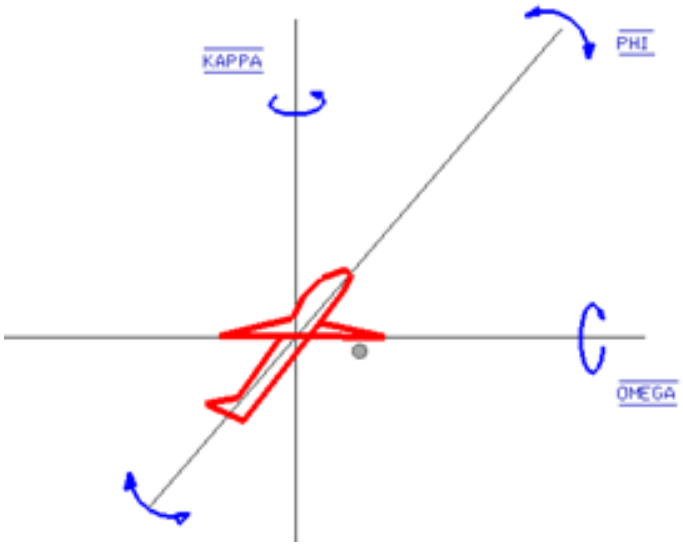


Figura 3.16. Movimientos del avion en el aire. Fuente: Elaboración propia

El IGAC utiliza para sus vuelos la cámara digital métrica Ultracam Vexcel, las imágenes producidas por esta cámara ya cuentan con las coordenadas de los centros de sus fotos al igual que con los ángulos κ, φ, ω, lo cual le ha servido para reducir los costos del levantamiento de puntos de control. No obstante, en Instituto Geografico Agustin Codazzi (2016) no se da ninguna información acerca de cuantos puntos de control usar para determinada escala de cartografía. En el presente estudio la cámara del dron Phantom 4 pro Obsidiam es una cámara no métrica, portal razón y por no contar con normatividad local al respecto, el diseño del control terrestre se realiza con la densidad máxima de control terrestre, es decir control directo, para realizar un primer testeo de precisión del dron.

3.4.2. Señalización de los puntos de control

En Colombia lo más común es realizar la señalización de los puntos de control por el método sin preseñalización, el cual consiste en realizar la determinación de coordenadas después de haber realizado la misión de vuelo. Una vez se obtienen las fotografías se diseña el control y se va a campo para determinar las coordenadas de puntos claramente identificables en la fotografía, como lo puede ser la esquina de una construcción de una zona verde o de una cancha deportiva.

El otro método es el denominado preseñalizado, el cual consiste en realizar el control antes de hacer el vuelo, mediante puntos señalizados con marcas que se colocan en el terreno para que sean parte de la escena en el momento de la toma de fotografías. La Figura 3.17 presenta a modo de ejemplo una marca de este tipo de diseño propio e impresa en telas impermeables. Esta operación requiere una labor de campo más exigente ya que los preseñalizados deben ser replanteados para que su posición sea tal que aparezcan en la mayoría de las fotos.

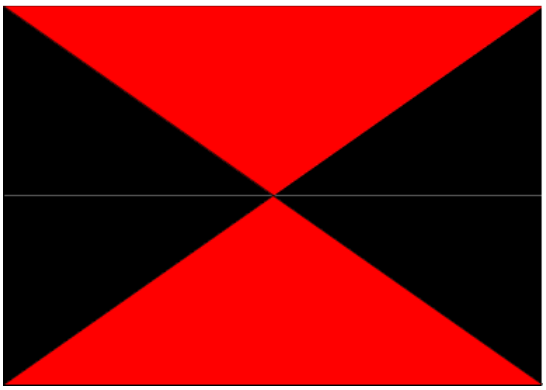


Figura 3.17. Marca para preseñalizado. Fuente: elaboración propia

3.4.3. Determinación de las coordenadas de los puntos de control terrestre

La determinación de coordenadas o levantamiento de puntos de control se puede realizar por diferentes métodos topográficos convencionales o por métodos GNSS, o si se quiere por la combinación de estos dos.

3.5. TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL

3.5.1. Levantamientos topográficos

El levantamiento topográfico es un método de captura directa de información en el terreno, a través de instrumentos que miden distancia, ángulo horizontal y ángulo vertical. Este método requiere de dos puntos de amarre de coordenadas conocidas para que la información se pueda georreferenciar.

Un levantamiento topográfico involucra dos componentes: la *planimetría*, la cual hace referencia a la posición (*x, y*) de un elemento de la superficie, y la *altimetría*, que se refiere a la altitud o cota (*z*) del elemento con respecto a una superficie de referencia. La precisión de un levantamiento topográfico está dada por la relación (Torres & Villate, 1983):

$$x = D/e \tag{3.15}$$

, donde:

e : Error máximo permitido;

D : Longitud de la poligonal;

x: La longitud a la cual se cometerá un metro de error.

Según Torres & Villate (1983) se considera que un levantamiento con precisión mayor que 1: 10000 tiene la máxima precisión para un levamiento topográfico. Para levantar la información en campo para el cálculo de la elevación de un punto de la superficie existen varios métodos:

- Cota trigonométrica: Método en el que se miden con precisión la distancia y el ángulo vertical y mediante cálculos trigonométricos de obtiene la diferencia de nivel entre dos puntos.
- Cota geométrica: Esta cota se obtiene usando un equipo llamado *nivel de precisión* el cual mide directamente la diferencia de nivel entre dos puntos, con precisión superior al obtenido por el método trigonométrico. Esta nivelación tiene unos rangos de precisión según el tipo de trabajo, como se puede observar en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Rangos de precisión según el tipo de trabajo para cota geométrica (Torres & Villate, 1983)

Clase de nivelación	**Error (cm)**
Poca precisión	9,5√k
Ordinaria	2,4√k
precisión	1,2√k
Geodésica 2o. Orden	0.8√k
Geodésica 1er. Orden	0.4√k

, donde k es la distancia nivelada en kilómetros.

- Cota elipsoidal: Es la cota obtenida por tecnología GNSS, la cual se refiere a la altitud de un punto sobre la superficie terrestre con respecto al elipsoide de referencia.
- Cota ortométrica. Es la cota obtenida por tecnología GNSS, la cual se refiere a la altitud de un punto sobre la superficie terrestre con respecto al geoide.

El IGAC en sus especificaciones técnicas (Instituto Geografico Agustin Codazzi, 2016) establece las tolerancias permitidas para el levantamiento de puntos control como se puede observar en la Tabla 3.8 para la precisión horizontal.

Tabla 3.8. Exactitud horizontal para puntos de control

Escala Cartográfica	**GSD Imagen**	EMCr	**Exactitud planimétrica confianza 95%**
1:250	2.5 cm	0.02 m	0.045 m
1:500	5 cm	0.04 m	0.09 m
1:1000	10 cm	0.08 m	0.18 m
1:2000	20 cm	0.015 m	0.37 m
1:5000	30 cm	0.38 m	0.92 m
1:10000	50 cm	0.75 m	1.84 m
1:25000	1 metro	1.88 m	4.59 m

De manera análoga se establecen las tolerancias para la componente vertical como se indica en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Exactitud vertical para puntos de control

Escala Cartográfica	**GSD Imagen**	EMCz	**Exactitud altimétrica confianza 95%**
1:250	2.5 cm	0.02 m	0.05 m
1:500	5 cm	0.04 m	0.08 m
1:1000	10 cm	0.08 m	0.15m
1:2000	20 cm	0.015 m	0.30 m
1:5000	30 cm	0.38 m	0.74 m
1:10000	50 cm	0.75 m	1.47 m
1:25000	1 metro	1.88 m	3.68 m

3.5.2. Levantamientos GNSS

El levantamiento mediante tecnología GNSS es otro método de captura directa y presenta, entre otras, tres alternativas de captura: RTK (tiempo real cinemático), el cual consiste en la obtención de la coordenada x, y, z del punto en tiempo real; otra denominada *stop and go*

en la cual se obtiene la coordenada x, y, z del punto, pero con post-proceso, es decir con trabajo adicional; y por último el posicionamiento estático diferencial con post-proceso. Estos métodos funcionan normalmente con un receptor GPS ocupando una base de coordenadas conocidas y el otro receptor denominado Rover ocupando el punto de coordenadas a determinar, los dos trabajando simultáneamente. Los tiempos de ocupación para el rastreo satelital son muy importantes y están estandarizados para Colombia.

El tiempo mínimo de rastreo simultáneo de un punto de control terrestre debe ser de 15 minutos correspondientes a la estabilización del equipo, más 5 minutos adicionales por cada kilómetro de distancia a la base, en condiciones de disponibilidad mínima de cuatro satélites y GDOP (disposición geométrica de los satélites) menor a ocho. Después de los 10 km, de distancia a la base se hacen 3 minutos adicionales por cada kilómetro (Instituto Geografico Agustin Codazzi, 2016).

3.6. AEROTRIANGULACION

3.6.1. Aerotriangulación convencional

Este proceso permite hacer extensivo el control horizontal y vertical a todos modelos estereoscópicos de un bloque de fotos a partir de puntos determinados directamente en terreno. Una definición moderna la describe como el proceso para determinar los parámetros de orientación de un bloque de imágenes fotográficas, así como las coordenadas terreno objeto de objetos espaciales (Lerma, 2002).

La triangulación aérea tradicional empieza con el armado de las fotografías sobre una mesa, organizadas por la línea de vuelo, al tiempo que se dibuja un esquema de distribución de los puntos de control terrestre. Enseguida se marcan los puntos de paso entre modelos y los puntos de enlace entre fajas, llamados *tie point* en inglés, con una nomenclatura única para evitar confusiones, como se puede observar en la Figura 3.18. Este esquema tiene nueve puntos de control *ground point control* (GPC) y 30 puntos de paso. Estos puntos de paso y de enlace deben colocarse de tal manera que aparezcan en el mayor número posible de

fotografías y requiere gran pericia por parte del operador pues los puntos deben ser transferidos al modelo siguiente y también entre fajas (Schenk, 2002). Un punto de paso que solo aparezca en una fotografía no aporta al proceso de triangulación. La siguiente fase es montar los modelos en el restituidor e iniciar la lectura de los puntos de control y de los puntos de paso. Esta fase es gran de importancia y requiere de fotogrametristas suficientemente experimentados. Luego de tener las lecturas de todos los puntos, es decir, de contar con las coordenadas de instrumento, se procede mediante software especializado a procesar la triangulación. A partir de las coordenadas terrestres de los puntos de control el software calcula las coordenadas correspondientes a los puntos de paso y de esta manera cada modelo cuenta con seis puntos de control para poder realizar la orientación absoluta, como se puede observar en la Figura 3.18.

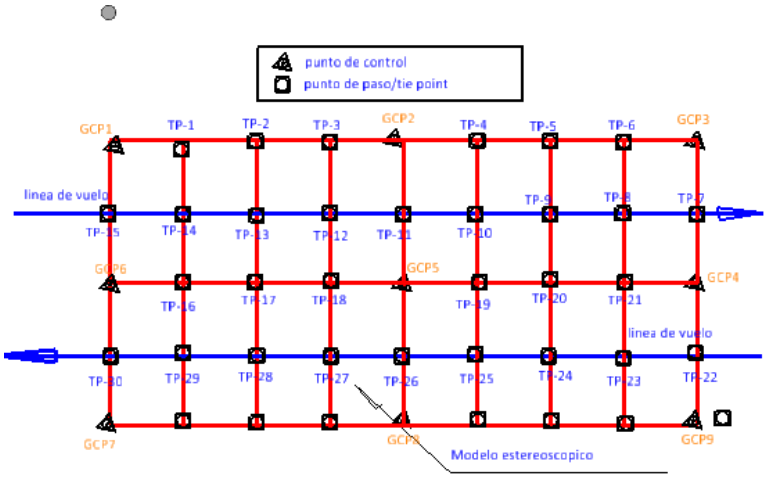


Figura 3.18. Distribución de control y de puntos de paso y entre fajas
Fuente: Elaboración propia

Este tipo de triangulación requiere forzosamente el uso de cámaras métricas en donde los parámetros internos como distancia focal, curva de distorsión de la lente y coordenadas de las marcas fiduciales son conocidas con precisión y generalmente se realiza por el método de los haces de rayos (Lerma, 2002)

3.6.2. Triangulación digital automática

La aerotriangulación automática digital busca disminuir la intervención del operador en los procesos de la aerotriangulación y, de esta forma, aumentar la automatización mediante la aplicación de procesos de correspondencia de imágenes. Las etapas de la triangulación siguen siendo las mismas que se expusieron en la aerotriangulación convencional, la diferencia está en los tiempos de proceso y otras ventajas como la posibilidad de generar las ortoimagenes y los modelos digitales de terreno de forma automática.

Uno de los procesos en que mayor ventaja se obtiene es en la medición y transferencia de los puntos de paso entre modelos y puntos de amarre entre fajas, gracias a la correspondencia de imágenes (Lerma, 2002). No obstante debido a que los algoritmos desarrollados para la correspondencia de imágenes no tienen solución para todos los casos, se requiere la intervención del operador para colocar de manera manual algunos puntos de paso, en zonas donde se presentan saltos o paralaje. También en la etapa de medición de los puntos de control se requiere la intervención del operador, por lo menos para los primeros puntos, ya que la mayoría programas de aerotriangulación predicen con bastante precisión la ubicación de los GCP, facilitando la medición.

La aerotriangulación automática según (Lerma, 2002) debe abordar los siguientes procesos en una conjunción de ambiente piramidal multi-imagen:

- Localización de zonas óptimas para medición de punto de paso.
- Correspondencia hibrida: extracción y medición automática de entidades.
- Ajuste robusto del bloque, incluyendo parámetros de deriva y autocalibración.
- Análisis estadístico y gráfico de resultados.
- Tratamiento de datos GPS, INS, MDT. Optimización del flujo de parámetros de orientación externa precisos.

3.6.3. Orientaciones

La fotogrametría digital se caracteriza por la automatización de los procesos fotogramétricos, las orientaciones necesarias para reconstruir el modelo que permita determinar las posiciones de los elementos del área de interés en el espacio. Esta automatización de procesos en fotogrametría requiere correspondencia de imagen, que se define como el proceso de encontrar automáticamente detalles o entidades homólogas puntuales, lineales o superficiales en una o múltiples imágenes (Lerma, 2002). En esta intervienen todos los procesos de formación de la imagen, la iluminación, la reflectancia, el sensor, la posición y el modo de registro.

3.6.3.1. Orientación interna

La orientación interna nos permite establecer una transformación de las coordenadas de px (filas y columnas) a un sistema de coordenadas de la imagen, las unidades de esta última son mm, cuyo origen es el punto principal (o centro de proyección) como se observa en la Figura 3.19.

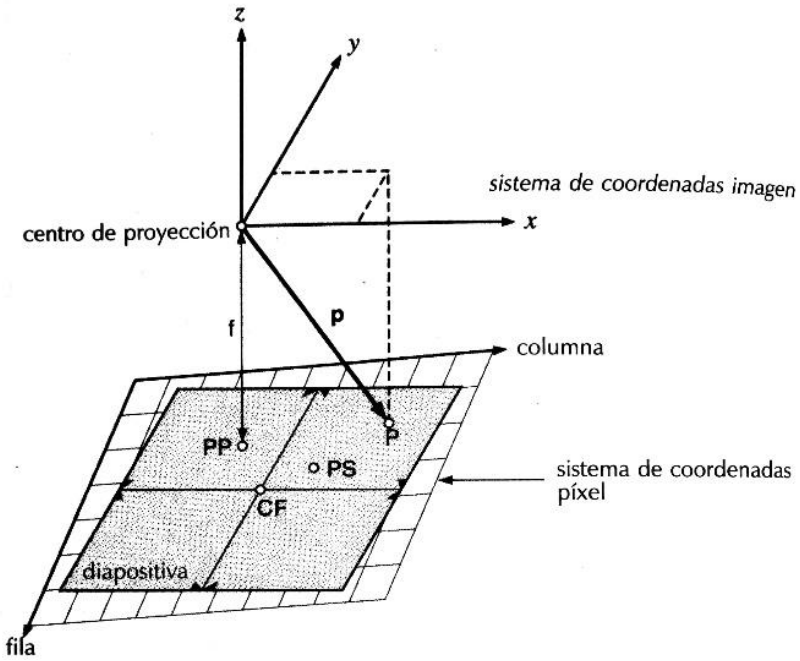


Figura 3.19. Elementos de la orientación interna. Fuente: tomado de (Schenk, 2002)

Es posible identificar el parámetro de transformación a través del proceso de calibración de la cámara, lo que permite definir la geometría interna de la cámara en el momento de la adquisición de datos para conocer elementos o variables asociada a ella, como son:

- Distancia focal de la lente(f) parámetro constante.
- Punto principal (PP)
- Distorsión de la lente, donde el principal componente es la forma radial.

3.6.3.2. Orientación externa

La orientación exterior define la orientación angular y la posición asociada con una imagen. Los elementos de la orientación exterior definen las características asociadas con una imagen al momento de la captura. Los elementos posicionales de la orientación externa incluyen Xo, Yo, Zo. Estos definen el centro de perspectiva (O) con respecto al sistema de coordenadas espaciales del terreno (X, Y, Z) como se observa en la Figura 3.20.

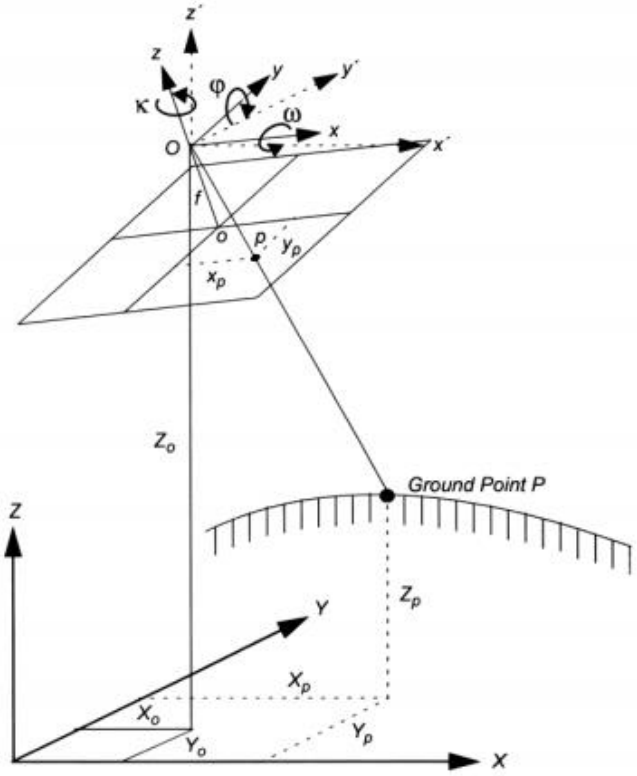


Figura 3.20. Parámetros de la orientación exterior. Fuente: tomado de (Orellana, 2006)

Usualmente se refiere a Zo como la altura del sensor sobre el nivel medio del mar (asnm), que está definida usualmente con el Datum (Orellana, 2006). Al definir la posición correcta de cada imagen, los rayos homólogos de cada una de estas generan el modelo real, el cual permite realizar las mediciones sobre dicho modelo.

Dentro de esta orientación, se puede distinguir dos tipos de orientaciones: orientación relativa y orientación absoluta.

3.6.3.3. Orientación relativa

La orientación relativa es la que nos permite reconstruir el modelo estereoscópico en la misma posición relativa en el momento de captura de la imagen. Este se puede usar para diferentes tareas como visualización, interpretación. Es un modelo libre de paralaje, donde la paralaje se puede definir como la diferencia en posición de dos puntos en dos imágenes consecutivas, se compone de la paralaje vertical, que dificulta la visión estereoscópica, la cual se puede corregir en la orientación relativa y paralaje horizontal que está definida en función de la altitud de los puntos.

La condición de coplanareidad establece que los dos centros de proyección (C, C') del par en estereoscópico, para un punto cualquiera (P) y sus puntos homólogos correspondientes en ambas imágenes (p', p'') se encentran en el mismo plano epipolar (Lerma, 2002) como se observan en la Figura 3.21, la traslación está dada en b dada en coordenadas (bx, by, bz), y las rotación (K, φ, ω) de una imagen con respecto a otra, en un sistema de modelo en coordenadas tridimensionales. Esta orientación se realiza en las condiciones de coplanariedad o colinearidad mediante un proceso iterativo por mínimos cuadrados, tanto para la fotogrametría analítica como la digital, con el fin de formar un modelo estereoscópico.

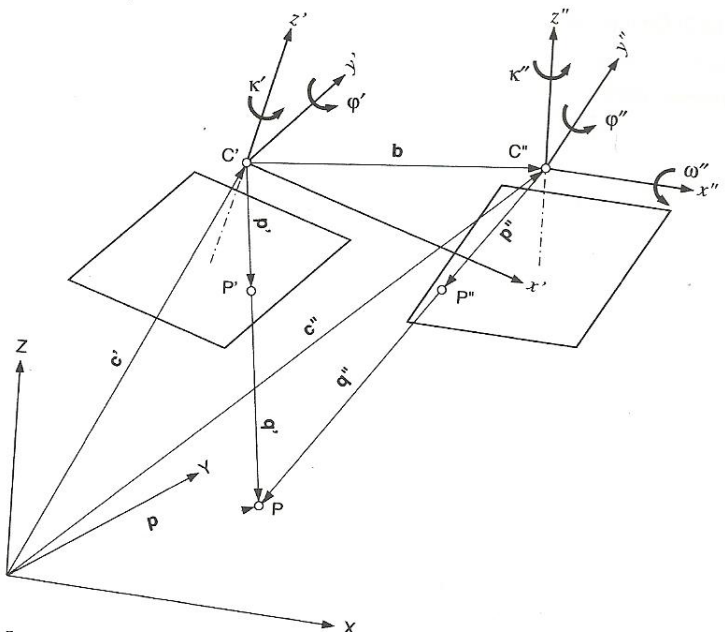


Figura 3.21. Condición de coplanareidad y orientación relativa
Fuente: tomado de (Schenk, 2002)

3.6.3.4. Orientación absoluta

Despues de realizar la orientación relativa, en el que los modelos estereoscópicos son construidos y encontrados los valores de Kappa, Phi y Omega se procede con la orientación absoluta, es donde se introduce los puntos de control terrestre para escalar y nivelar el modelo y trasladarlo a un sistema de referencia especifico (DATUM). Para esta orientación se habla de un problema con siete incógnitas o parámetros de transformación absoluta que se pueden observar en la Figura 3.22 y se describen en la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Xo \\ Yo \\ Zo \end{pmatrix} + HR_{\Omega\phi K} \begin{pmatrix} Xm \\ Ym \\ Zm \end{pmatrix} \tag{3.16}$$

, donde:

(X, Y, Z) corresponden al sistema de coordenadas terreno;
(Xm, Ym, Zm) corresponden al sistema de coordenadas modelo;
(Xo, Yo, Zo) corresponden al origen del sistema de coordenadas modelo en el sistema de coordenadas terreno/modelo;

H es el factor de escala terreno/modelo;

$R_{\Omega\phi K,}$ corresponde a la matriz de rotación, basada en la rotación de los tres giros.

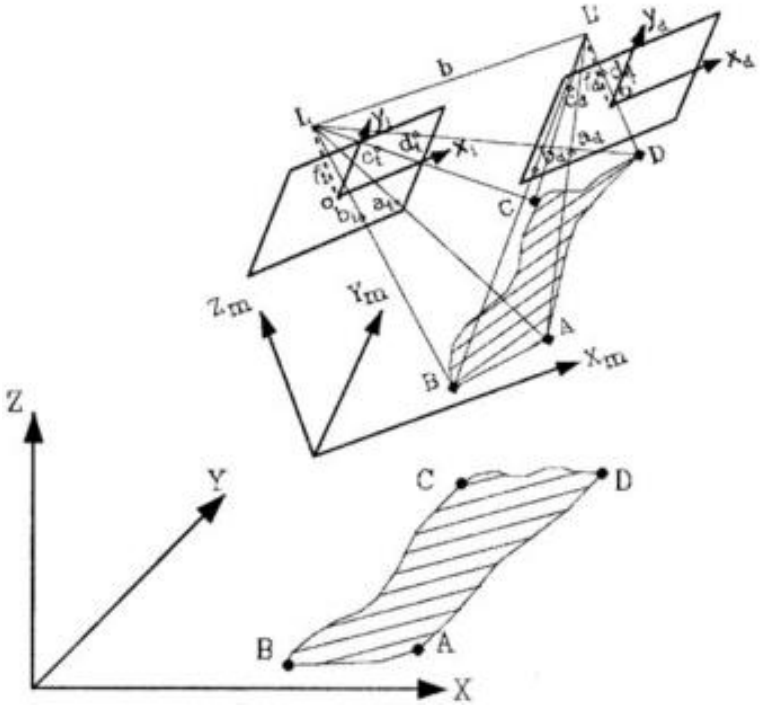


Figura 3.22. Parámetros de la orientación exterior. Fuente: tomado de (Lerma, 2002)

La determinación de los puntos de control medidos en el terreno e identificables en las imágenes ayuda a resolver este problema. Con las coordenadas reales, se puede llevar el modelo a su localización espacial (traslación) y nivelarlo, donde el modelo se orienta con respecto al sistema de coordenadas (rotación). Con el ajuste de las orientaciones, podemos determinar las coordenadas absolutas de las mediciones realizadas sobre los modelos fotogramétricos.

3.7. CORRESPONDENCIA DE IMAGEN

En fotogrametría, las técnicas de correlación son muy usadas para identificar puntos homólogos, los primeros métodos de correlación analógica fueron en la década de los años cincuenta, con el objetivo de calcular el grado de semejanza del patrón con la ventana de correspondencia calculando el factor de correlación. La correspondencia de imagen (más

conocido por *Digital Image Matching*) se refiere al proceso o habilidad de reconocer características similares en las imágenes (textura, forma, etc.) en pequeñas regiones de las imágenes de un estéreo par. Las técnicas de correspondencia de imágenes se pueden agrupar en tres categorías: basado en área, basado en características y un método hibrido (Wolf & Dewitt, 2000).

El método basado en áreas, realizan la correspondencia mediante comparaciones numéricas de números digitales en pequeñas áreas de cada imagen como se puede observar en la Figura 3.23, denominadas teselas de imagen, y la semejanza se calcula mediante técnicas de correlación cruzada o la correspondencia por mínimos cuadrados.

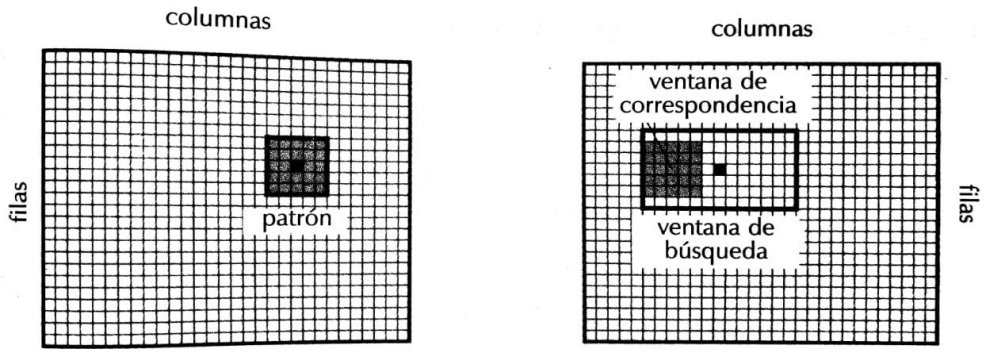


Figura 3.23. Correspondencia por áreas. Fuente: tomado de (Schenk, 2002)

El patrón es la tesela que permanece en una posición fija en una de las imágenes. La ventana de búsqueda es la zona del espacio de búsqueda dentro de las que se comparan las teselas imagen o ventanas de correspondencia con el patrón, comparación que se realiza para calcular el índice de semejanza Schenk (2002).

El coeficiente de correlación está dado por:

$$\rho = \frac{\sigma LR}{\sigma L \sigma R} \tag{3.17}$$

, donde:

σL es la desviación estándar de la tesela de imagen L (Izquierda)

σR es la desviación estándar de la tesela de imagen R (derecha)

σLR es la covarianza de las teselas de imagen L y R.

El factor de correlación está normalizado, ρ tomará valores en el intervalo (-1, 1), en donde:

$\rho = 0$, No existe correlación entre las dos teselas de imágenes, no hay coincidencia;

$\rho = -1$, Indica una correlación inversa, que ocurre si se comparan imagines idénticas;

$\rho = 1$, indica que el patron y la ventana de correlación son iguales. Dado a factores como el ruido de la imagen, este valor es muy raro de obtener.

La correspondencia por mínimos cuadrados intenta minimizar las diferencias en los niveles de gris entre el patrón y la ventana de correspondencia. Este método se caracteriza por que los parámetros de transformación se establecen previamente al proceso de compensación. Estos métodos anunciados trabajan directamente con los niveles de gris y estos tienen muy poca información explicita acerca del espacio objeto, por lo que no son suficientemente precisos.

La correspondencia basada en características utiliza como entidades homologas características o elementos obtenidos de la radiometría de la imagen original, como son los bordes, los puntos y las regiones, y se obtienen mediante operadores de interés. Este método suele obtener resultados más rápidos, que el método basado en áreas, ya que solo interviene las muestras de datos previamente extraídas. Aunque la calidad de la correspondencia depende de las características de textura de las imágenes. En fotogrametría es más común el uso de entidades puntuales obtenidas de operadores de interés, los bordes son las entidades más usadas en procesamientos de imágenes digitales.

Los métodos híbridos implican un preprocesamiento de las imágenes para resaltar características (bordes) mediante métodos de procesamiento digital de imágenes, después que se han localizado las características, se combinan con los métodos basados en áreas.

3.8. FOTOGRAMETRIA UAV

Con el incremento de la popularidad con los RPA, y la necesidad de adquirir información espacial de bajo costo, y en menor tiempo, se empieza a utilizar el término fotogrametría UAV, que es la medición fotogramétrica que opera sobre plataformas a control remoto, semiautónomo o de forma autónoma, sin un piloto en el vehículo y que está equipada con una cámara como se observa en la Figura 3.24.

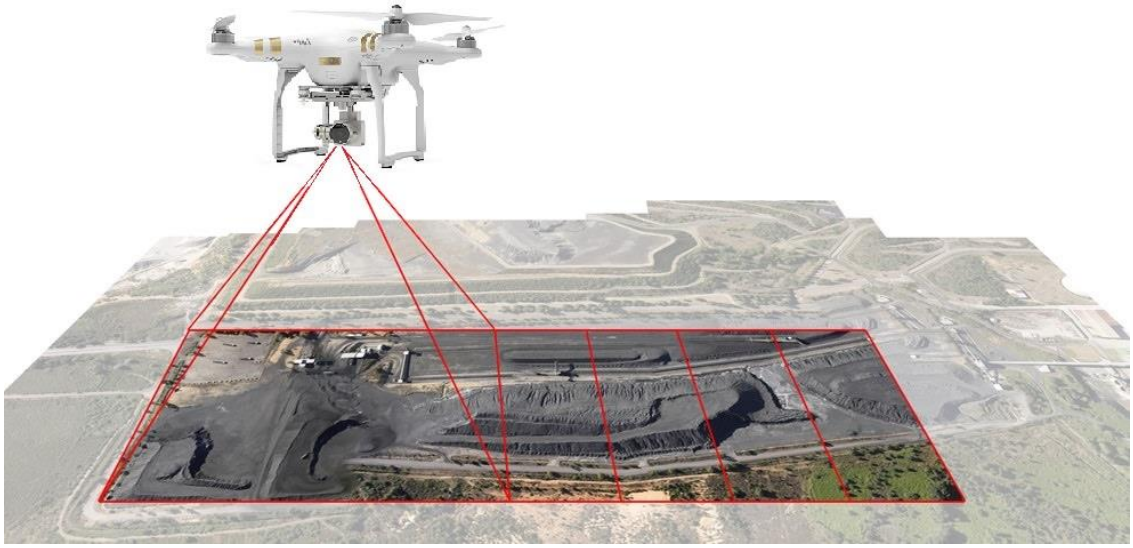


Figura 3.24. Ejemplo del equipo phantom usado para fotogrametria. Tomado de sitio web: *https://civilaxia.blogspot.com/2017/10/fotogrametria.html#.XBU6Robia71* consultado el 15 de diciembre de 2018

Los RPA actuales permiten el registro y el seguimiento de la posición y orientación de los sensores implementados en un sistema de coordenadas, por lo que se puede entender la fotogrametría UAV como una nueva herramienta, que abre nuevas aplicaciones en el dominio cercano, y que es una alternativa con bajo costo y tiempos cortos con relación a la fotogrametría aérea tripulada (Eisenbeiss, 2009).

La utilización de cámaras no convencionales de bajo costo y los softwares que permiten capturar y procesar de manera fotogramétrica las imágenes obtenidas con estos sensores no métricos, han facilitado el uso de las imágenes con alta calidad. En el caso de este trabajo,

el software utilizado genera una nube de puntos mediante algoritmos computacionales, como es el SfM.

3.8.1. *Structure from Motion* (SfM)

SfM es una técnica de visón computacional que permite reconstruir escenarios tridimensionales a partir de una secuencia de imágenes. La incorporación de procesos de SfM desplazan la previa calibración de las cámaras y la rigurosa planificación de vuelo, así como el procedimiento manual de identificación de puntos de interés en diferentes imágenes. Esto debido a que no requiere de una rigurosa planificación de vuelo, así como tampoco la calibración de cámaras, lo que permite la utilización de imágenes de diferentes momentos y diferentes escalas, con el único requisito de que tengan zonas con traslape en entre ellas que les permita obtener correspondencias entre puntos en común en dos o más imágenes. Esto permite que se automaticen algunos procesos y que utilicen mayores cantidades de imágenes para la generación de modelos 3D sobre posiciones relativas.

SfM opera bajos las mismas bases de la fotogrametría estereoscópica, que permita la ubicación de un punto en 3D en diferentes imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista, esto es posible por medio de la triangulación, que es solucionada por medios computacionales, para la fotogrametría digital convencional la posición de la cámara y la orientación de cada imagen es conocida. Por otro lado, si los parámetros de posición y orientación no se conocen, la estructura en 3D se puede solucionar a partir de la superposición de imágenes, en donde permite solucionar además de manera automática las orientaciones internas y relativa, gracias a un ajuste iterativo que es altamente redundante, basado en una base de datos de características extraídas automáticamente de un conjunto de múltiples imágenes superpuestas (Snavely, 2008).

Así, el conocimiento de la posición de la cámara y de puntos de control no es necesario para la reconstrucción del modelo. La geometría de la escena y la posición de la cámara se reconstruyen de forma simultánea mediante la identificación automática de características en múltiples imágenes, las cuales se van identificando imagen a imagen, como se observa

en la Figura 3.25. Esto permite estimar inicialmente las posiciones de las cámaras y las coordenadas del objeto, las cuales se van refinando mediante iteraciones no lineales y por mínimos cuadrados. Dichas posiciones de las cámaras se generan en un sistema de coordenadas relativo (espacio–imagen) que coinciden con un sistema de coordenadas (espacio–objeto), que se vuelven coordenadas absolutas por medio de puntos de control (GCP) mediante transformaciones de similitud tridimensional, lo que permite identificar características claramente identificables tanto en la nube de puntos y las imágenes como en el terreno (Westoby et al., 2012).

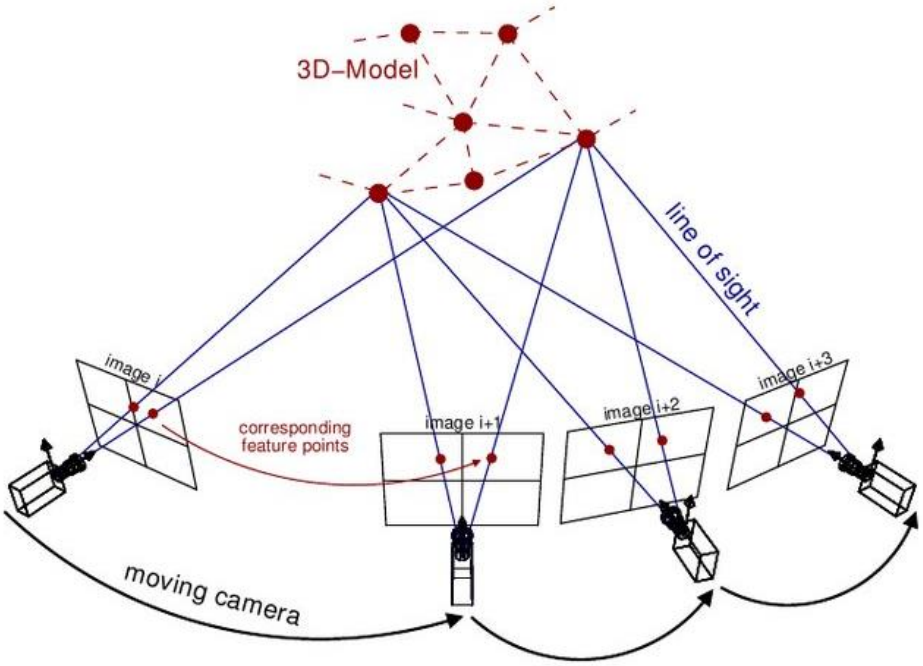


Figura 3.25. Esquema del principio de funcionamiento del Structure from Motion (SfM) Tomado del sitio web: http://www.theia-sfm.org/sfm.html consultado el 15 de diciembre de 2018

3.8.2. *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT)

En general, las imágenes presentan características locales (rangos distintivos) que pueden ser parcialmente invariantes a la iluminación, a la transformación de proyección en 3D y a las variaciones de objetos comunes que pueden ser determinados como puntos de interés y sirven de enlace para identificar la misma característica en diferentes imágenes. La extracción de las características de interés en las imágenes en escala de grises, se obtienen

mediante el uso de detector de características del algoritmo SIFT, en donde se transforma la información de las imágenes en escala y coordenadas invariantes con relación las características locales (Lowe, 2004). Las etapas principales del cálculo utilizado para generar el conjunto de características de la imagen son:

3.8.2.1. Detección de extremos en el espacio–escala

La identificación de puntos candidatos que sean invariantes a la traslación, la escala y a la rotación, que puedan ser asignados desde diferentes vistas, que sea muy poco afectado por el ruido. Estos puntos serán llamados puntos extremos y serán obtenidos por las diferencias gaussianas aplicadas en el espacio–escala de la imagen (Lowe, 2004) definida por:

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \tag{3.18}$$

Donde el espacio – escala de la imagen está definida por la función $L(x, y, \sigma)$ y se obtiene:

$$L(x, y, \sigma) = I(x, y) * G(x, y, c) \tag{3.19}$$

Donde $I(x, y)$, es la entrada de la imagen y σ la desviación estándar del filtro Gaussiano y * es la operación de convolución en x, y.

$$G(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma x^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{3.20}$$

El uso de los máximos y mínimos de la función $\mathrm{D}(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \sigma)$, se propone para un cálculo eficiente en la localización de *keypoints* estables. La diferencia de gaussianas se puede obtener de dos escalas próximas separadas por una constante multiplicativa *k*, como se muestra en la ecuación (3.18).

(Lowe, 2004) indica que la diferencia gaussiana es una aproximación de la Laplaciana normalizada ($\sigma^2\nabla^2 G$). La relación entre D y ($\sigma^2\nabla^2 G$) puede entenderse como la ecuación de la difusión de calor, en donde se puede parametrizar σ ($t = \sigma^2$).

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} = \sigma\nabla^2 G \tag{3.21}$$

Donde $\nabla^2 G$ se ser implementado como una diferencia finita, utilizando la diferencia de escalas $k\,\sigma\, y\ \sigma$:

$$c\,\nabla^2 G = \frac{\partial G}{\partial \sigma} \approx \frac{\mathrm{G}(x,y,k\sigma) - \mathrm{G}(x,y,\sigma)}{k\,\sigma - \sigma} \tag{3.22}$$

Y, por lo tanto,

$$\mathrm{G}(x,y,k\sigma) - \mathrm{G}(x,y,\sigma) \approx (k\text{ -1})\,\sigma^2\nabla^2 G \tag{3.233}$$

Dado un valor inicial para (σ), se realiza a la imagen un número de diferencias Gaussianas con la desviación estándar variando de manera creciente a lo largo de una octava (hasta obtener un $\sigma' = 2\sigma$), donde una octava puede entenderse como el conjunto de imágenes en el espacio *L* con el mismo tamaño que difieren en el filtrado σ con el que han sido obtenidas. Para obtener s intervalos enteros dentro de dicha octava el valor *k* en cada diferencia Gaussianas debe ser $2^{\frac{1}{s}}$.

Esto demuestra que la función diferencia gaussiana difiere de la laplaciana normalizada solo por el factor (*k -1),* este factor en la ecuación solamente es una constante sobre todas las escalas, lo cual no influye en la ubicación de los extremos.

Una forma eficiente de determinar $D(x,y,\sigma)$, se observa en la Figura 3.26, las imágenes de la izquierda corresponden a la imagen inicial y se convulsiona con la función Gaussiana y las de la derecha son las imágenes con la diferencia Gaussiana. Después de obtener este cálculo, la imagen se sub muestrea en un factor de 2 pixeles tanto en filas como columnas. La cantidad de octavas involucradas en el cálculo, así como la cantidad de diferencias Gaussianas calculadas por octava son un parámetro a determinar. Obteniendo así para cada

piso o nivel los extremos locales que se transformarán en candidatos a puntos clave (Flores & Braun, 2011)

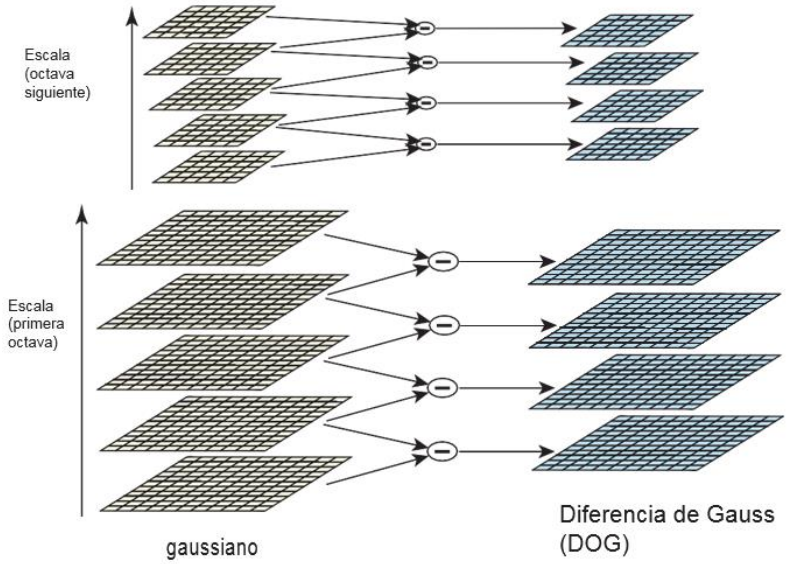


Figura 3.26. Proceso de identificación de valores extremos
Fuente: tomado de (Lowe, 2004)

Los máximos y mínimos de las imágenes obtenidas de las diferencias Gaussianas serán identificadas por la comparación del píxel con relación a sus vecinos correspondientes a su nivel y en los niveles aledaños. En la Figura 3.27 se observa el ejemplo de comparación de los pixeles, en donde el marcado con (X) corresponde al píxel o ubicación con los valores máximos y mínimos, y los marcados con círculos, serán las regiones de vecinos donde buscará la correspondencia respectiva, se puede realizar con sus ocho vecinos en la imagen actual y nueve vecinos en los niveles directamente inferiores y superiores.

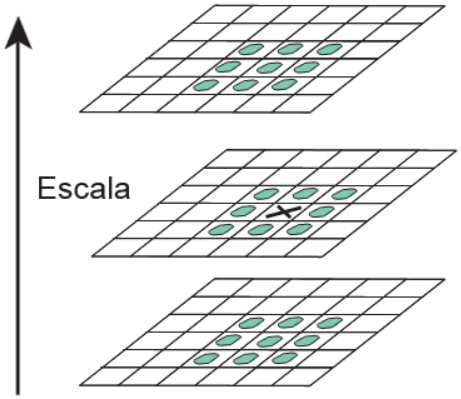


Figura 3.27. Proceso de comparación de valores extremos. Fuente: tomado de (Lowe, 2004)

3.8.2.2. Localización del punto clave

La localización del punto clave consiste en que a partir de la identificación de los puntos candidatos, se realice un ajuste detallado de los datos cercanos a la ubicación y escala, que permita rechazar a los puntos que tiene bajo contraste (susceptibles al ruido) o están mal localizados. Para ello se utiliza una serie de Taylor con respecto a la función diferenciada Gaussiana en torno a un punto dado (x_0, y_0, z_0):

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x}x + \frac{1}{2}x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2}x \tag{3.24}$$

Donde D y sus derivadas son evaluadas en el punto de muestra y $\mathbf{x} = (x, y, \sigma)^T$ es el desplazamiento del punto. La ubicación del extremo $\hat{x}$, se determina con la derivada de esta función con respecto a *x:*

$$\hat{x} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial \boldsymbol{x}^2} \frac{\partial D}{\partial \boldsymbol{x}} \tag{3.25}$$

Si el desplazamiento de $\hat{x}$ es mayor que 0,5 pixeles en cualquier dimensión, entonces el extremo se encuentra más cerca de un punto de muestreo diferente, para este caso se cambia el punto de muestra. Al desplazamiento final $\hat{x}$ se agrega la ubicación de su punto para obtener la estimación interpolada de la ubicación del extremo. La función del valor

extremo $D(\hat{x})$, es útil para rechazar extremos inestables con bajo contraste. Esto se obtiene reemplazando la ecuación (21) en la ecuación (20) (Lowe, 2004).

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2}\frac{\partial D^T}{2\partial \boldsymbol{x}}\,\hat{x} \tag{25}$$

Según indica (Lowe, 2004) los valores extremos de $D(\hat{\mathrm{x}}) < 0{,}03$ fueron descartados, asumiendo que los valores de pixeles de imagen en el rango [0,1]. Adicionalmente de quitar los puntos significativos que presentan poco contraste, la función de diferencia Gaussiana tendrá una fuerte respuesta a lo largo de los bordes, para ello se utiliza el algoritmo de Harris (Harris & Stephens, 1998).

Donde (H) la matriz Hessiana es calculada en posición y escala del punto significativo en una matriz de 2 x 2:

$$H = \begin{bmatrix} Dxx & Dxy \\ Dxy & Dyy \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

$$Traza\,(H) = \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} = \propto + \beta \tag{3.28}$$

$$Det\,(H) = \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} = \propto . \beta \tag{3.29}$$

Sea $\propto = r.\beta$, se tiene:

$$\frac{Traza\,(H)^2}{Det\,(H)} < \frac{(r+1)^2}{r} \tag{3.30}$$

3.8.2.3. Asignación de la orientación

Para cada punto de interés es asignada una o más orientaciones con relación a la dirección del gradiente de la imagen local, El descriptor del punto clave se puede representar en la relación con dichas orientaciones y así se pueden lograr las características invariantes a la rotación a partir de las direcciones de todos los puntos de la imagen dentro de cierto entorno a mismo (Flores & Braun, 2011). Este enfoque presenta la desventaja debido a que limita la cantidad de descriptores que se pueden usar y descarta mucha información de la imagen.

3.8.2.4. Descriptor del punto clave

Para determinar el descriptor relativamente invariante a diferentes parámetros como la iluminación o el punto de vista 3D para el punto clave basado en el entorno, es necesario complementar los parámetros que se han calculado previamente a una ubicación en la imagen, como son la escala y la orientación. El descriptor del punto clave es creado por la magnitud del gradiente y la orientación de cada punto significativo. A partir de ventanas Gaussianas se pondera los valores en subregiones de 4 x 4, como se ilustra en la Figura 3.28, en donde la longitud de cada flecha corresponde a la suma de las magnitudes del gradiente cerca de esa dirección dentro de la región. La subregión de matriz 2 x 2 se obtiene a partir del conjunto 8 x 8 e indica las 8 direcciones posibles para cada subregión.

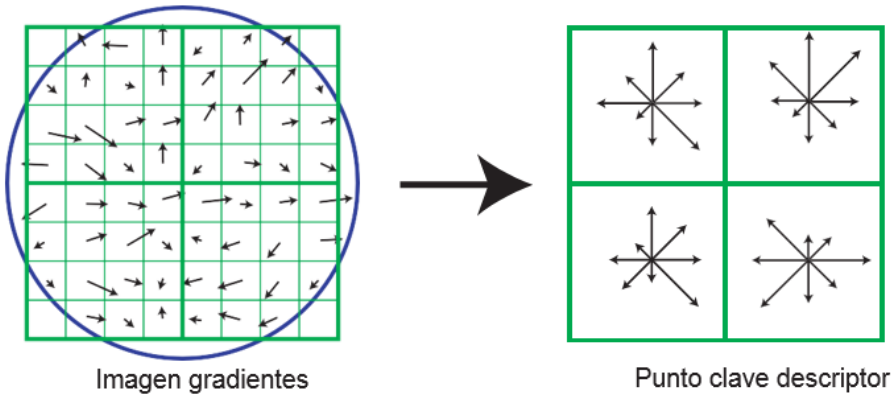


Figura 3.28. Descriptor de puntos clave. Fuente: tomado de (Lowe, 2004)

4. METODOLOGIA

4.1. DISEÑO DE FOTONTROL

Por tratarse de un test que se le va a realizar al dron *Phantom* 4 pro en cuanto a su precisión horizontal y vertical se diseña un control terrestre el cual contiene el mayor número de puntos para obtener cartografía de precisión que corresponde al método denominado control directo. De otra parte, el software UgSC arroja los datos mostrados en la Tabla 4.1. La columna Resolución (3GSD) es un dato de entrada al igual que las columnas Frontal (%) y Lateral (%). Con estos datos se puede calcular el número de fotografías y la cantidad de puntos de control.

Tabla 4.1. Parámetros de diseño del vuelo. Del software UgSC

Resolución (3GSD)	**Frontal (%)**	**Lateral (%)**	**Angulo Dir**	**Pasadas**	**Tamaño de huella**	**Altura prom vuelo (m)**
3	80	70	20°	3	164,04m x 109,44m	110

Usando la ecuación (3.1) y adaptándola al formato rectangular tenemos:

$$Si1 = s1 \cdot Ei \tag{4.1}$$

$$Si2 = s2 \cdot Ei \tag{4.2}$$

$$Si1 = 164.04$$

$$Si2 = 109.44$$

Usando la ecuación (3.4):

$$Bi = 109.44(1 - 0.7) = 21.89\ m.$$

Usando la ecuación (3.3):

$$Ai = 164.04\text{C}1 - 0.8) = 49.21\ m.$$

Usando la ecuación (3.8):

$$NFLV = \left(\frac{130}{21.89}\right) + 1 = 7$$

Para estimar la cantidad de fotografías y la cantidad de puntos de control se realiza un esquema para visualizar mejor el proyecto. En la Figura 4.1 se hace referencia al tamaño de la huella, el área efectiva con sus respectivas dimensiones, y se evidencia la desproporcionalidad entre las dos áreas debido a los altos recubrimientos tanto lateral como longitudinal.

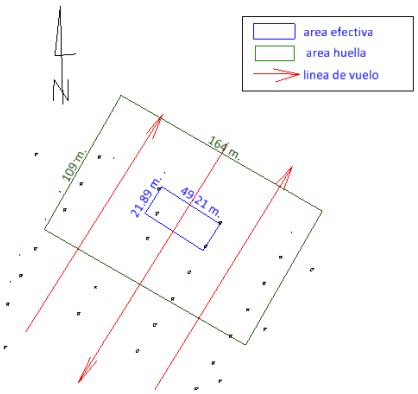


Figura 4.1. Área huella y área efectiva. Fuente: Elaboración propia

El uso de las fórmulas nos ayuda a calcular el número óptimo de fotografías, o si se quiere el número mínimo, pero generalmente se toman dos fotografías más al comienzo y final de cada línea de vuelo, para garantizar que no queden zonas sin cubrir. La Figura 4.2 muestra la configuración del plan de vuelo con seis fotografías de más, aunque los cálculos arrojen 7 fotografías por la línea de vuelo y el esquema tres líneas de vuelo es decir 21 fotografías.

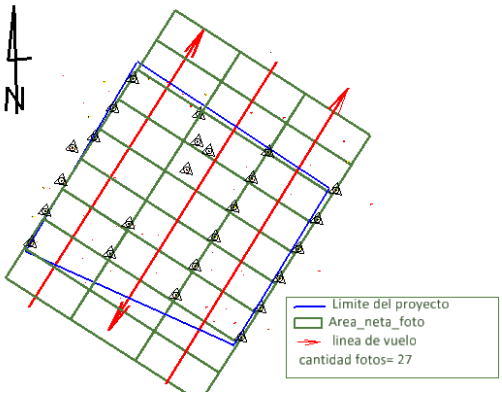


Figura 4.2. Esquema de fotografías y control. Fuente: Elaboración propia

No obstante realizar el cálculo de la cantidad de puntos de control y su distribución, cuando se llegó a campo a cumplir la misión, la planificación no se pudo cumplir a cabalidad, ya que se presentaron problemas de accesibilidad y algunos puntos fueron reubicados, como se muestra en la Figura 4.3. Se colocaron 25 puntos de control con la nomenclatura P1 a P25.

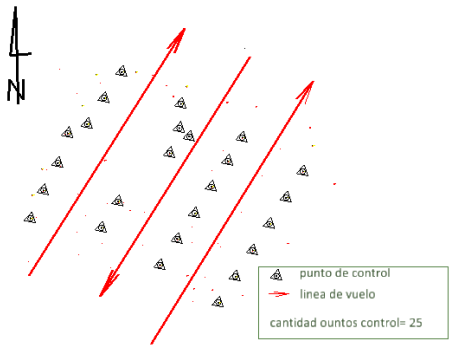


Figura 4.3. Distribución de puntos de control (Control directo). Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Preseñalización

Se toma la decisión de realizar en control por el método de preseñalización debido a los pocos detalles presentes en el terreno. Este se realizó mediante plantillas de 50 cm x 35 cm. de color negro y rojo, como se puede observar en la Figura 4.4. El replanteo de las señales se realizó con cinta métrica y las plantillas fueron fijadas al piso con puntillones de 4 pulgadas.

Figura 4.4. Señal de preseñalizado. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Determinación de las coordenadas de los puntos de control

La determinación de los puntos de control se realizó a través de la combinación de los métodos GNSS y topografía convencional.

4.1.3. GNSS

Para la georreferenciación al sistema Magna Sirgas se utilizó el método estático diferencial con post-proceso, usando como bases de apoyo las estaciones permanentes de rastreo BOGA y BOGT los cuales son puntos materializados, ocupados con equipos GPS cuyo rastreo es permanente y su administración y control están a cargo de IGAC. A partir de estos puntos se determinaron las coordenadas de los puntos de apoyo materializados en la finca y nomenclados como gps1 y gps2, cumpliendo con lo dispuesto por IGAC en cuanto a los tiempos de rastreo. Los cálculos fueron realizados con el *software Topcon tools* v.8.2.3. Demo. La Tabla 4.2 muestra el resumen de coordenadas obtenido del post-proceso para los puntos de apoyo gps1 y gps1 desde las estaciones permanentes de rastreo.

Tabla 4.2. Resumen de coordenadas puntos de apoyo

Coordenadas magna Bogotá zone 1995.4_Bogota						
PUNTO	**ESTE**	**NORTE**	**ALT. ELIP**	**ONDULACIÓN**	**ALT.ORTOM**	**DISTANCIA**
gps1	1012552,391	1028826,274	2606,300	25,96	2.632	
gps2	1012353,618	1028791,289	2634,145	25,96	2.660	202

4.2. TOPOGRAFIA

La determinación de las coordenadas de los puntos preseñalizados se realizó mediante levantamiento topográfico, desarrollando una poligonal que utilizó como línea base los puntos de apoyo gps1 y gps2, ubicando estratégicamente los puntos materializados gp3, gp4 y gp5, como se observa en la Figura 4.5.

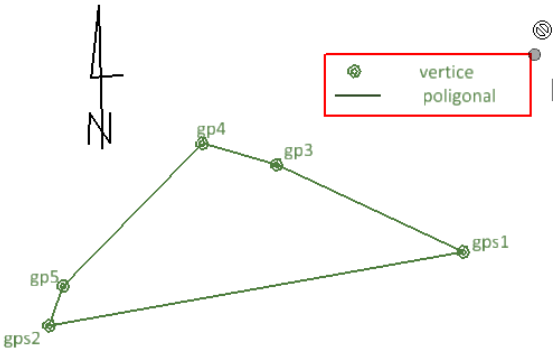


Figura 4.5. Poligonal topográfica. Fuente: Elaboración propia

La poligonal se realizó con la estacion total Topcon gts 211 debidamente calibrada y la informacion procesada con los software topcon link v.8.2.3. Demo y Sokkia I/O utlitily Demo. El cierre horizontal de la poligonal fue superior a 1:10000, como se puede ver en la Tabla 4.3, en donde la presición esta definida por la Ecuación (3.15).

Tabla 4.3. Precisión del levantamiento

Error cometido (m)	**Longitud poligonal(m)**	**Precisión**
0,04212	453	10762

4.2.1. Determinación de la elevación de los preseñalizados

La determinación de la elevación de los puntos preseñalizados se realizó con la estación total, obteniendo un cierre de 0.022 m. Para garantizar la precisión vertical la discrepancia con respeto a la cota obtenida por nivelación trigonométrica es medida a partir de la nivelación de precisión para siete de los 25 puntos preseñalizados de forma aleatoria. En la Tabla 4.4 se puede observar que las diferencias entre los valores de las elevaciones obtenidos por ambos es métodos está en el orden de las decenas de milímetros.

Tabla 4.4. Medición de la discrepancia entre el método trigonométrico y geométrico

Punto estereoscópico	Cota trigonométrica inferior	Cota geométrica	Diferencia (m)
		Inferior	
P8	2641,145	2.641.142	-0,003
P17	2638,182	2638,155	-0,027
P19	2637,087	2637,087	0
P20	2636,685	2636,685	0
P21	2636,119	2636,111	-0,008
P7	2635,905	2635,901	-0,004
P6	2632,283	2632,259	-0,024
P5	2632,09	2632,07	-0,02
P4	2632,119	2632,11	-0,009
P3	2632,422	2632,399	-0,023
P2	2632,838	2632,829	-0,009
P1	2635,074	2635,071	-0,003

Estos resultados permitieron tomar los valores de las elevaciones arrojados por la nivelación trigonométrica calculados con los datos tomados de la estación total. Por otra parte, con el GSD igual a tres, que se utilizó para la toma de imágenes, esta discrepancia es absorbida por la escala del mapa, pues al realizar una extrapolación del nivel de tolerancia (Tabla 3.8) de la captura de elementos, se concluye que el mapa producido con estas imágenes sería un producto a escala mayor a 1: 500, y en consecuencia el nivel de tolerancia sería de 6.25 cm. la extrapolación se realiza en virtud a que el IGAC no tiene especificaciones para cartografía mayor a 1:1000

En el Anexo A se presenta el resumen de coordenadas del levantamiento realizado.

En una segunda etapa de campo se levantaron, con la misma metodología descrita, 40 puntos de chequeo para realizar la verificación de la exactitud posicional del producto final. En Anexo B se muestra el resumen de coordenadas.

4.3. ESQUEMA DE MODELO FOTOGRAMETRICO

El proceso de generación de productos aerotriangulados con imágenes de sensores sobre plataformas RPAS, y con software especializado como el Agisoft, es similar con respecto a los métodos de fotogrametría análoga, y digital, tiene una variación en el post-proceso de las imágenes y de la generación del bloque aerotriangulado. La Figura 4.6 presenta el esquema utilizado en el trabajo, aunque generalmente los productos generados con software para procesamiento de imágenes con dron procesan y generan productos de manera automática, como son la nube de puntos y los modelos digitales de superficie. La aerotringulación con visión estereoscópica 3D se chequea de manera tradicional para ser contrastados con los resultados de los modelos digitales obtenidos.

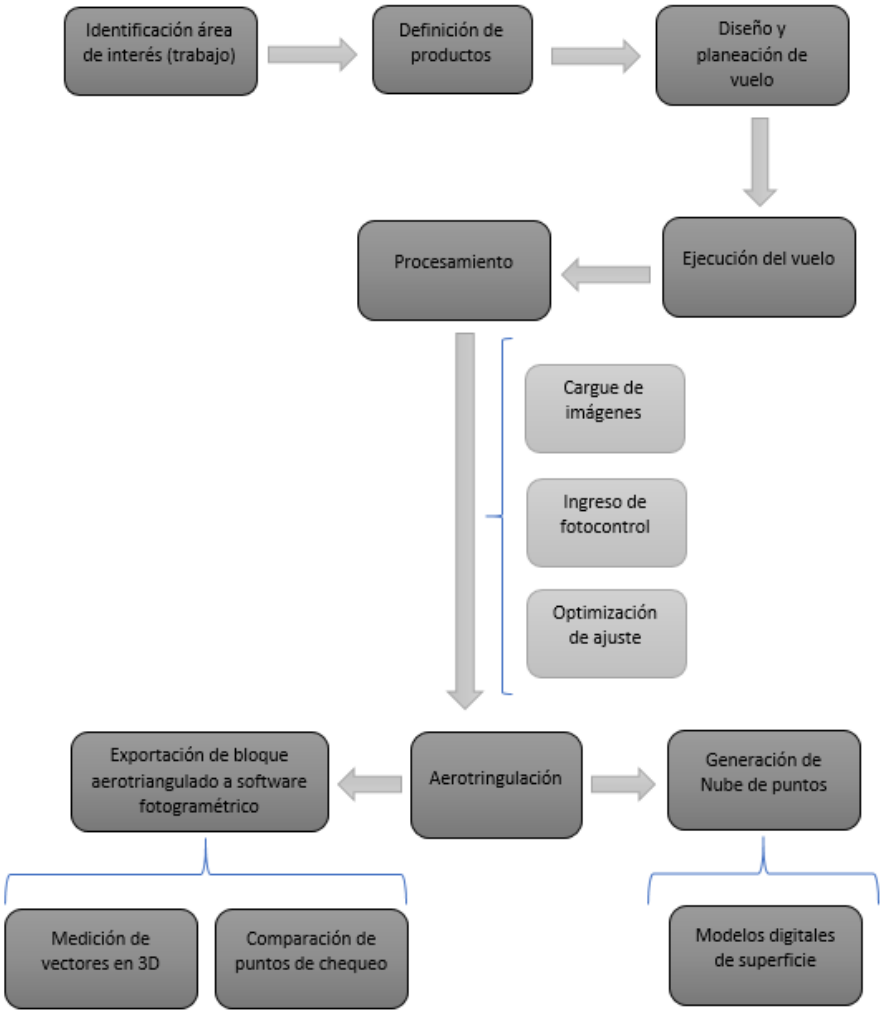


Figura 4.6. Esquema de modelo fotogramétrico. Fuente: Elaboración propia

4.3.1. Área de trabajo

La Figura 4.7 presenta la localización geográfica del municipio de Sopó, el cual se ubica en el departamento de Cundinamarca, se encuentra a 39 km de Bogotá (Colombia), limitando con el municipio de Tocancipá al Norte, con el municipio de Guasca por el Este, con el municipio de La Calera por el Sur y con los municipios de Cajicá y Chía por el Oeste. El municipio cuenta con 14 veredas, La cabecera municipal se ubica a 2650 msnm y la temperatura promedio del municipio es de 14 °C. La base de la economía del municipio está conformada principalmente por la agroindustria dedicada a la producción de derivados de lácteos floricultura, además de otras gamas industrias dedicadas a la producción de bienes para el sector de la construcción y fabricación de fósforos (Alcaldía de Sopó, 2018).

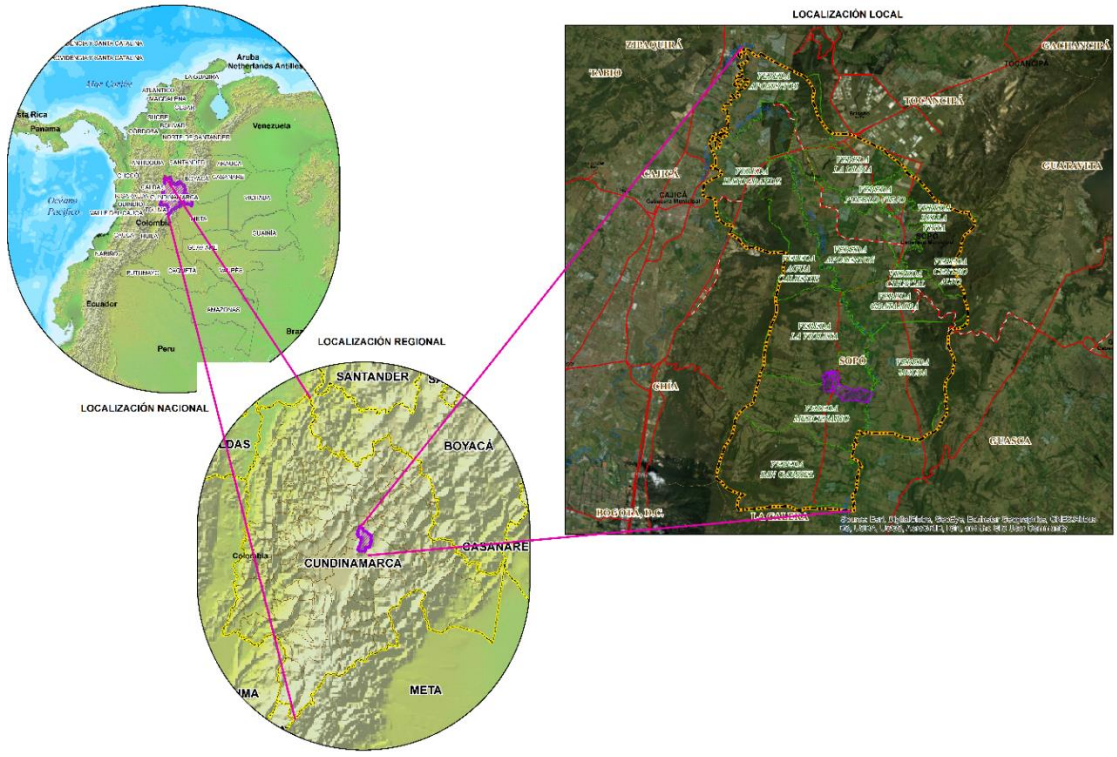


Figura 4.7. Localización del Municipio de Sopó. Fuente: Elaboración propia

La prueba de captura de la información espacial se realizó en la Hacienda Buenavista, la Figura 4.8 muestra la ubicación del predio, la cual se encuentra en la vereda Mercenario de la zona rural del Municipio de Sopó, Cundinamarca, la captura de la información se realizó en un área de 2.3 ha dentro de la hacienda. Se opta por realizar el estudio en esta zona

debido a la facilidad de acceso otorgada por los propietarios para realizar las actividades de preseñalización para puntos de control y de chequeo, como para la toma de imágenes aéreas mediante plataforma aérea *RPA*.

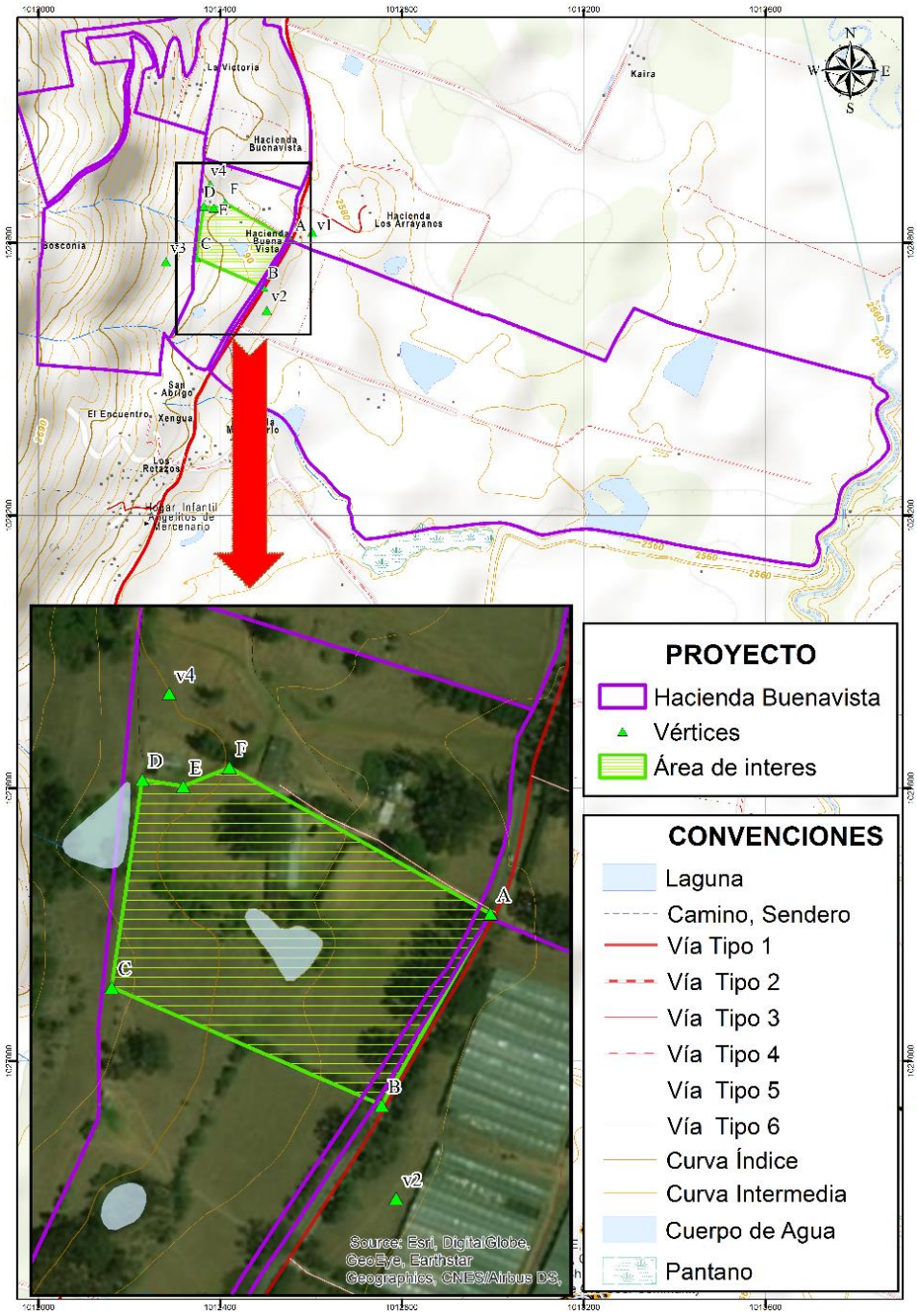


Figura 4.8. Localización área de interés en la Hacienda Buenavista, Municipio de Sopó

El predio presenta una cobertura de pastos con predominio para ganadería, con presencia de individuos arbóreos de considerable altura ubicados en la delimitación del predio y en zonas de protección de corrientes de agua como se puede observar en la Figura 4.9.

Figura 4.9. Vista panorámica del área de interés del predio Hacienda La María, Municipio de Sopó. Fuente: Elaboración propia

El predio se encuentra en la zona de transición de zona plana a la falda de la montaña, presentando en el área de interés pendientes de terreno entre los rangos de 12 – 25% y el rango 25 – 50 % como rangos predominantes distribuidos como se ve en la Figura 4.10.

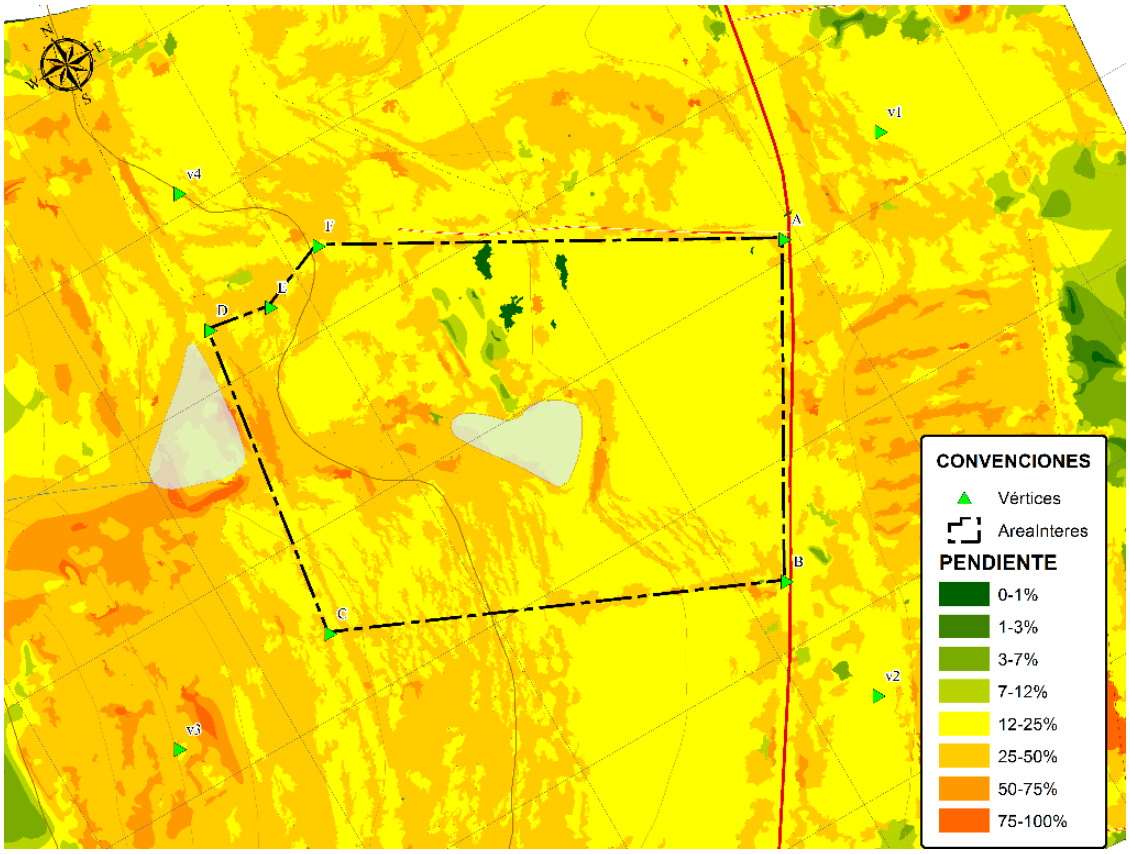


Figura 4.10. Mapa de pendientes. Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Equipo RPA Phantom 4 pro Obsidian

Figura 4.11 se presenta el modelo especifico que se utilizó para la captura de la información, es un Phantom 4 pro es un dron de tipo multirotor con cuatro rotores, a su peso la circular reglamentaria 002 de la aeronáutica Civil lo clasifica en aeronaves pequeñas (peso igual o inferior a 25Kg). El Phantom 4 pro está equipado con una cámara que puede grabar en 4k a un máximo de 60 fotogramas por segundo, contando con un sensor CMOS *(complementary metal-oxide-semiconductor*) de 20 megapixeles (Manual de usuario v1.2, Phantom 4 PRO/PRO+).

Figura 4.11. Equipo Phantom 4 pro Obsidian y radio control. Tomado de sitio web *DJI* https://www.dji.com/phantom-4-pro consultado el 15 de diciembre de 2018.

El Phantom 4 pro consta de 5 elementos en el sistema de posicionamiento, el IMU, sistema de medición inercial mantiene estable en vuelo al dron; GPS, situado en la parte superior del chasis, obtiene posiciones con una precisión en vertical hasta de 0.5 m y en horizontal de 1.5 m (dependiendo de las condiciones en durante el vuelo) en el sistema GPS y GLONASS, permitiendo enlazar hasta con 24 satélites para mantener estabilidad durante el vuelo.

El módulo de posicionamiento por visión (VPS), compuesto por sensores de visión estéreo y sensores ultrasónicos, tiene un rango de operación de 50 cm a 300 cm, con una precisión de 0.1 metros y el sistema de detección de obstáculos que permite esquivar obstáculos y corregir la ruta indicada, tiene un rango de detección 0,7 a 15 metros. Las características generales del dron Phantom 4 pro se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características RPA Phantom 4 pro

ITEM	OBSERVACIÓN	ITEM	OBSERVACIÓN
Fabricante	DJI	Sensor	CMOS de 1"; pixeles efectivos
Número de serie de la aeronave		Objetivo	FOV (Campo de visión) 84º, 8.8mm (equivalente a formato 35mm
Año de fabricación		Obturador mecánico	8 – 1/2000 s
Peso	1388 g	Obturador electrónico	8 -1/8000 s
Tamaño diagonal	350 mm	Capacidad	5870mAh
Tiempo de vuelo máx	30minutos aproximadamente.	Voltaje	15.2 V
Altitud máxima de vuelo	6000m	Tipo de batería	liPo 4S
Sistema de posicionamiento global	GPS/GLONASS	Energía	89.2 Wh
Velocidad Máxima	50 km/h (modo p)	Potencia de carga	100W

4.3.3. Captura y procesamiento de las imágenes aéreas

4.3.3.1. Diseño y planeación de vuelo

El diseño y la planeación de vuelo con dron es la etapa donde se determina la ruta que va a tomar el equipo para la adquisición de las imágenes aéreas que tengan una escala y un GSD promedio, que cumpla con las características técnicas para realizar un levantamiento fotogramétrico. Inicialmente se realiza una fase preliminar en la que se identifica el de área de interés, dadas las características de las imágenes capturadas por el sensor no métrico y el área útil de las mismas, se aumentó el área de captura de fotografías con el fin de adquirir imágenes fuera esta área, que permitan asegurar que los extremos del polígono a fotografiar queden cubiertas por el área útil de pares de imágenes estereoscópicas que

permitan realizar mediciones en 3D sin problemas, por lo cual se agregó aproximadamente 30 metros a lado y lado del polígono de interés, esto permite que al realizar el amarre(ubicación del punto interés en diferentes imágenes) de los puntos de fotocontrol se observen en un número mayor de imágenes y así el bloque aerotriangulado no vaya a perder precisión en las zonas de los limites.

La elaboración del diseño de vuelo, se realizó sobre la plataforma UGCS gracias a una interfaz sencilla que facilita la planeación de misiones, que cuenta con herramientas para levantamientos lineales (técnicas fotogramétricas aplicadas para proyectos lineales, como líneas de transmisión eléctricas, vías, ductos) y de superficies mediante técnicas de fotogrametría, que permite diseñar vuelos con un GSD (*Ground sample distance*) promedio si se presenta variaciones fuertes de pendiente que puedan afectar la escala de las imágenes. Además, es compatible para un gran número de plataformas UAV's (unmanned aerial vehicle), como mavic pro, Matrice 600, m210, Matice 100, serie pahntom DJI, Yuneec, Pixhawk, Mikrokopter, Microdrones, Parrot, entre otros). La planificación del vuelo fotogramétrico en el software UgCS se puede dividir en las siguientes fases:

Definición del área a sobre volar

El área de interés (identificado con la línea de color rojo, Figura 4.12) se definió previamente sobre el software de sistemas de información geográfica ArcGis, identificando los vértices del polígono. Como se mencionó antes, se delimitó un área de mayor extensión, delimitado con el color amarillo como se puede observar en las figuras 4.12 y 4.13 con el fin de obtener un mejor recubrimiento y amarre en mayor número de imágenes para los puntos de control distribuidos dentro de la zona objeto de análisis.

Figura 4.12. Área de interés Sopó. Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13. Área para el diseño de vuelo Sopó. Fuente: Elaboración propia

Los vértices que delimitan el área de interés se pueden evidenciar en las figuras 4.12 y 4.13, las coordenadas planas en magna origen Bogotá se describen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Coordenadas del área de interés

Nombre	**Coordenadas Magna Origen Bogotá**	
	Este	**Norte**
A	1012554,74	1028807,32
B	1012495,12	1028702,62
C	1012346,9	1028767,02
D	1012363,62	1028880,64
E	1012386,11	1028876,93
F	1012411,51	1028887,25

Planificación de la misión

Una vez determinada el área a volar, se definen los parámetros que configuran del diseño del vuelo fotogramétrico, como es el GSD, superposiciones laterales y frontales, el ángulo de dirección (definido para el segmento más largo del área de interés) que es la línea de vuelo, velocidad del RPA y actitud de la cámara en 90 grados o ángulo cenital que es totalmente perpendicular al suelo, estos parámetros se observan en la Tabla 3.4.

Por la resolución espacial, las imágenes a obtener cumplirán con especificaciones del IGAC para generación de cartografía mayor a escala 1:1000, como lo estipulan en las especificaciones técnicas 2016, y se observa en la Tabla 3.5. La determinación de la altura de vuelo se obtuvo a partir de las ecuaciones (3.11), (3.12) y con los parámetros establecidos en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.4, obteniendo un valor muy cercano a 110 m de altura sobre el terreno.

Como resultado de los parámetros antes mencionados, en la Figura 4.14, se observa una muestra del diseño de vuelo fotogramétrico empleado en el presente trabajo, solo se muestra un ejemplo con las primeras dos líneas de vuelo debido a su densa distribución.

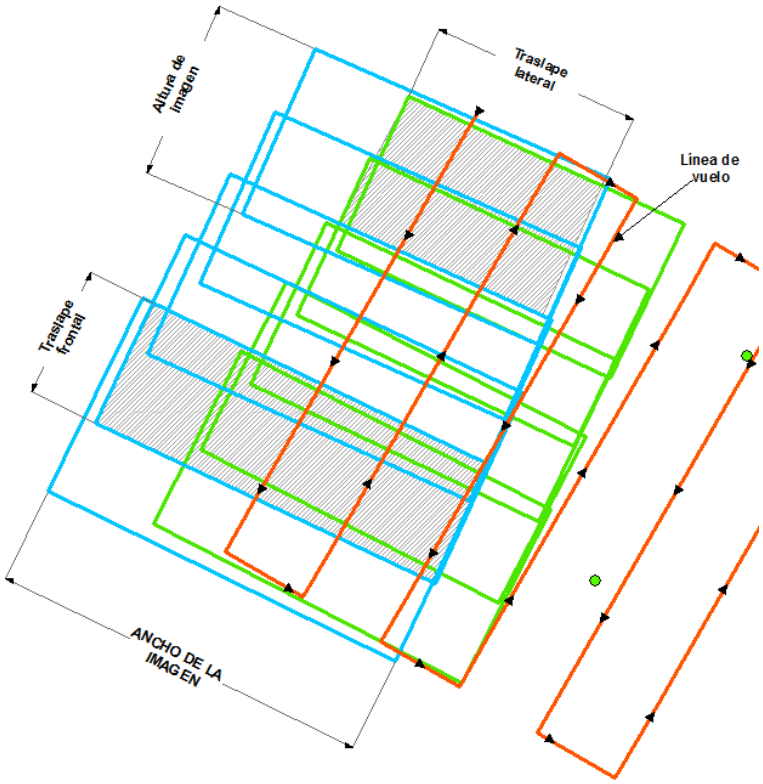


Figura 4.14. Diseño de vuelo fotogramétrico constante. Fuente: Elaboración propia

Para toma de las imágenes, la cámara se configura utilizando el método de hacer disparo de modo automático, donde determina por tiempo calculado para cumplir con los cubrimientos de las imágenes un disparo cada N segundos. Este método no requiere muchos puntos de referencia, pero tiene la limitante de las características de la velocidad real del RPA, que pueden verse alteradas debido a condiciones atmosféricas que puedan alterar la trayectoria y estabilidad del equipo.

El diseñó del vuelo nos arroja como resultado la información presentada en la Tabla 4.7, donde se identifica la cantidad de *waypoints* obtenidos, las líneas de vuelos (pasadas) que se requieren para cubrir el área de interés. El número de disparos y el tiempo por disparo son el número de fotografías y cada cuanto las toma, el tamaño de la huella (el tamaño de la imagen) es obtenida según el GSD indicado anteriormente y la altura de vuelo, esta última se calculó a partir del tipo de altitud AGL.

Tabla 4.7. Resumen del diseño de vuelo

ID	N. ptos Ruta	Pasadas	Disparos	Tiempo x disparo (seg)	Tamaño de huella
1	43	6	97	3	164,04m x 109,44m
	Altura prom vuelo (m)	**Duración**	**Número Waypoints**	**Dist(Km)**	**Area (ha)**
	110	00:07:32	48	2,5	5,85

Otros puntos de definición del diseño de vuelo de fotogrametría son las ubicaciones de despegue y aterrizaje, estos son definidos antes de realizar los vuelos, pero en campo se validan o se redefinen según las características del terreno, la visibilidad del equipo durante la misión, los obstáculos que se puedan presentar en el área de interés como árboles, construcciones, cables de media o alta tensión, las zonas con pendiente alta. Como resultado al proceso anterior, en la Figura 4.15 se puede observar el diseño del vuelo para los parámetros antes mencionados, y en la Figura 4.16, se muestra el perfil topográfico del área de interés y el perfil del sobrevuelo del RPA con altura AGL.

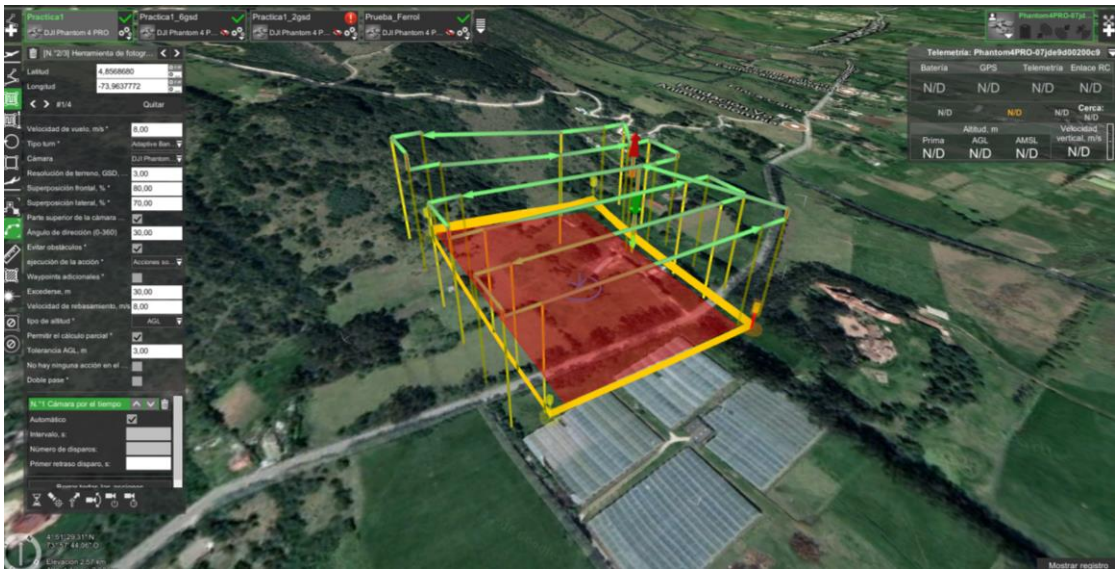


Figura 4.15. Diseño de ruta fotogramétrica, Hacienda Buenavista
Fuente: Elaboración propia

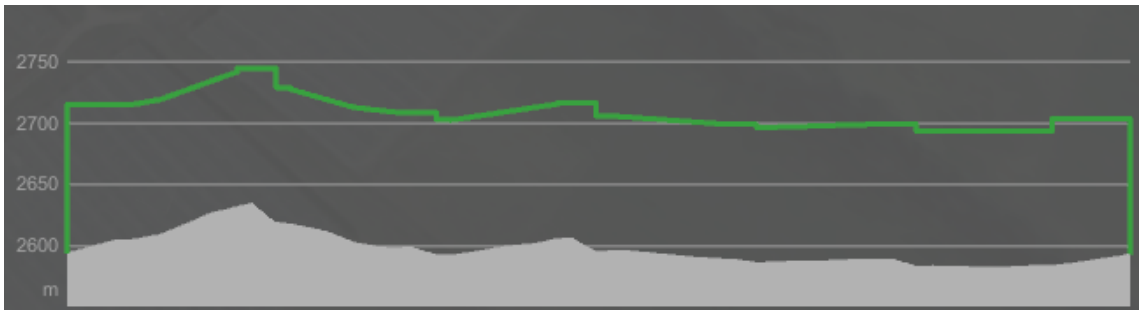


Figura 4.16. Perfil de la ruta fotogramétrica, Hacienda Buenavista.
Fuente: Elaboración propia

Los puntos de ruta son aquellos puntos en el que RPA tendrá que variar su dirección o altura de vuelo. La pasada hace referencia al número de líneas de vuelo que realizará el equipo durante la misión. Los disparos son la cantidad de imágenes que tomará el RPA, las cuales serán tomadas cada 3 segundos. El tamaño de la huella es el área de cubrimiento que abarcará la imagen en el terreno. Esta misión se realizará en 7 minutos, 32 segundos, recorriendo una distancia de 2.5 kilómetros y cubriendo un área de 4.85 hectáreas.

Ejecución del vuelo

La ejecución de vuelo se llevó a cabo el 23 de junio del 2018. Antes de iniciar la ejecución de vuelo, se procedió a la ubicación de las marcas de control, con el fin de ser medidas, y que sean identificables en las imágenes capturadas, distribuidas como se observa en la Figura 4.17. Además, se revisaron diferentes variables climatológicas que puedan afectar el rendimiento del equipo o evitar su despegue, como son el viento, la precipitación, actividades solares (índice de disrupción geomagnética), la temperatura, visibilidad, con el fin de realizar una operación segura.

Figura 4.17. Distribución de control terrestre. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se estableció la comunicación vía *wifi* entre la estación en tierra (*laptop*) y el dispositivo móvil. Ambos equipos cuentan con el software Ugcs (*Laptop*) instalado sobre sistema operativo *Windows 10* y el apk UgCS para el caso del dispositivo *Android*. Este dispositivo móvil se conecta al radio control del RPA y recibe el diseño de vuelo desde la estación en tierra para transmitirla al dron, para poder realizar el vuelo y hacerle seguimiento al RPA durante su ejecución.

Antes del inicio del vuelo se debe realizar los chequeos para evaluar los componentes físicos del equipo y la comunicación del sistema por la aplicación. Adicional se valida las condiciones climáticas que permitan la ejecución optima del plan de vuelo y se realiza la bitácora de vuelo, donde se consigna toda la información previa y se valida su operación (ver anexo Bitácora de vuelo).

4.3.3.2. Procesamiento de la información

En el post-proceso de la información se realizaron varios pasos con el fin de generar los archivos necesarios para la revisión estereoscópica, inicialmente se procesó la información en el software *Agisoft PhotoScan* Professional, versión 1.4 y se realizaron los siguientes pasos:

a) Cargue y alineación de las imágenes capturadas durante el vuelo fotogramétrico: la Figura 4.18, muestra la ubicación relativa de las imágenes obtenida por el proceso de la generación de una nube de puntos dispersa y las ubicaciones inerciales de la cámara. En este proceso el software Agisoft hace uso del algoritmo SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*).

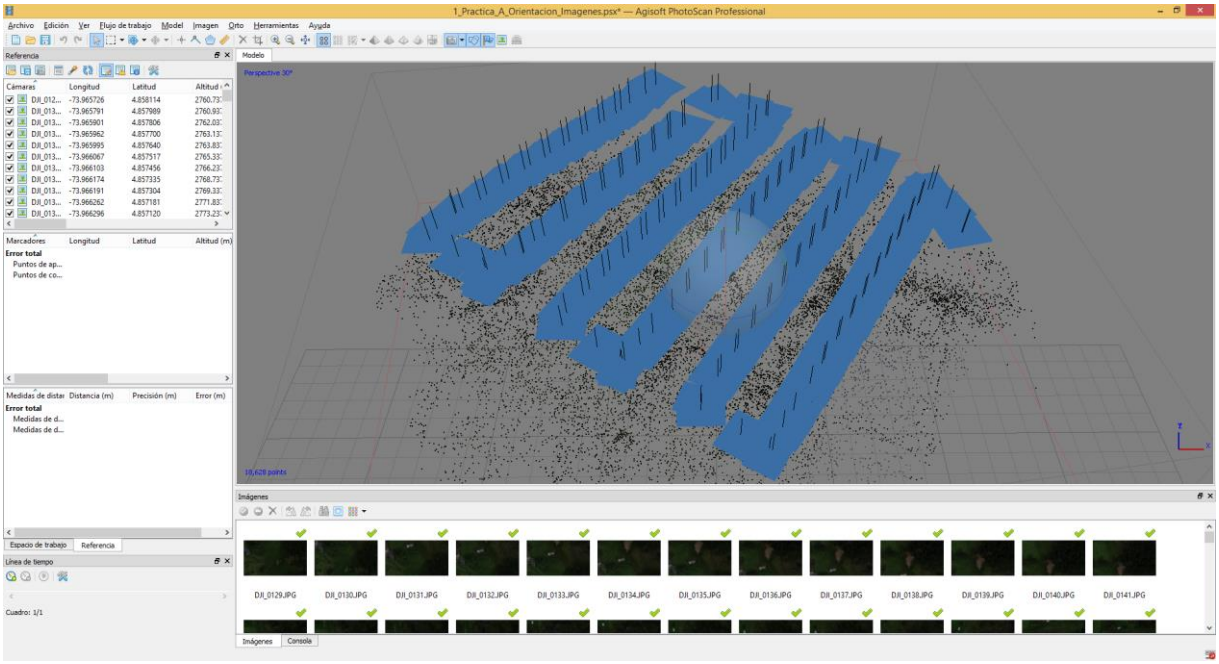


Figura 4.18. Cargue y alineación de las imágenes. Fuente: Elaboración propia

b) Cargue de los puntos de control: para este proceso se importó un archivo de texto con la identificación de los puntos y sus respectivas coordenadas planas este, norte y su cota. Cada punto importado se debe reconocer en las imágenes donde se pueda determinar su posición y marcar con un grado alto de certidumbre, en la Figura 4.19 se ilustra la ubicación de los puntos en el modelo.

Figura 4.19. Cargue y medición del control terrestre. Fuente: Elaboración propia.

c) Optimización del cálculo de las orientaciones: este proceso permite calibrar la alineación de las cámaras basadas con las coordenadas de control, se ajusta el bloque de las fotografías como una orientación externa en la aerotringulación fotogramétrica digital. En la Figura 4.20 se muestra el resultado de este proceso, en donde las cámaras o imágenes se ajustan a coordenadas más reales gracias a las coordenadas del fotocontrol.

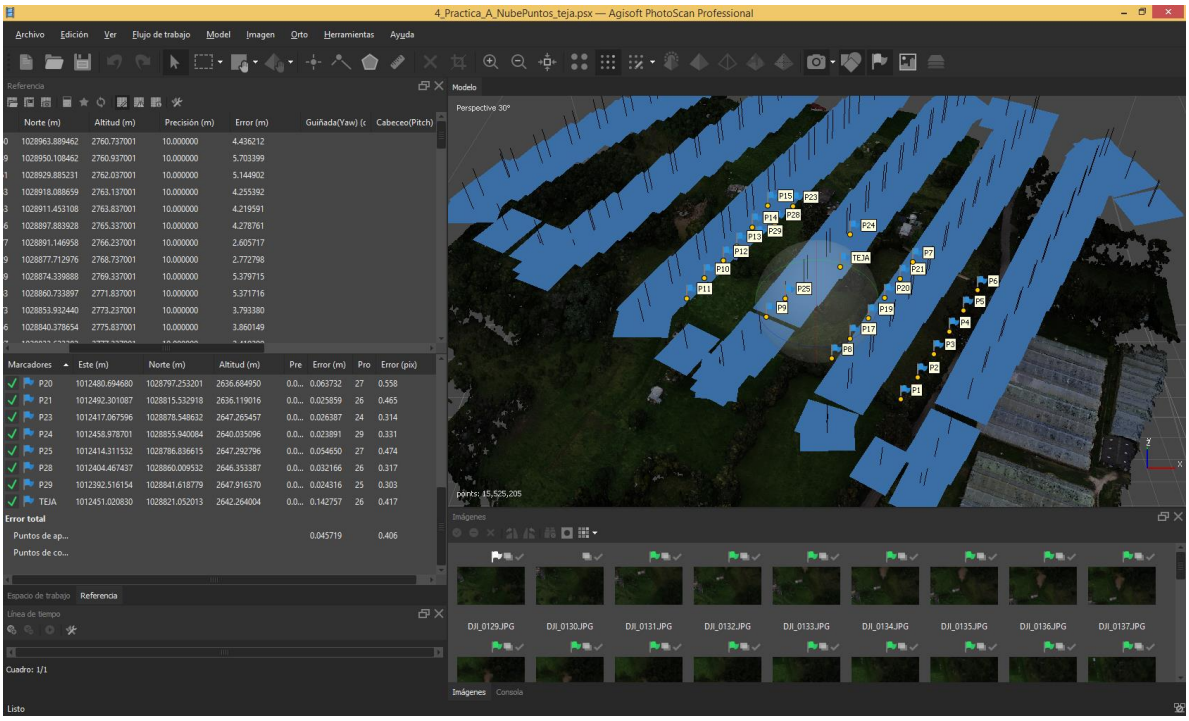


Figura 4.20. Optimización del ajuste. Fuente: Elaboración propia.

d) Generación del informe del procesamiento: donde se consignan los parámetros básicos del proyecto, los resultados de procesamiento y las evaluaciones de precisión (ver anexo Bitácora de informes de procesamiento).
e) Exportar cámaras en formato inpho (prj): este archivo exporta los datos de la calibración de la cámara y los datos de orientaciones de las imágenes.
f) Generación de los modelos digitales de superficie a partir de la construcción de la nube densa de puntos.

Bloques de aerotriangulación

Como insumo en el proceso cartográfico para la captura de vectores en 3D se requiere la generación del bloque aerotriangulado, este bloque se obtiene a partir de los insumos base como son las imágenes aéreas y puntos de fotocontrol y generar el modelo aerotriangulado que debe cumplir con las especificaciones técnicas exigidos por el IGAC según escala y a exactitud posicional que permitan garantizar la generación de productos geoespaciales de calidad.

El software Agisoft permite generar archivos que son compatibles con diferentes software fotogramétricos como lo es el archivo con extensión (prj) del software *inpho*. Como se mencionó anteriormente, este archivo contiene los datos de la calibración de la cámara y de las orientaciones de las imágenes, además del ajuste del bloque fotogramétrico. Para la validación de los diferentes bloques fotogramétricos se realiza la revisión en el módulo *Photogrammetry* del software *ERDAS IMAGINE*, debido a que este software permite importar el archivo *prj* desde su módulo *Manage Data*, y permite convertirlo en un formato que pueda leer (archivo *blk)*, como se muestra en la Figura 4.21.

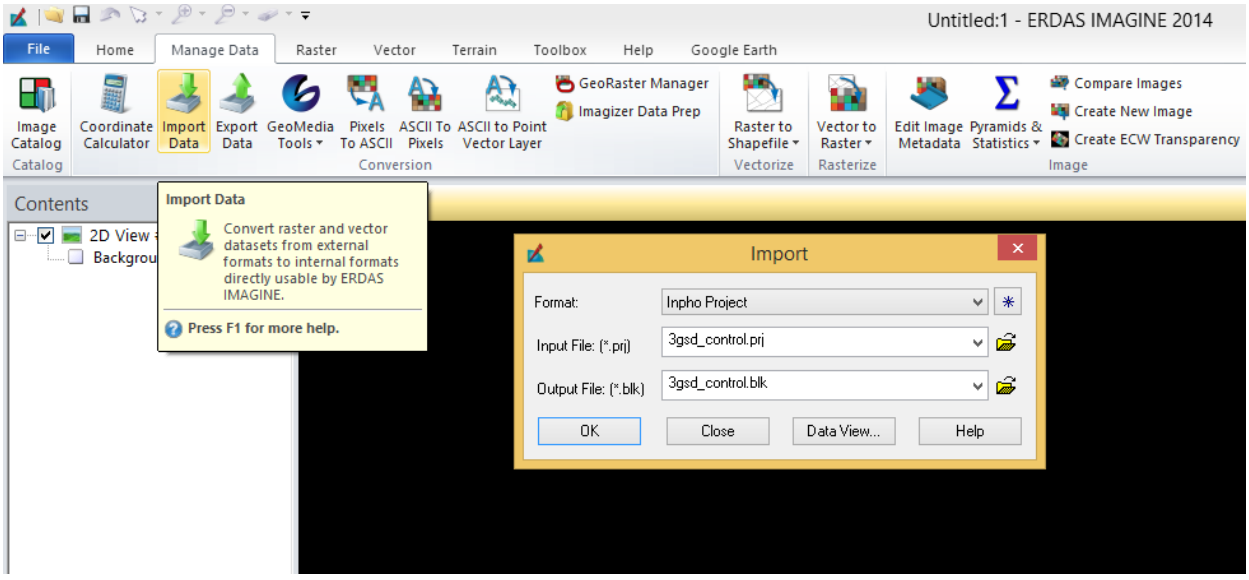


Figura 4.21. Generación del archivo blk, para ERDAS IMAGINE (versión 2014)
Fuente: Elaboración propia

4.4. VALIDACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL

4.4.1. Verificación de la exactitud posicional de la aerotriangulación

El IGAC en sus especificaciones (Instituto Geografico Agustin Codazzi, 2016) establece las tolerancias permitidas para el proceso de aerotriangulación para pares estereoscópicos según la escala, como se puede observar en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Exactitud posicional de aerotriangulación por escalas

Escala	GSD (valor máximo)	RMSr	Exactitud horizontal confianza 95%	RMSz	Exactitud vertical confianza 95%
1:250	2.5 cm	0,0375 m	0,0925	0,0375 m	0,075
1:500	5 cm	0,075 m	0,185	0,075 m	0,15
1:1000	10 cm	0,15 m	0,37	0,15 m	0,3
1:2000	20 cm	0,30 m	0,74	0,30 m	0,59
1:5000	30 cm	0,75 m	1,84	0,75 m	1,47
1:10000	50 cm	1,50 m	3,67	1,50 m	2,94
1:25000	1 metro	3,75 m	9,18	3,75 m	7,35

Esta verificación se realiza montando el bloque aerotriangulado en una estación fotogramétrica, en la cual un operador a través de visión estereoscópica realiza la lectura de todos los puntos de control terrestre empleados en el ajuste del bloque. Con estas lecturas se obtienen las coordenadas de los puntos de control terrestre producto de la aerotriangulación, las cuales serán comparadas con las coordenadas de los puntos de control terrestre obtenidas por el levantamiento en campo. Finalmente, mediante el uso de un estadígrafo se realizará la estadística para establecer las discrepancias entre las coordenadas.

4.4.2. Verificación de la exactitud posicional absoluta.

De igual manera en la Tabla 4.9 el IGAC establece las tolerancias permitidas para la precisión absoluta al 95% de confianza.

Tabla 4.9. Exactitud posicional absoluta por escalas

Escala	Horizontal (m)	Vertical (m)	Exactitud vertical 95% confianza	Exactitud Horizontal 95% confianza
	RMSEr	RMSz		
1:250	0.075m	0.075m	0.1475 m	0.1825 m
1:500	0,15m	0,15m	0,295	0.365m
1:1000	0,30m	0,30m	0,59m	0,73m
1:2000	0,60m	0,60m	1,18m	1,47m
1:5000	1,50m	1,50m	2,94m	3,67m
1:10000	3,00m	3,00m	5,88m	7,34m
1:25000	7,50m	7,50m	14,7m	18,36m

Esta verificación se realiza montando el bloque aerotriangulado en una estación fotogramétrica, en la cual un operador a través de visión estereoscópica realiza la lectura de todos los puntos de chequeo. Con estas lecturas se obtienen las coordenadas de los puntos de chequeo producto de la aerotriangulación, las cuales serán comparadas con las coordenadas de los puntos de chequeo obtenidas por el levantamiento en campo. En las tablas anteriores los valores de las filas en color amarillo y verde son valores extrapolados, ya que el IGAC solo realiza cartografía hasta escala 1:1000

4.4.3. Estadígrafo utilizado

El estadígrafo mostrado en la Tabla 4.10 contiene la formulación para la verificación de exactitud posicional de los productos, aerotriangulación y captura de elementos, según (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014).

Tabla 4.10. Estadígrafo para medir los RMS de las discrepancias

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 5000 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
ID	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	ID	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z.)
1			100.000	200.000	100.1	200.1	-0.100	-0.100	0.141	1	100.000	99.9	0.100
24			500	500	500.1	500.1	-0.100	-0.100	0.141	24	200	200.1	0.100

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	2	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	2	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0.141	m		MEDIA: $\bar{z}$	0.100	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0.141	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0.1	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0.040	m		DESV. ESTÁNDAR **(σz)**	0.028	m
EMC MAX_PERMITIDO_x		m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z		m
PRECISIÓN AL 95% **Px(95%)**	0.346	m		PRECISIÓN AL 95% **Pz(95%)**	0.196	m
VAP_x(**95%)**	0.185	m		VAPz (**95%)**	0.15	m

La columna **dif_E** $(x - x_0)$ muestra la diferencia entre las coordenadas E*ste* de terreno, del punto de control o de chequeo y las coordenadas E*ste* correspondientes del punto leído estereoscópicamente en el bloque aerotriangulado.

La columna **dif_N** $(y - y_0)$ muestra la diferencia entre las coordenadas *Norte* de terreno del punto de control o de chequeo y las coordenadas *Norte* correspondientes del punto leído estereoscópicamente en el bloque aerotriangulado.

En la columna **(Xi)** **Error en Posición** muestra el error total en (x,y) y se calcula mediante la fórmula:

$$xi = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tag{26}$$

, donde:

x: Coordenada este del punto de control o de chequeo;

x_0: Coordenada este del punto leído estereoscópicamente;

y: Coordenada norte del punto de control o de chequeo;

y_0: Coordenada norte del punto leído estereoscópicamente.

En la columna **ID** se registra el nombre del punto de control o de chequeo.

En la columna **h_Terreno** se registra la elevación del punto de control o de chequeo.

En la columna **h_modelo** se registra la elevación del punto leído estereoscópicamente.

En la columna **Error en Cota (Zi)** se registra la diferencia entre las columnas **h_Terreno-h_modelo**

En el subcampo **MEDIA (**$\bar{x}$) de los **RESULTADOS: PLANIMETRIA** se registra el promedio aritmético de las **(Xi) Error en Posición** calculado mediante la fórmula:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_{i/n} \tag{27}$$

, donde:

$\bar{x}$: Promedio;

n: numero de puntos.

En el subcampo **ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO (EMC):** de los **RESULTADOS: PLANIMETRIA** se registra **EMC** calculado mediante la fórmula**:**

$$EMCr = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{x_i^2/n}} \tag{28}$$

En el subcampo **ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO (EMC):** de los **RESULTADOS: ALTIIMETRÍA** se registra **EMC** calculado mediante la fórmula**:**

$$EMCz = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} z_i^2 /n} \tag{29}$$

En el subcampo **DESV. ESTÁNDAR** (σ_x) de los **RESULTADOS: PLANIMETRIA** se registra calculado mediante la fórmula**:**

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} |x_i - \bar{x}|^2 / (n-1)} \quad (30)$$

En el subcampo **DESV. ESTÁNDAR** (σ_z) de los **RESULTADOS: ALTIMETRIA** se registra (σ_z) calculado mediante la fórmula**:**

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} |z_i - \bar{z}|^2 / (n-1)} \quad (31)$$

El campo PRECISIÓN al 95%: Px(95%) se calcula mediante la fórmula :

$$Px(95\%) = 2.448 * EMCr \quad (32)$$

El campo PRECISIÓN al 95%: Pz(95%) se calcula mediante la fórmula :

$$P_z(95)\% = 1.96 * EMC_Z \quad (33)$$

Los campos VAP_x_95% y VAP_z_95% son los valores de la Tabla 4.10, verificación de la exactitud posicional de aerotriangulación, respectivamente.

4.5. METODOLOGÍA EXPERMENTAL

La verificación se realiza sobre cuatro escenarios con las características presentadas en la Tabla 4.11. Aquí, los diferentes bloques aerotriangulados presentan variación en el número de GCP y el traslape longitudinal entre imágenes, con el objeto de ver el comportamiento de la exactitud posicional de la triangulación y con los puntos de control y de chequeo.

Tabla 4.11. Resumen de escenarios planteados

Escenario	Traslape imágenes	No GCP
Bloque No1	80%	25
Bloque No2	80%	17
Bloque No3	80%	5
Bloque No4	60%	5

Medición 1. El primero se realiza con el bloque ajustado utilizando los 25 puntos de control presentados en el Anexo A o una distribución como se observa en la Figura 4.22.

Figura 4.22. Bloque con 25 puntos de control. Fuente: Elaboración propia

Medición 2: En el segundo escenario el bloque se ajusta con 17 puntos de control (P10, P11, P13, P14, P23, P29, P4, P9, TEJA, P8, P19, P20, P3, P1, P7, P6, P24) distribuidos como se muestra en la Figura 4.23.

Figura 4.23. Bloque con 17 puntos de control. Fuente: Elaboración propia.

Medición 3. En este arreglo el bloque solo se ajusta con 5 puntos de control (P11, P15, P16, P1, TEJA) como se muestra en la Figura 4.24.

Figura 4.24. Bloque con cinco puntos de control. Fuente: Elaboración propia.

Medición 4. En este arreglo el bloque se ajusta con 5 puntos de control (P11, P15, P16, P1, TEJA), y se cambia el recubrimiento longitudinal a 60%. En las mediciones 1, 2,3 se ajustaron los bloques con 80% y 70% de recubrimiento longitudinal y lateral respectivamente.

4.5.1. **Verificación de la exactitud posicional de la aerotriangulación**

Para realizar la verificación de precisión de la aerotriangulación se monta el bloque ajustado en la estación fotogramétrica y se procede a realizar las lecturas en 3D de los puntos de control utilizados en el ajuste de la aerotriangulación con la rigurosidad que se obtiene de un operador con experiencia en restitución fotogramétrica.

Para la medición 1 se toman las 25 lecturas de la posición (x, y, z) de los puntos de control y se consignan en el estadígrafo. Los valores obtenidos de este ejercicio se observan en la Tabla 4.12. Para la medición 2. Se toman las 17 lecturas de la posición (x, x, y) de los puntos de control y se registran en el estadígrafo. Para la medición 3. Se toman las lecturas de la posición (x, y, z) de los cinco puntos de control. Para la medición 4. Se toman las lecturas de la posición (x, y, z) de los cinco puntos de control. La selección de dichos puntos se observa en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Relación de lectura de los puntos de chequeo por escenario

No. Punto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
P1	X	X	X	X
P10	X	X		
P11	X	X	X	X
P12	X			
P13	X	X		
P14	X	X		
P15	X		X	X
P17	X			
P19	X	X		
P2	X			
P20	X	X		
P21	X			
P23	X	X		
P25	X			
P28	X			
P29	X	X		
P3	X	X		
P4	X	X		
P24	X	X		
P5	X			
P6	X	X	X	X
P7	X	X		
P8	X	X		
P9	X	X		
TEJA	X	X	X	X

4.5.2. Verificación de la exactitud posicional absoluta

Para realizar la verificación de la exactitud posicional sobre los diferentes bloques ajustados en la estación fotogramétrica se procede a realizar las lecturas en 3D de los de veinticinco (25) puntos de chequeo seleccionados para todos los escenarios antes planteados que se pueden observar en la Tabla 4.13, con la rigurosidad que se obtiene de un operador con experiencia en restitución fotogramétrica.

Tabla 4.13. Relación de lectura de los puntos de chequeo por escenario

No. Punto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
14_CH_57	X	X	X	X
45_CH_114	X	X	X	X
20_CH_111	X	X	X	X
17_CH_60	X	X	X	X
19_CH_110	X	X	X	X
46_CH_113	X	X	X	X
34_CH_121	X	X	X	X
25_CH_100	X	X	X	X
44_CH_115	X	X	X	X
24_CH_104	X	X	X	X
22_CH_106	X	X	X	X
41_CH_109	X	X	X	X
2_ESQ_KSA	X	X	X	X
40_CH_108	X	X	X	X
26_CH_101	X	X	X	X
43_CH_116	X	X	X	X
42_CH_117	X	X	X	X
11_PIEDRA	X	X	X	X
27_CH_65	X	X	X	X
37_CH_118	X	X	X	X
1_ESQ_KSA	X	X	X	X
29_ESQ_KSA	X	X	X	X
31_ESQ_KSA	X	X	X	X
33_ESQ_KSA	X	X	X	X
32_ESQ_KSA	X	X	X	X

La distribución de los puntos de chequeo seleccionas para la lectura en visión estereoscópica en los diferentes escenarios se puede observar en la Figura 4.25. Los puntos seleccionados se encuentran a nivel del suelo y otros en la parte superior de las construcciones allí presentes, esto es debido a la escasez de detalles en la zona de pastos, y la dificultad para la foto identificación con un grado alto de certeza.

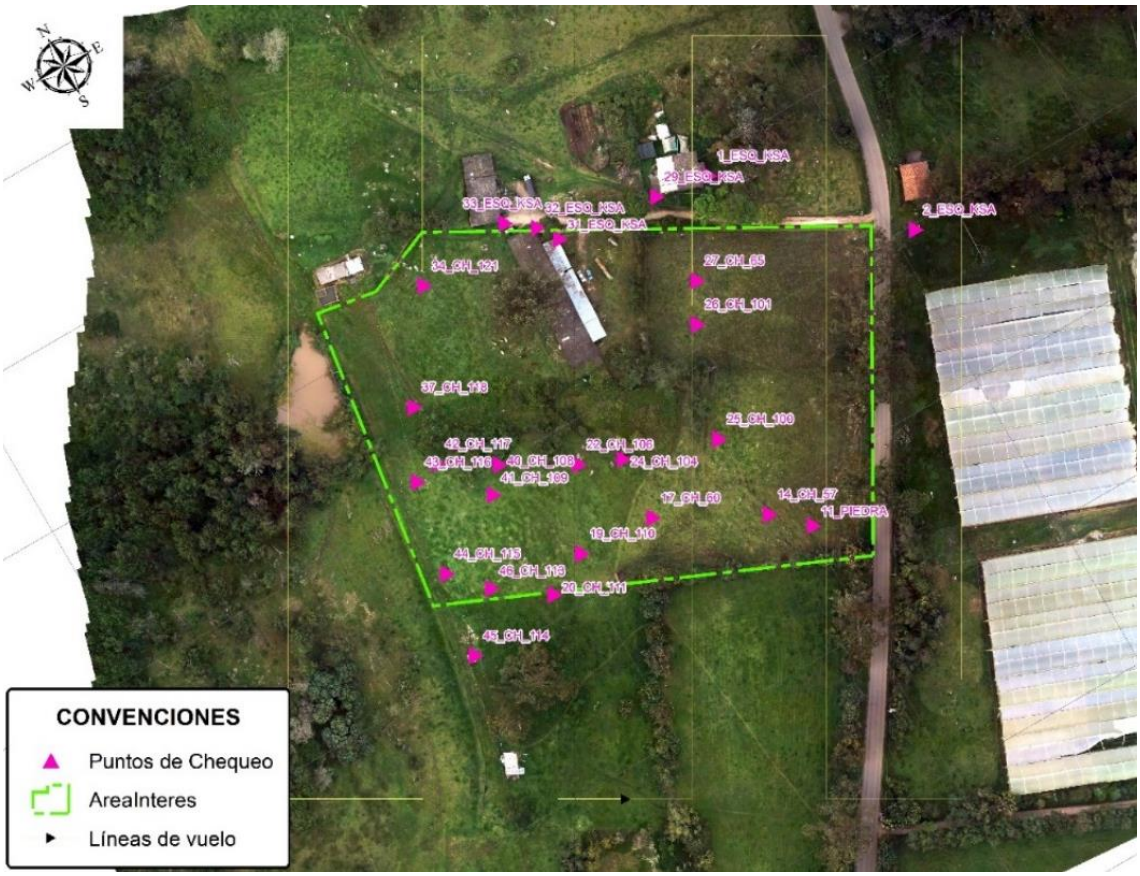


Figura 4.25. Distribución de los puntos de chequeo. Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Verificación de la exactitud posicional absoluta

A partir de la generación de la nube de puntos densa en el software *Ubisoft* se realiza los modelos digitales de superficie para cada uno de los escenarios planteados. Estos modelos son la construcción de la topografía del terreno en formato ráster y no tienen ninguna edición debido a que se generan de forma automática a partir de los parámetros que se

observan en la Figura 4.26. Estos parámetros son constantes para cada uno de los escenarios planteados.

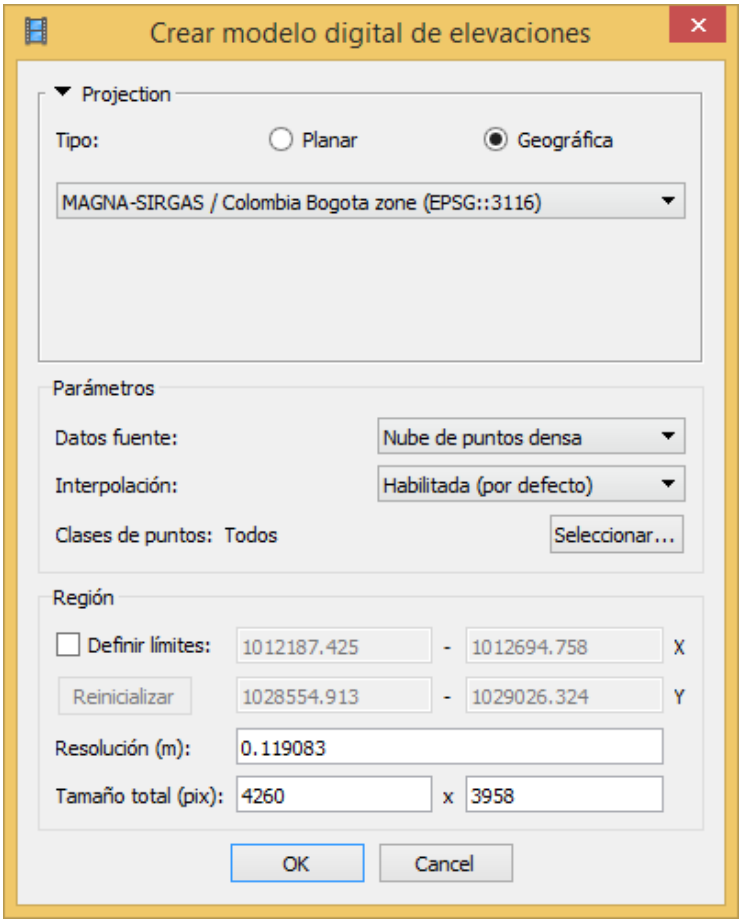


Figura 4.26. Parámetros para la elaboración de MDS. Fuente: tomado de Agisoft.

Con las coordenadas (x, y) de cada punto de chequeo validado en 3D, en los modelos digitales de superficie creados y consignados en formatos ráster, se extrae el atributo del píxel (valores de altura en msnm) en cada uno de los escenarios y contrastados con los valores (z) de los puntos de chequeo obtenidos en campo. En la Figura 4.27 se ilustran los modelos de elevación generados para los diferentes escenarios, georreferenciados en el sistema de coordenadas Magna Colombia origen Bogotá (código EPSG 3116), en donde se extraerá el valor de elevación (z) para cada punto antes mencionado a partir de herramientas de geoprocesamiento en software GIS.

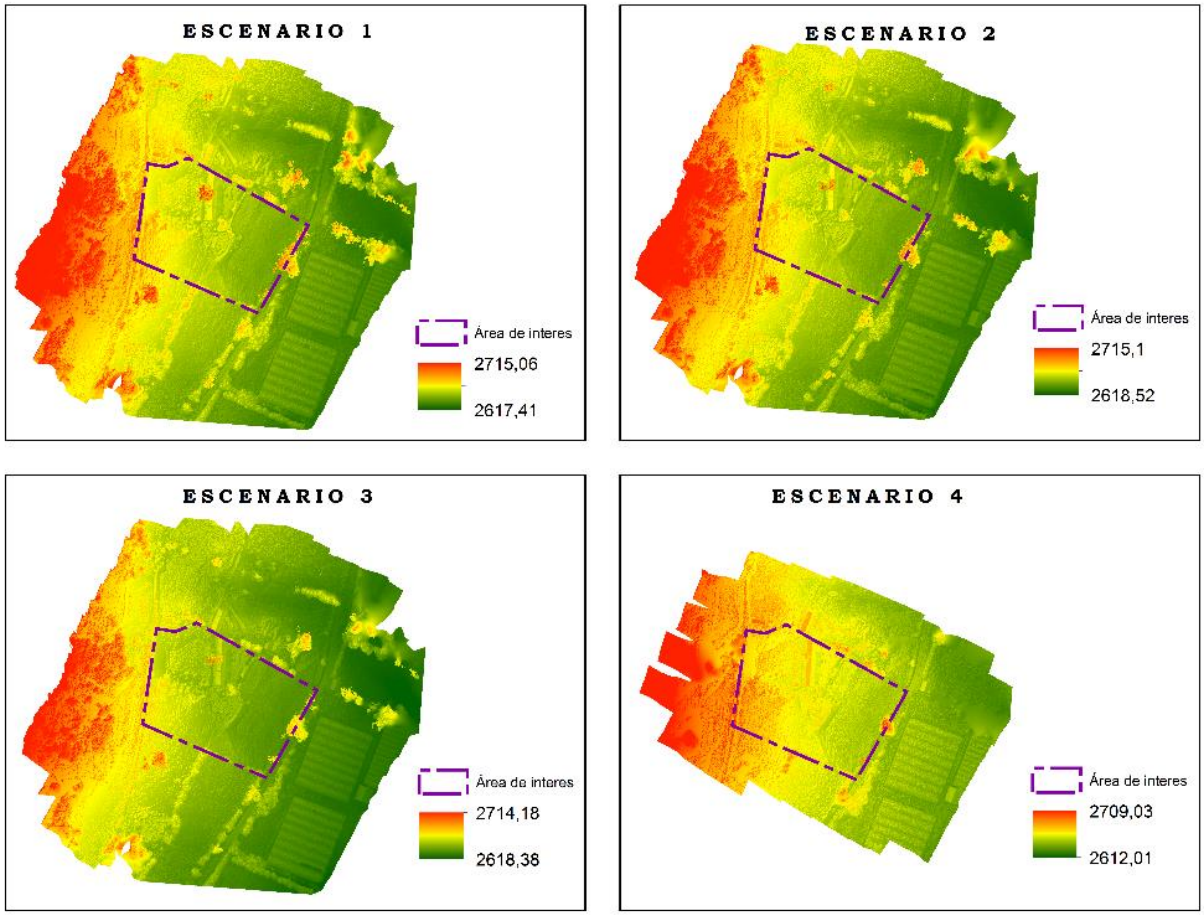


Figura 4.27. Modelos digitales de superficie

5. RESULTADOS

5.1. GENERACIÓN DE BLOQUES DE TRIANGULACIÓN

Se obtuvo cuatro bloques de aerotringulación con los diferentes escenarios bloque1, bloque 2, bloque 3 y bloque 4, como se puede observar en Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Características generales de los bloques aerotriangulados

NOMBRE	DESCRIPCIÓN			
	No. IMÁGENES	TRASLAPE IMÁGENES	GSD (cm)	No GCP
Bloque No1	159	80%	3	25
Bloque No2	159	80%	3	17
Bloque No3	159	80%	3	5
Bloque No4	41	60%	3	5

Para cada uno de estos escenarios se realiza la validación de la exactitud posicional según las especificaciones técnicas del IGAC. En los anexos D, E, F y G, en donde todos los procesos de aerotriangulación de cada escenario fueron generados por el software Agisoft.

5.2. REVISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS

Al montar los bloques aerotriangulados en la estación fotogramétrica y realizar la revisión estereoscópica, no se encontraron saltos en vertical, tanto en el cambio de modelos como tampoco entre cambios de faja. Tampoco se observa paralaje. Tal situación se mantiene de forma invariable para los 4 escenarios, lo que permite que las lecturas extraídas para cada punto de control y de chequeo se realicen de manera confiable en los pares estereoscópicos de los diferentes escenarios.

5.3. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN

Al realizar la verificación de la exactitud posicional de la aerotringulación mediante técnicas de visión estereoscópicas, se encuentran los siguientes resultados:

5.3.1. Variación de la exactitud posicional de la aerotriangulación en (x, y)

Los valores obtenidos en EMCr para los bloques No. 1, 2, 3, se muestran en la Figura 5.1.

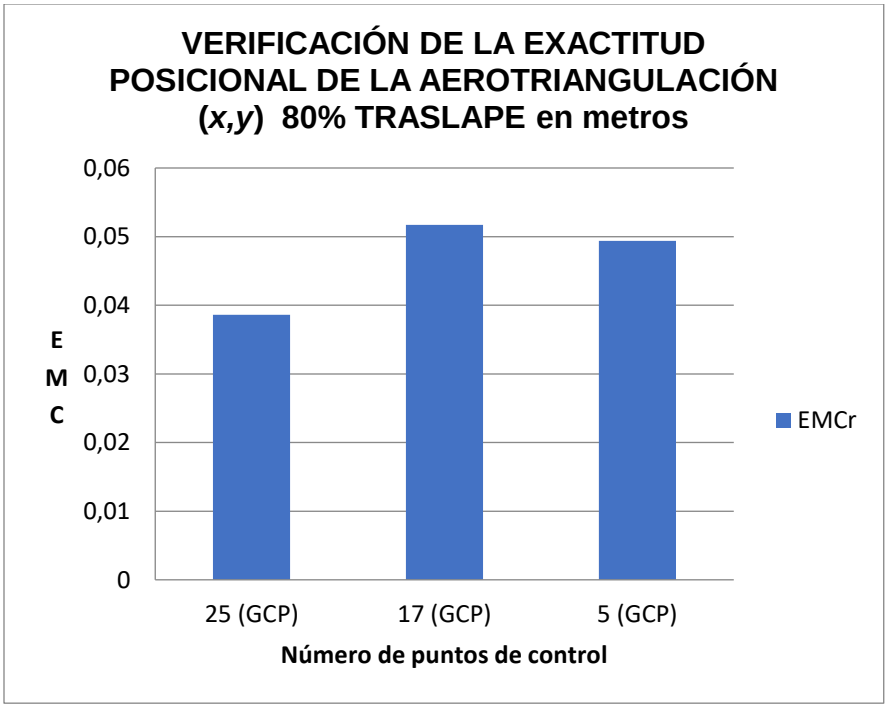


Figura 5.1. Variación EMC (x, y) de la aerotringulación

5.3.2. Variación de la exactitud posicional de la aerotriangulación en (z)

Los valores obtenidos del EMCz para los bloques No. 1, 2, 3 se muestran en la Figura 5.2.

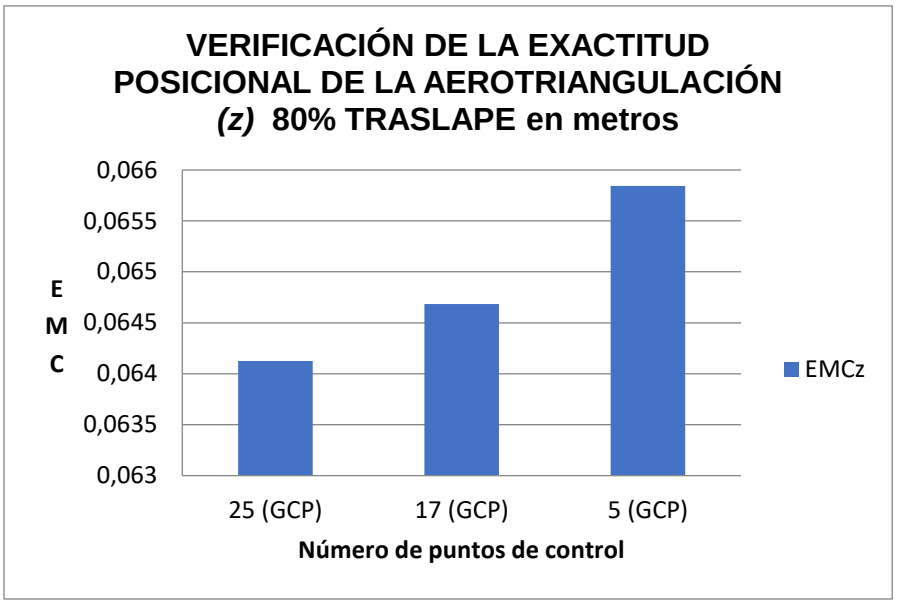


Figura 5.2. Variación EMC en (z) de la aerotringulación

5.3.3. Exactitud posicional de la aerotriangulación para el escenario 4

El bloque 4 se construyó con la finalidad de observar el comportamiento de la exactitud posicional modificando tanto la variable de GCP's como la cantidad de imágenes del bloque con recubrimiento longitudinal hasta el 60% de traslape, para generar un escenario que permita observar el comportamiento de esas variables con estas condiciones. La Figura 5.3, muestra los resultados de la exactitud posicional en (x, y) y (z) de la triangulación para el bloque 4.

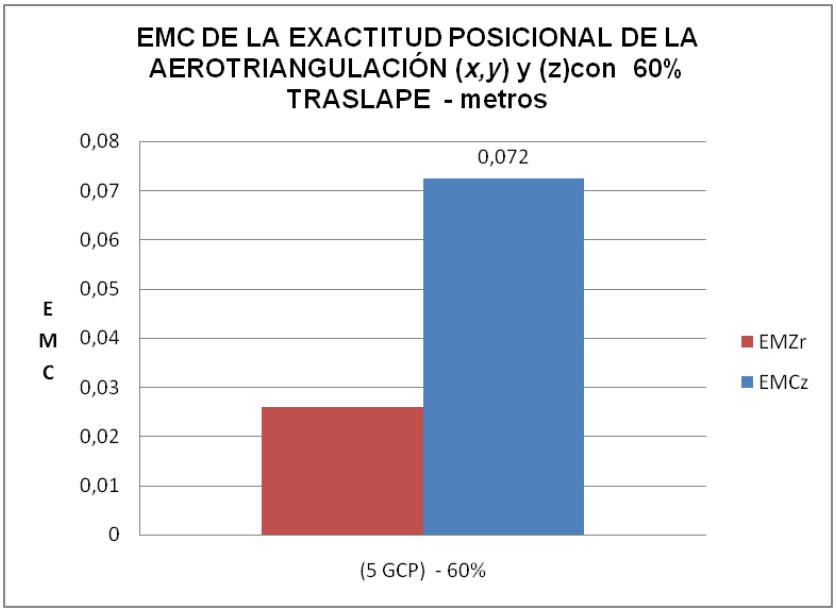


Figura 5.3. variación EMC en (x, y) y (z) de la aerotringulación del bloque 4

5.4. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN

Se realizó la verificación de la exactitud posicional absoluta seleccionando veinticinco puntos de chequeo evaluados en todos los escenarios, en donde se obtuvieron los siguientes resultados.

5.4.1. Variación de la exactitud posicional absoluta en (x, y)

Los valores obtenidos en EMCr para los bloques No. 1, 2, 3 se muestran en la Figura 5.4.

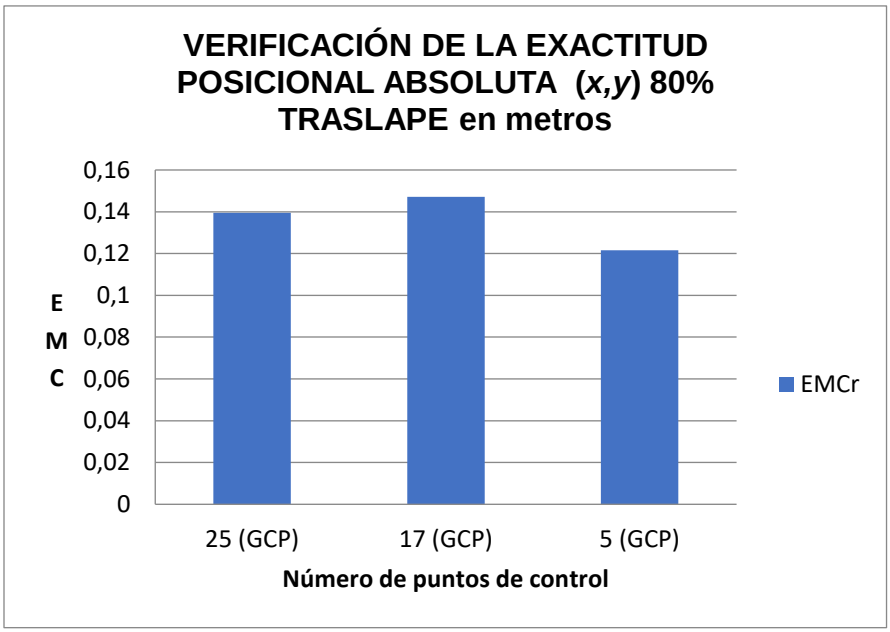


Figura 5.4. Variación EMC en (x, y) de posición absoluta.

5.4.2. Variación de la exactitud posicional absoluta en (z)

Los valores obtenidos en EMCz para los bloques No. 1, 2, 3 se muestran en la Figura 5.5.

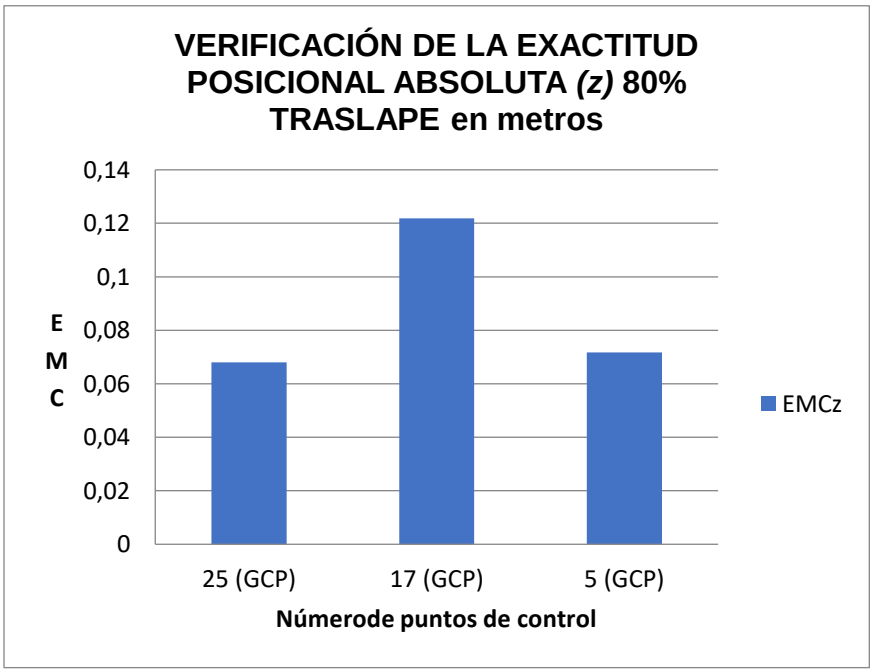


Figura 5.5. Variación EMC en (z) de posición absoluta

5.1.1. Exactitud posicional absoluta para el escenario 4

Una prueba adicional se plantea para verificar la exactitud posicional absoluta de (z), del producto modelo digital de superficie (DSM) generado de forma automática a partir de la construcción de la nube de puntos densa, como uno de los productos más comúnmente generados por los diferentes softwar que procesan imágenes obtenidas con RPA. En la Figura 5.6, se observa los valores del EMCz obtenidos de los diferentes modelos digitales de superficie.

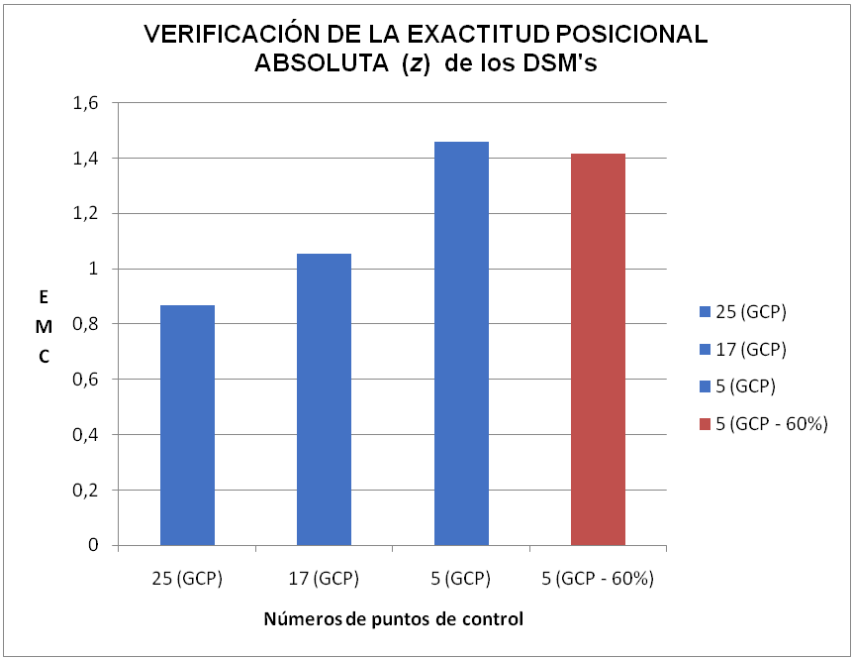


Figura 5.6. Comparación de la variación EMC en (z) de posición absoluta para todos los escenarios.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. GENERACION DE BLOQUES DE AEROTRIANGUALCION

Comparando el proceso de la aerotriangulación convencional con la aerotriangulación de las imágenes obtenidas por la cámara del RPA utilizado, se encuentran ventajas respecto del convencional. El principio de correlación del software Agisoft, que es el mismo de la visión estereoscópica, permite obtener los parámetros de la cámara de forma automática a través de los algoritmos SfM.

Por otro lado, el software determina las posiciones de las imágenes de forma consistente con el plan de vuelo, lo cual permite una visualización preliminar del proyecto. En cuanto a la migración del bloque fotogramétrico obtenido de manera automática, Agisoft resuelve los parámetros de distorsión, los cuales son requeridos en software convencional para ser trabajado con visión estereoscópica.

6.2. REVISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE LOS BLOQUES

La ausencia de zonas de paralaje y de saltos verticales en el bloque 1, en el que se colocaron los 25 puntos de control, deja ver una bondad importante del software y sus algoritmos, pues se esperaba un comportamiento menos favorable. La eficacia del algoritmo queda probada en este test al observar la misma consistencia en los bloques No. 2, 3 en los que se disminuye la densificación del control.

Este hecho nos generó plantear el escenario con el bloque No. 4 donde el recubrimiento longitudinal de las imágenes se disminuyó a 60%, para observar si se mantiene la misma condición favorable frente a los escenarios anteriores. El experimento dio los mismos resultados encontrados en los bloques No. 1, 2 y 3.

6.3. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN

La variación de la exactitud posicional de la aerotringulación en (x, y) y (z) en los tres escenarios, bloque 1, 2 y 3 medida con el EMC muestra una ligera tendencia a mejorar cuanto más control se utilice para el ajuste del bloque, incremento que se encuentra en el orden de las decenas de milímetros, como se observa en la Figura 6.1. De otra parte, las precisiones encontradas cumplen según la Tabla 4.9*Tabla* las especificaciones para generación de cartografía escala 1:500, como se pude observar en las figuras 6.1 y 6.2 la cuales muestran la comparación de los valores EMCr y EMCz con el EMC permitido.

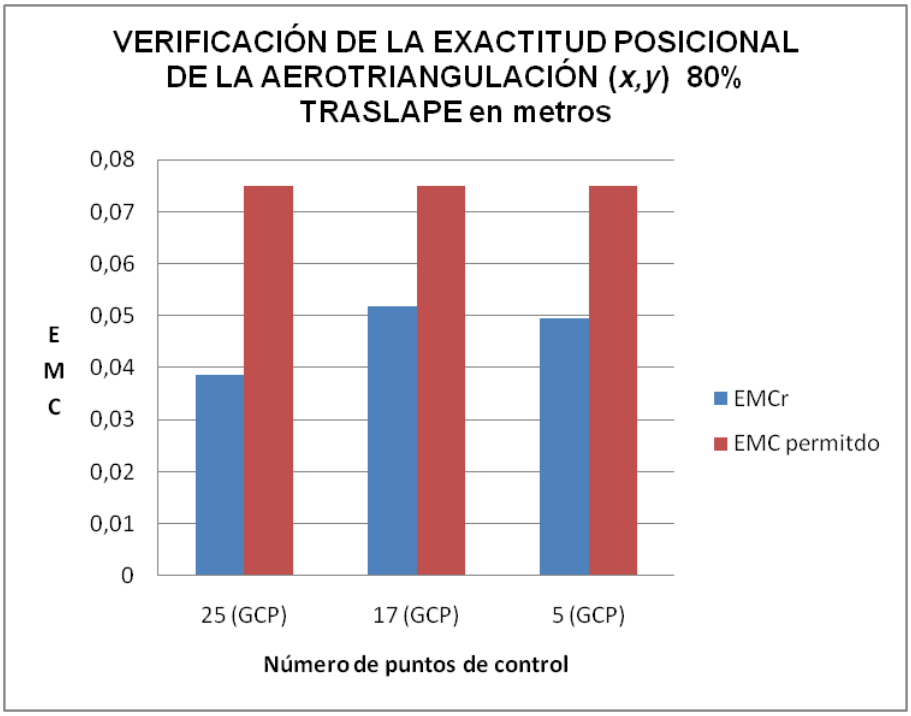


Figura 6.1. Comparación del EMCr con el EMC permitido

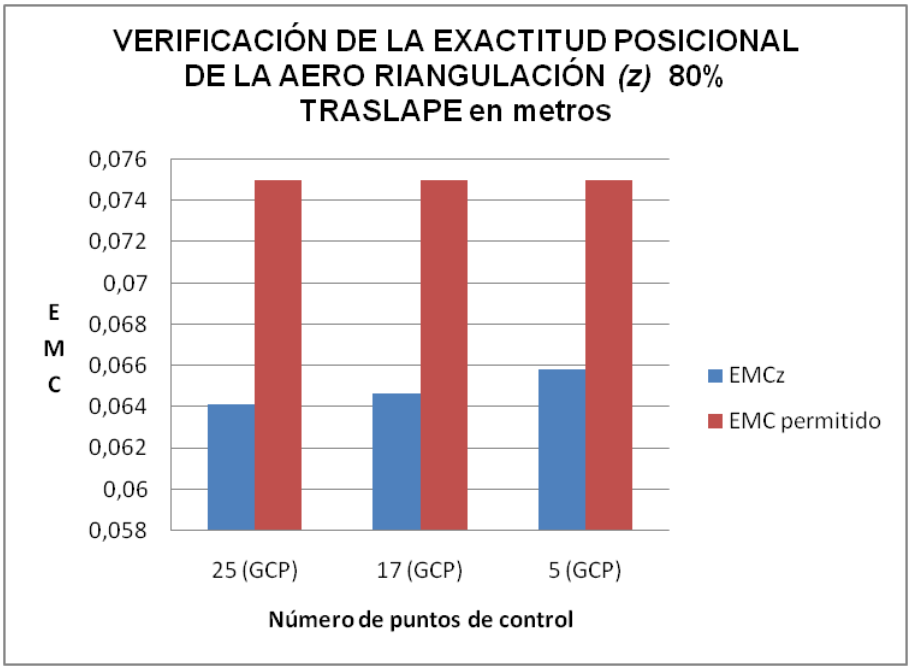


Figura 6.2 Comparación del EMCz con el EMC permitido

6.4. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE LA AEROTRIANGULACIÓN EN EL ESCENARIO CON CINCO GCP Y 60% DE RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL

En la Figura 6.3 se observa que en revisión de la exactitud posicional de la aerotringulación, el EMCr encontrado muestra un menor valor comparado con los escenarios de los bloques 1, 2 y 3. Este resultado muestra que la influencia de las variables modificadas no afecta exactitud posicional de la aerotringulación. La disminución en el valor del EMCr puede atribuirse que las lecturas tomadas para la revisión de los bloques aerotriangulados por parte del operador, se realizó después de los bloques 1, 2 y 3, pudiendo tener influencia el reconocimiento visual previo de los puntos medidos.

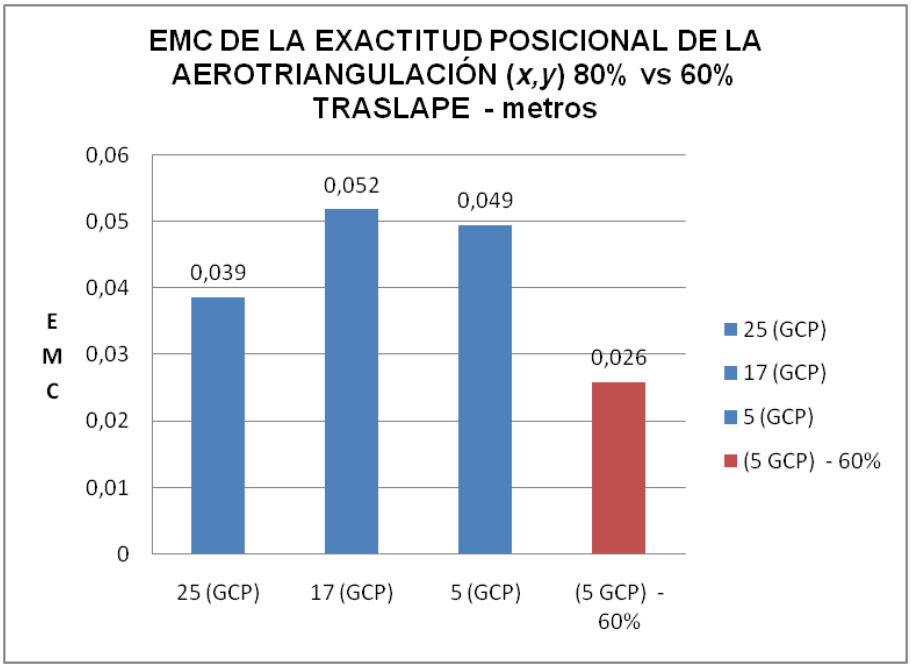


Figura 6.3. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3 y4

Para el EMCz del bloque 4, se encuentra el valor más alto en comparación a los demás bloques como se observa en la Figura 6.4. La variación en la cantidad de imágenes y reducción del traslape del bloque afecta la exactitud posicional de la aerotriangulación en (z), pero el valor de EMCz comparado con el valor permisible es menor, lo que indica que sigue cumpliendo para la escala 1:500.

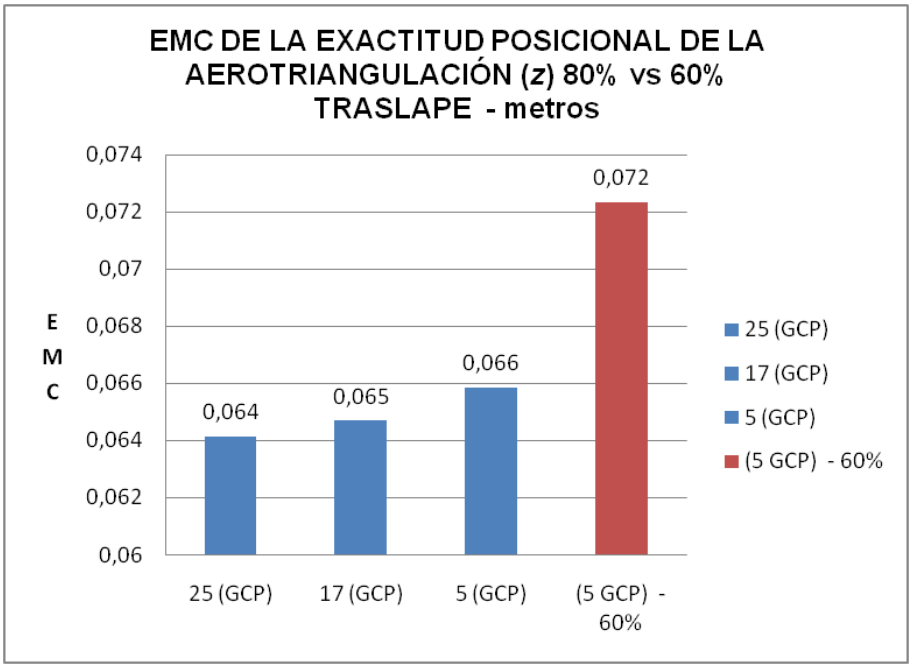


Figura 6.4. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y4

6.5. HALLAR LA VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS USANDO 25 PUNTOS DE CHEQUEO

La variación de la exactitud posicional absoluta en (x, y) y (z) en los tres escenarios, bloque 1, 2 y 3 medida con el EMC, muestra en comparación del EMC permitido son menores y que cumplen con las especificaciones de exactitud posicional absoluta para la escala 1:500, como se observan en las figuras 6.5 y 6.6.

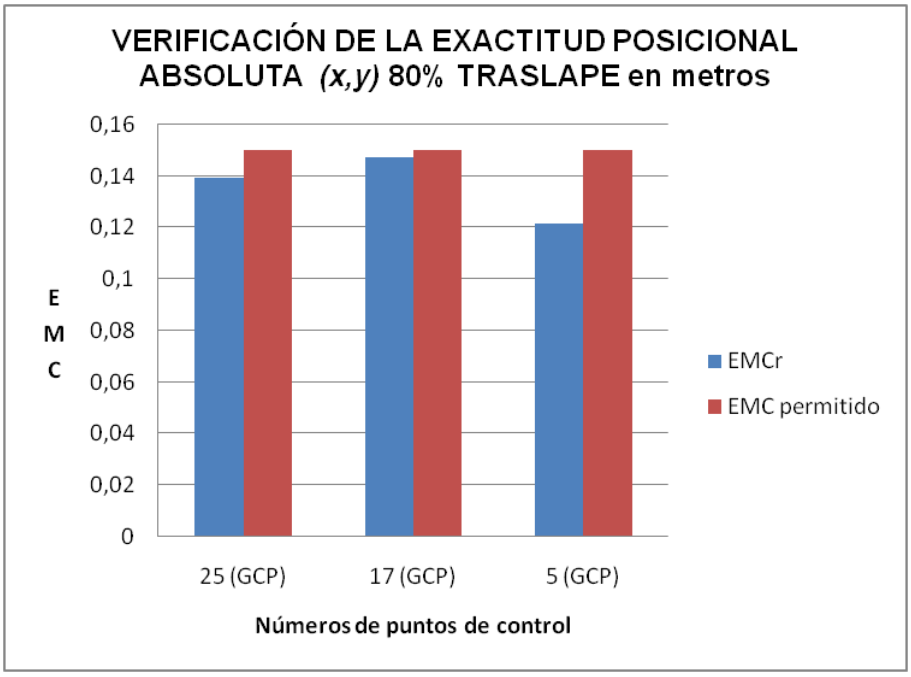


Figura 6.5. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3

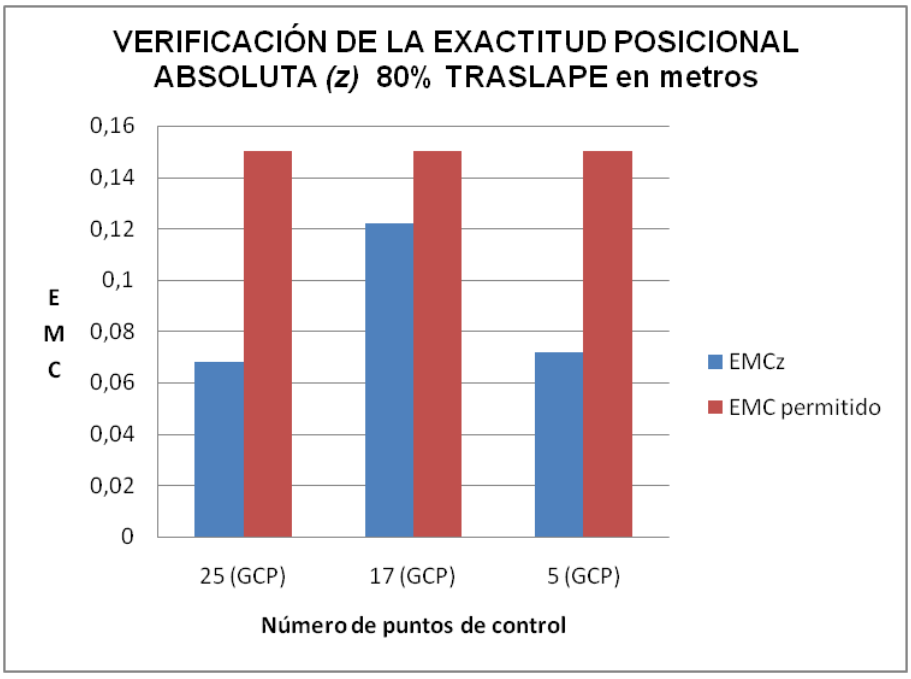


Figura 6.6. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3

6.6. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA CON EL ESCENARIO DE CINCO (5) GPC Y 60% DE RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL

En las Figura 6.7 se observa que, en revisión de la exactitud posicional de la absoluta, el EMCr encontrado muestra un menor valor el escenario con el recubrimiento longitudinal de imágenes con 60% de traslape, comparado con los escenarios de los bloques 1, 2 y 3 y el EMCz encontrado muestra un valor similar al de los bloques 1 y 3 como se muestran en la Figura 6.8. Este resultado muestra que la influencia de las variables modificadas no afecta la exactitud posicional absoluta. La disminución en el valor del EMCr puede atribuirse que las lecturas tomadas para la revisión de los bloques aerotriangulados por parte del operador, se realizó después de los bloques 1, 2 y 3, pudiendo tener influencia el reconocimiento visual previo de los puntos medidos.

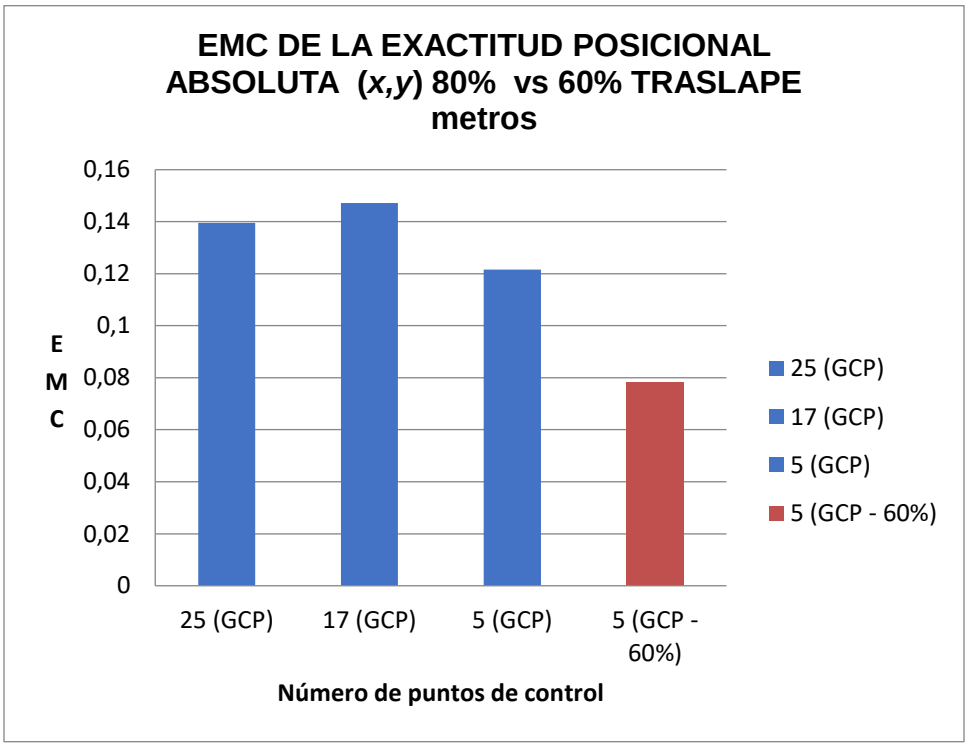


Figura 6.7. Comparación del EMCr con de los bloques 1,2,3 y 4

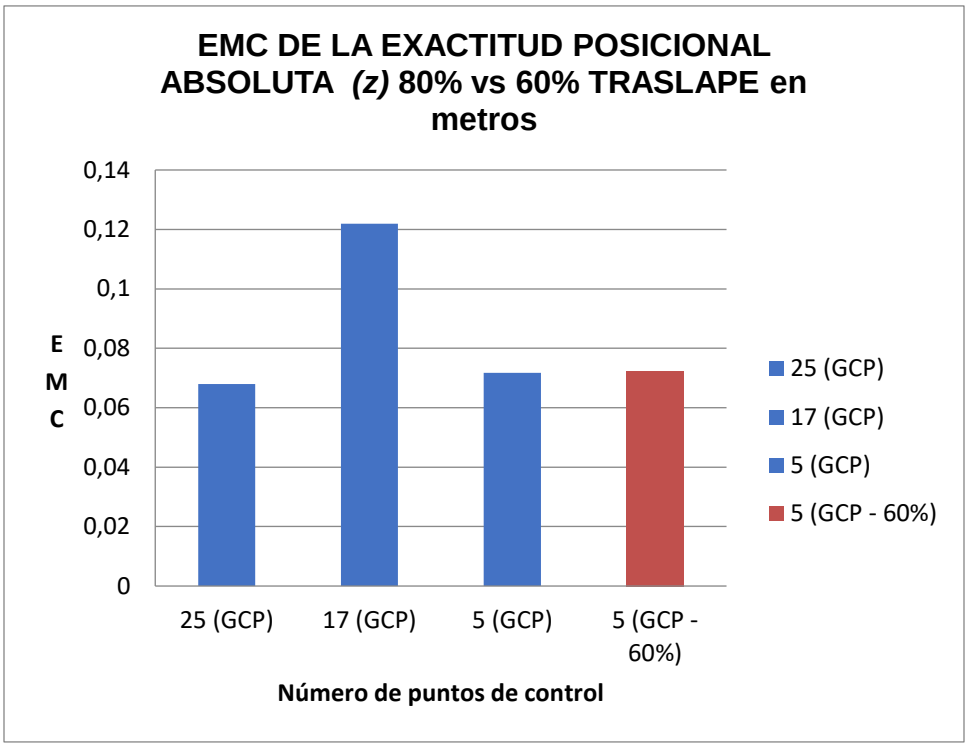


Figura 6.8. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4

Las variaciones antes presentadas confirman que la generación de bloques fotogramétricos en los softwares de procesamiento de imágenes obtenidas de la cámara 1" CMOS de 20 megapíxeles cumplen con las especificaciones técnicas del IGAC y pueden ser utilizadas para captura de información espacial en 3D en software fotogramétrico clásico.

6.7. VARIACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL ABSOLUTA DEL DSM

Los resultados indican una tendencia a bajar la exactitud posicional absoluta del DSM, en proporción directa a la cantidad de puntos de control como se puede como se puede observar en la Figura 6.9.

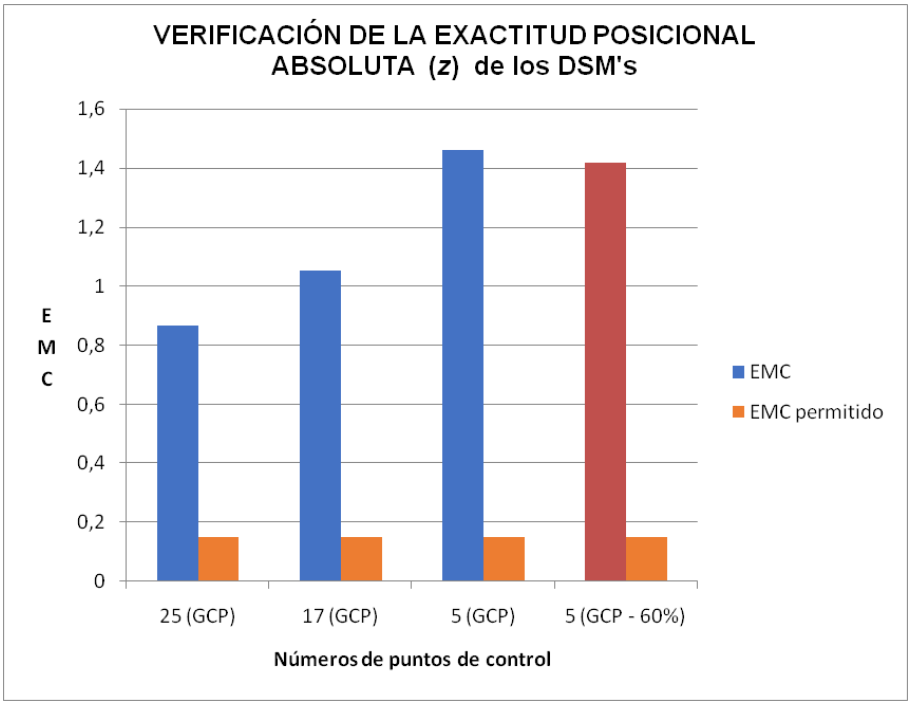


Figura 6.9. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4 con respecto al EMC permitido

También se puede observar que la exactitud posicional absoluta no cumple para ninguno de los escenarios expuestos. En los anexos (L, M, N, O, P, Q, R, S) se pueden observar las mediciones realizadas en los diferentes MDS, en donde los valores más altos corresponden con los puntos de chequeo que no se encuentran sobre el terreno, sino en puntos elevados medidos sobre construcciones.

Los puntos de chequeo con los valores adoptados de los MDS's que presentaron las diferencias más altas con respecto a los valores tomados en campo corresponden a los puntos de chequeo que no estaban sobre el terreno, sino en la parte alta de elementos antrópicos que se tomaron por su fácil fotointerpretación, como son las esquinas de las casas y la parte superior de un tanque elevado, como se observa en la Figura 6.10.

Figura 6.10. Ejemplos de puntos de chequeo

Los modelos digitales de superficie generados presentan inconsistencia en zonas donde se presentan elementos superficiales con alturas, las zonas de vegetación y construcciones generan valores que afectan estos modelos, por esta razón la comparación de la variación de la exactitud posicional absoluta del DSM se realizó para los puntos que están sobre el terreno y no sobre construcciones, en la Tabla 6.1 se indican los puntos seleccionados.

Tabla 6.1. Puntos de chequeo validados

Puntos de chequeo	
14_CH_57	41_CH_109
20_CH_111	40_CH_108
17_CH_60	26_CH_101
19_CH_110	43_CH_116
46_CH_113	42_CH_117
34_CH_121	11_PIEDRA
25_CH_100	27_CH_65
44_CH_115	37_CH_118
22_CH_106	

El resultado en EMCz para los 17 puntos de chequeo muestra una mejoría en el escenario con mayor número de puntos de control, la variabilidad entre los escenarios no es amplia, pero ninguno alcanzaría el EMC permitido como se evidencia en la Figura 6.11.

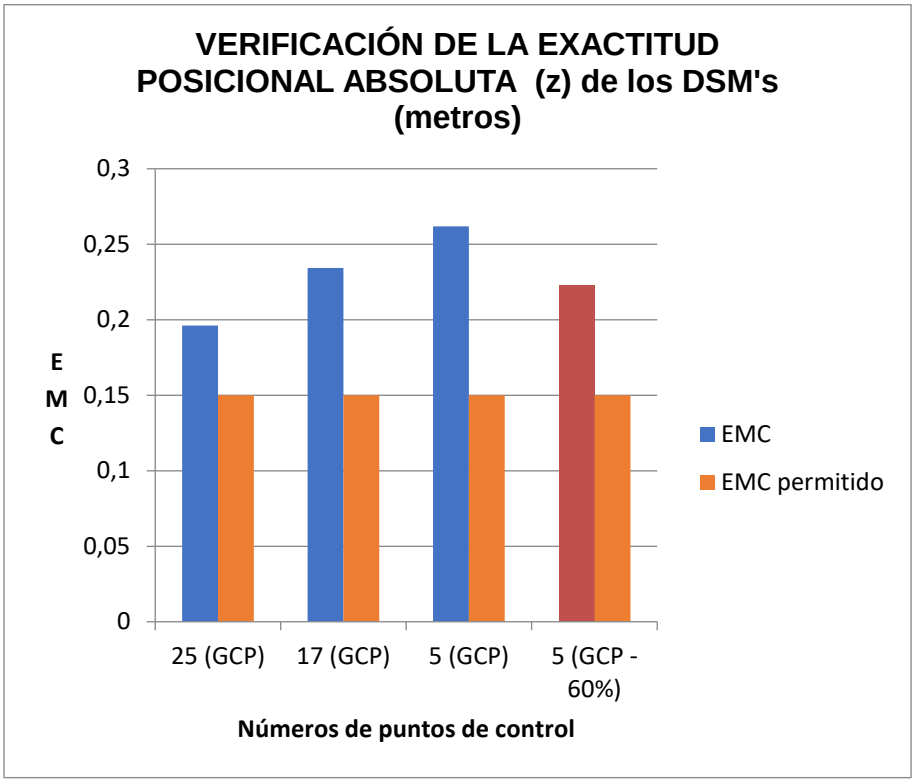


Figura 6.11. Comparación del EMCz con de los bloques 1,2,3 y 4 con respecto al EMC permitido

En otros trabajos, como Martínez Carricondo (2016), se concluye que la exactitud altimétrica disminuye en relación directa con la disminución de puntos de control, en el caso de este trabajo, se encuentra coincidencia en tal afirmación, pero solo para el escenario No. 4, en donde se disminuyó el recubrimiento a 60% y se generaron DSM´s. Cabe anotar también que en el trabajo en mención no se realizaron mediciones en 3D, como sí ocurrió en el presente, en donde las mediciones no muestran disminución de la exactitud altimétrica en función de la disminución de puntos de control.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El software *agisoft*, permite exportar los parámetros la orientación externa de la alineación de las imágenes obtenidas desde la plataforma Phantom 4 pro con el sensor 1" CMOS de 20 megapíxeles a softwares fotogramétricos convencionales (Inpho, ERDAS Photogrammetric), sin que se presenten errores sistemáticos evidentes. La verificación de ausencia de paralaje y saltos verticales en los bloques aerotriangulados, permiten concluir que el sotware *agisoft* es confiable para realizar trabajos fotogramétricos en áreas como las del presente trabajo. Al realizar la verificación de los modelos estereoscópicos se evidencia el cambio en la percepción visual de los objetos de acuerdo al recubrimiento presente en cada par estereoscópico. A mayor recubrimiento, la percepción de la exageración vertical de los elementos superficiales es menor, sin que cambie la magnitud del objeto.

Para el área de estudio, se identificó que la variación en los EMC en la aerotriangulación es inversamente proporcional a la cantidad de puntos de control, en donde a mayor número de GCP el valor en EMC es más bajo. Sin embargo, para todos los escenarios se encuentra que el EMC cumple con las especificaciones de exactitud posicional de la aerotriangulación. Modificando los porcentajes de recubrimiento longitudinal de las imágenes del 80% al 60% en el proceso de generación de los bloques aerotriangulados, se encuentra que el EMC cumple con las especificaciones de exactitud posicional de la aerotriangulación, mostrado las virtudes del algoritmo de procesamiento del SIFT del software Agisoft.

El test permitió deducir que la exactitud posicional absoluta cumple para la escala 1:500 en los diferentes tipos de pendiente encontrados en el área de interés. La generación automática de los modelos digitales de superficie no cumple con las especificaciones de exactitud posicional, lo cual es coherente con el proceso de fotogrametría convencional para la generación de estos modelos, debido a la necesidad de la captura de vectores en 3D que permitan dar consistencia a los elementos verticales como construcciones y coberturas vegetales, en donde para una misma posición en (x, y) se presentan dos valores diferentes en (z).

Se concluye que la identificación y señalización de los puntos de chequeo se realice previo a la realización del vuelo para la toma de imágenes, debido a la dificultad que presentan ciertas zonas para identificar detalles tanto en campo como en la posterior foto identificación.

Se concluye que el uso de la estación total de topografía para la determinación de la elevación de los puntos de control y de chequeo es suficiente para cumplir con las especificaciones de exactitud posicional de los puntos de control.

Se encontró que la cantidad de imágenes obtenidas fue superior a la inicialmente planeada, esto ocurre en virtud que la toma de imágenes se programó por intervalos de tiempos y no por distancia recorrida del RPA. Las condiciones climáticas con presencia de vientos afectaron el rendimiento del equipo planeados, presentando en dirección opuesta al viento mayor cantidad de imágenes capturadas a las esperadas, y con viento a favor menor cantidad de imagines. Esto genero recubrimientos de imágenes no planeados.

Se recomienda en futuros trabajos aplicar una metodología que incluya mediciones en 3D, ya que fue el elemento diferenciador y que permitió aportar nuevos datos en cuanto a la variación de la exactitud vertical en función de la cantidad de puntos de control. Despierta gran inquietud, por lo menos para los suscritos, la invariancia de la exactitud vertical cuando la medición se hace a través de la visión estereoscópica (humana), en contraste con la disminución de la exactitud cuándo se realiza a través del software, hecho que genera nuevas preguntas: ¿por qué el uso de los algoritmos SfM y SIFT permite mayor eficiente para la captura en 3D humana y no tanto para la correlación automática? Líneas de investigación quedan invitadas a participar para mejorar el proceso, ya que la captura en 3D, es de lejos la técnica más costosa para producir cartografía.

Otro elemento a tener en cuenta en futuras investigaciones y que amerita un seguimiento riguroso es la caracterización de los puntos de control y de chequeo, en cuanto a su altura, ya que como se anotó en su momento, existe la posibilidad de que el error aumente en

función de la altura del objeto, es decir detalles de altura cero tienden a generan menor error.

Los resultados obtenidos ayudan desde ya a tomar decisiones en cuanto a la cantidad de puntos de control a usar, según el tipo de proyecto y su escala, por cuanto se evidencia que, para proyectos de ortofoto, basta controlar las esquinas del proyecto y un punto de chequeo al centro para garantizar la exactitud posicional, hasta escalas 1: 500 en áreas similares al del test propuesto. Mientras que para productos cuyo interés sea la cota, solo se podrá dar cumplimiento de exactitud vertical si se hace mediante captura en 3D, para la misma escala 1:500.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, M. (30 de Marzo de 2013). *Apuntes de astronomía*. Obtenido de Blog: http://mauricio1949.blogspot.com/2013/03/calidad-del-cielo.html

Alcaldía de Sopó. (15 de Diciembre de 2018). Obtenido de http://www.sopo-cundinamarca.gov.co

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (noviembre de 2014). *Digital Geospatial Data versión 2014*. Recuperado el 25 de octubre de 2018, de American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards

Castillo Carrión, S. (Mayo de 2014). Tesis doctoral Corrección automática de la geometría de fotogramas capturados desde plataformas áereas no tripuladas. Córdoba, España: Universidad de Córdoba.

Chavez, J. L. (2010). Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. En J. L. Chavez, *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales* (pág. 633). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. En E. Chuvieco, *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio* (pág. 590). Madrid: Ariel.

Circular 328. (2011). *Unmanned Aircraft System (UAS).* Montréal: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO).

Circular reglamentaria 002. (2015). *REQUISITOS GENERALES DE AERONAVEGABILIDAD Y OPERACIONES PARA RPAS (Numeral 4.25.8.2).* Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia.

Deagostini, D. (1990). *Introduccion a la Fotogramtria.* Bogota: Editorial Presencia Ltda.

Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. *UAV Photogrammetry*. Zurich, Switzerland: ETH ZURICH.

Flores, P., & Braun, J. (2011). Algoritmo SIFT: fundamento teórico.

Gini, R., Passoni, D., Pagliari, D., Pinto, L., Sona, G., & Dosso, P. (2013). UAV PHOTOGRAMMETRY : BLOCK TRIANGULATION COMPARISONS. *nternational Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 157-162.

Harris, C., & Stephens, M. (1998). *A combined corner and edge detector*.

Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2016). Especificaciones técnicas Cartografia äasica. En IGAC. Bogotá: Igac.

Krzysztof, N., & Andrzej, A. (2017). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to Photogrammetric Developments. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, 113-127.

Kumar, P., Kumar, R., Sundra, A., Ganesh, D., & Prithiviraj, D. (April de 2015). *Quad Band Signal Strength Monitoring System Using Quadcopter and Quad Phone.* Obtenido de www.researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/280573614

Lerma, J. L. (2002). *Fotogrametria Moderna.* Valencia: U.P.V.

Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*.

Martínez Carricondo, P. J. (2016). Técnicas fotogramétricas desde vehículos aéreos no tripulados aplicada a la obtención de productos cartográficos para la ingeniería civil. Almería, España: Universidad de Almería.

Mesas-Carrascosa, F. J., Rumbao, I. C., Barrera Berrocal, J. A., & Ferrer Porras, A. G. (26 de 11 de 2014). Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms. *Sensors*, 22394-22406.

Muñoz Narciso, E., Tena, A., Béjar Maceiras, M., & Vericat, D. (2014). Generación de modelos topográficos a partir de fotogrametria digital automatizada en un río de gravas altamente dinámico. *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, (págs. 335 - 338). Cáceres.

Nyimbili, P. H., Demirel, H., Seker, D. Z., & Erden, T. (2016). Structure from Motion (SfM) - Approaches and Applications. *INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES* . Antalya.

Orellana, R. R. (2006). *cartografia.* Obtenido de http://www.cartografia.cl/download/apuntes_fotogrametria.pdf

Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones.* Madrid: Universidad de Salamanca.

Prajwal, M., Rishab, J., Vaibhav, S., & Karthik, K. (2016). Optimal Number of Ground Control Points for a UAV based Corridor Mapping. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 28 - 32.

Reddy, M. A. (2008). Remote Sensing and Geographical information system. En M. A. Reddy, *Remote Sensing and Geographical information system* (pág. 476). Hyderabad: BS Publications.

Schenk, T. (2002). *Fotogrametria digital.* Barcelona: marcombo.

Snavely, K. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. *Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections*. Washington, United States: University of Washington.

Soto Márquez, E. (2016). Elaboración de una restitución catastral utilizando vehículos áereos no tripulados. *Revista de geografia (Recife)*, 155-169.

Torres, A., & Villate, E. (1983). *Topgrafia.* Bogota: Norma.

Tournadre, V., Pierrot-Deseilligny, M., & Faure, P. (2015). UAV linear photogrammetry V. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 327 - 333.

Tung, W. Y., Kumar, S., & Mohamad Ismail, M. A. (2018). 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pág. 012051). IOP Publishing Ltd.

Van Blyenburgh , P. (2006). UAV systems: global review. *Avionics '06 Conference 06 Conferenc.* Amsterdam: Federating The International UAV Community.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M., & Reynolds, J. M. (15 de 12 de 2012). *https://www.sciencedirect.com.* Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021

Wolf, P., & Dewitt, B. (2000). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.* McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A. Resumen de coordenadas de los puntos preseñalizados

COORDENADAS MAGNA_COLOMBIA_BOGOTA_ZONE_1995.4 COORDENDAS_PUNTOS_CONTROL_					
Punto	**Norte**	**Este**	**CotaInf**	**Cota_Sup**	**Altura objeto**
P8	1028741,787	1012444,107	2641,145	2641,145	
P17	1028760,236	1012456,351	2638,182	2638,182	
P19	1028778,426	1012468,787	2637,087	2637,087	
P20	1028797,253	1012480,695	2636,685	2636,685	
P21	1028815,533	1012492,301	2636,119	2636,119	
P7	1028832,106	1012502,454	2635,905	2635,905	
P6	1028808,129	1012545,512	2632,283	2632,283	
P5	1028789,493	1012533,664	2632,089	2632,089	
P4	1028770,920	1012521,839	2632,119	2632,119	
P3	1028752,277	1012509,825	2632,422	2632,422	
P2	1028733,578	1012497,821	2632,838	2632,838	
P1	1028715,137	1012485,590	2635,074	2635,074	
P4	1028855,940	1012458,979	2640,035	2640,035	
TEJA	1028821,052	1012451,021	2639,864	2642,264	2,4
P23	1028878,549	1012417,068	2647,265	2647,265	
P15	1028876,562	1012398,725	2650,148	2650,148	
P28	1028860,010	1012404,467	2646,353	2646,353	
P14	1028854,675	1012388,725	2648,529	2648,529	
P29	1028841,619	1012392,516	2647,916	2647,916	
P13	1028835,086	1012378,750	2648,511	2648,511	
P12	1028814,094	1012371,660	2655,121	2655,121	
P10	1028794,842	1012361,367	2658,195	2658,195	
P11	1028774,884	1012352,226	2660,337	2660,337	
P9	1028768,190	1012402,445	2650,118	2650,118	
P25	1028786,837	1012414,312	2647,293	2647,293	

ANEXO B. Resumen de coordenadas de los puntos de chuequeo

COORDENADAS_MAGNA_COLOMBIA_BOGOTA_ZONE_1995,4 (PUNTOSDE CHEQUEO)					
Punto	**Norte**	**Este**	**Cota_Inf**	**Cota_Sup**	**Altura objeto**
ESQ_KSA	1028853,919	1012512,045	2636,821	2640,171	3,350
ESQ_KSA	1028799,192	1012567,505	2630,455	2632,755	2,300
EJE_VIA	1028824,053	1012529,260	2633,788	2633,788	
COTA	1028805,508	1012516,892	2633,898	2633,898	
COTA	1028779,666	1012501,816	2634,305	2634,305	
COTA	1028754,749	1012487,013	2634,268	2634,268	
COTA	1028733,455	1012475,896	2635,926	2635,926	
COTA	1028716,375	1012467,663	2638,249	2638,249	
COULVERT	1028757,190	1012534,313	2631,615	2631,815	0,200
PIEDRA	1028720,381	1012502,341	2632,769	2632,769	
PIEDRA	1028724,174	1012481,045	2635,587	2635,587	
PIEDRA	1028725,035	1012467,751	2638,414	2638,414	
PIEDRA	1028734,253	1012463,076	2638,682	2638,682	
CH_57	1028735,935	1012469,306	2637,310	2637,310	
COTA	1028757,506	1012485,558	2634,498	2634,498	
CH_62	1028757,961	1012466,767	2636,392	2636,392	
CH_60	1028755,952	1012431,764	2643,018	2643,018	
CH_58	1028739,967	1012409,364	2647,661	2647,661	
CH_110	1028757,566	1012402,760	2649,828	2649,828	
CH_111	1028749,652	1012386,703	2652,779	2652,779	
CH_112	1028765,302	1012385,369	2653,641	2653,641	
CH_106	1028786,289	1012418,134	2646,334	2646,334	
PIEDRA	1028780,422	1012422,416	2644,761	2644,761	
CH_104	1028779,790	1012433,038	2641,772	2641,772	

CH_100	1028768,764	1012467,140	2636,849	2636,849	
CH_101	1028808,840	1012481,054	2636,983	2636,983	
CH_65	1028822,831	1012489,101	2636,698	2636,698	
PIEDRA	1028839,025	1012550,250	2632,746	2632,746	
ESQ_KSA	1028856,926	1012491,565	2637,790	2639,990	2,200
CH_103	1028838,732	1012457,910	2640,124	2640,324	0,200
ESQ_KSA	1028861,071	1012453,218	2640,654	2643,354	2,700
ESQ_KSA	1028868,738	1012448,161	2642,023	2644,323	2,300
ESQ_KSA	1028876,037	1012438,787	2643,446	2646,596	3,150
CH_121	1028871,015	1012401,791	2648,467	2648,467	
CH_120	1028880,750	1012372,649	2653,480	2654,850	1,370
CH_119	1028863,415	1012385,528	2650,069	2650,069	
CH_118	1028834,445	1012376,427	2648,629	2648,629	
CH_106	1028786,349	1012418,116	2646,326	2646,326	
CH_107	1028785,639	1012406,642	2649,601	2652,901	3,300
CH_108	1028800,683	1012393,053	2650,033	2650,033	
CH_109	1028792,391	1012385,582	2653,266	2653,266	
CH_117	1028812,271	1012373,519	2655,338	2655,338	
CH_116	1028809,739	1012364,049	2656,751	2656,751	
CH_115	1028775,789	1012356,401	2659,219	2659,219	
CH_114	1028744,675	1012350,643	2659,735	2663,035	3,300
CH_113	1028763,020	1012367,907	2657,164	2657,164	
PIEDRA_Centro	1028815,971	1012404,846	2643,397	2643,397	

ANEXO C. Bitácora de vuelo**.**

BITACORA DE VUELO

Nombre y número de vuelo: Hda. La María **Fecha:** Junio 23/18

Ubicación: Sopó (Cundinamarca) **Coordenadas:** 73°57'54" W
4°51'25" N

UAV/Drone:

Fabricante: DJI

Modelo: Phantom 4 pro (Obsidian)

Operadores:

Piloto: Edorson Macano

Observador: José Quiroga

Checklist prevuelo:

- ☑ Baterías cargadas
- ☑ Hardware de la aeronave
- ☑ Carcaza y/o tren de aterrizaje
- ☑ Baterias radiocontrol cargadas
- ☑ Hélices listas y aseguradas
- ☑ Software/firmware actualizado
- ☑ Radiocontrol listo y encendido
- ☑ Plataforma encendida
- ☑ Calibración de brújula
- ☑ Sensor encendido
- ☑ Conexión satelital Aplicación y sistemas

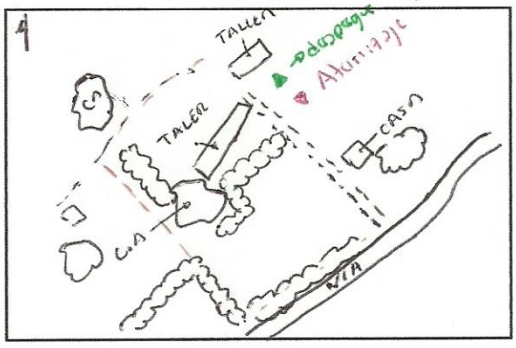
OBSERVACIONES:

Presencia de nubosidad, lloviznа en horas de la mañana

SESIONES DE VUELO	TIEMPOS DE VUELO		
	INICIO	FIN	TOTAL
1.	15:24	15:42	18 min
2.	16:08	16:25	17 min
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

N° DESPEGUES 2 N° ATERRIZAJES 2

MAPA DE VUELO



OBSERVACIONES POSTVUELO:

El viento presenta fue elevado, dificultando la operación del equipo

Yo certifico que los datos suministrados son verdaderos y correctos:
Piloto:_____ Observador:_____

ANEXO D. Verificación de la exactitud posicional (x, y, z) del bloque aerotriangulado 1.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z)
1		P1	1012485,590	1028715,137	1012485,595	1028715,128	-0,005	0,010	0,011	1	2635,074	2634,973	0,101
2		P10	1012361,367	1028794,842	1012361,376	1028794,809	-0,009	0,034	0,035	2	2658,195	2658,207	0,012
3		P11	1012352,226	1028774,884	1012352,245	1028774,864	-0,019	0,020	0,027	3	2660,337	2660,323	0,014
4		P12	1012371,660	1028814,094	1012371,653	1028814,103	0,007	-0,009	0,011	4	2655,121	2655,103	0,018
5		P13	1012378,750	1028835,086	1012378,746	1028835,097	0,004	-0,011	0,012	5	2648,511	2648,623	0,111
6		P14	1012388,725	1028854,675	1012388,734	1028854,663	-0,008	0,012	0,014	6	2648,529	2648,517	0,012
7		P15	1012398,725	1028876,562	1012398,715	1028876,582	0,010	-0,020	0,023	7	2650,148	2650,243	0,095
8		P17	1012456,351	1028760,236	1012456,364	1028760,298	-0,013	-0,062	0,063	8	2638,182	2638,123	0,059
9		P19	1012468,787	1028778,426	1012468,811	1028778,476	-0,024	-0,050	0,056	9	2637,087	2637,057	0,030
10		P2	1012497,821	1028733,578	1012497,881	1028733,572	-0,060	0,006	0,060	10	2632,838	2632,723	0,115
11		P20	1012480,695	1028797,253	1012480,709	1028797,308	-0,015	-0,055	0,057	11	2636,685	2636,683	0,002
12		P21	1012492,301	1028815,533	1012492,322	1028815,581	-0,021	-0,048	0,052	12	2636,119	2636,143	0,024
13		P23	1012417,068	1028878,549	1012417,076	1028878,576	-0,009	-0,028	0,029	13	2647,265	2647,363	0,097
14		P25	1012414,312	1028786,837	1012414,320	1028786,833	-0,009	0,004	0,010	14	2647,293	2647,273	0,020
15		P28	1012404,467	1028860,010	1012404,442	1028860,035	0,026	-0,026	0,036	15	2646,353	2646,263	0,090
16		P29	1012392,516	1028841,619	1012392,516	1028841,644	0,000	-0,025	0,025	16	2647,916	2647,943	0,027
17		P3	1012509,825	1028752,277	1012509,860	1028752,292	-0,035	-0,014	0,037	17	2632,422	2632,363	0,059
18		P4	1012521,839	1028770,920	1012521,866	1028770,900	-0,027	0,021	0,034	18	2632,119	2632,003	0,117
19		P24	1012458,979	1028855,940	1012458,989	1028855,996	-0,010	-0,056	0,057	19	2640,035	2640,013	0,022
20		P5	1012533,664	1028789,493	1012533,736	1028789,471	-0,072	0,022	0,076	20	2632,089	2632,033	0,056
21		P6	1012545,512	1028808,129	1012545,530	1028808,138	-0,018	-0,009	0,020	21	2632,283	2632,273	0,010
22		P7	1012502,454	1028832,106	1012502,472	1028832,113	-0,017	-0,007	0,019	22	2635,905	2635,963	0,057
23		P8	1012444,107	1028741,787	1012444,096	1028741,824	0,011	-0,037	0,038	23	2641,145	2641,153	0,007
24		P9	1012402,445	1028768,190	1012402,464	1028768,175	-0,019	0,015	0,024	24	2650,118	2650,153	0,035
25		TEJA	1012451,021	1028821,052	1012451,017	1028821,034	0,004	0,018	0,018	25	2642,264	2642,353	0,089

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,034	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,051	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,039	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,06412	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,019	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,039	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,075	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,075	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,095	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,126	m
VAP_x (**95%)**	0,1850	m		VAPz (**95%)**	0,1500	m

ANEXO E. Verificación de la exactitud posicional (x, y, z) del bloque aerotriangulado 2.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		P1	1012485,590	1028715,137	1012485,530	1028715,145	0,060	-0,008	0,060	1	2635,074	2635,047	0,027
2		P10	1012361,367	1028794,842	1012361,364	1028794,819	0,003	0,024	0,024	2	2658,195	2658,147	0,048
3		P11	1012352,226	1028774,884	1012352,189	1028774,876	0,037	0,009	0,038	3	2660,337	2660,247	0,090
4		P13	1012378,750	1028835,086	1012378,751	1028835,100	-0,001	-0,015	0,015	4	2648,511	2648,517	0,006
5		P14	1012388,725	1028854,675	1012388,714	1028854,690	0,011	-0,015	0,019	5	2648,529	2648,547	0,018
6		P19	1012468,787	1028778,426	1012468,698	1028778,429	0,089	-0,003	0,089	6	2637,087	2637,009	0,078
7		P20	1012480,695	1028797,253	1012480,737	1028797,215	-0,042	0,039	0,057	7	2636,685	2636,727	0,042
8		P23	1012417,068	1028878,549	1012417,154	1028878,597	-0,087	-0,048	0,099	8	2647,265	2647,277	0,011
9		P29	1012392,516	1028841,619	1012392,520	1028841,621	-0,004	-0,002	0,004	9	2647,916	2647,857	0,059
10		P3	1012509,825	1028752,277	1012509,818	1028752,274	0,007	0,003	0,008	10	2632,422	2632,347	0,075
11		P4	1012521,839	1028770,920	1012521,861	1028770,892	-0,022	0,028	0,036	11	2632,119	2632,059	0,060
12		P24	1012458,979	1028855,940	1012458,987	1028855,976	-0,008	-0,036	0,037	12	2640,035	2640,027	0,008
13		P6	1012545,512	1028808,129	1012545,576	1028808,100	-0,063	0,030	0,070	13	2632,283	2632,167	0,116
14		P7	1012502,454	1028832,106	1012502,452	1028832,076	0,002	0,029	0,029	14	2635,905	2635,797	0,108
15		P8	1012444,107	1028741,787	1012444,071	1028741,789	0,036	-0,002	0,036	15	2641,145	2641,047	0,098
16		P9	1012402,445	1028768,190	1012402,489	1028768,128	-0,044	0,062	0,076	16	2650,118	2650,107	0,011
17		TEJA	1012451,021	1028821,052	1012450,970	1028821,039	0,051	0,013	0,052	17	2642,264	2642,199	0,065
18										18			
19										19			
20										20			
21										21			
22										22			
23										23			
24										24			
25										25			

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,044	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,054	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,052	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,06468	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,028	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz)**	0,037	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,075	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,075	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,127	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,127	m
VAP_x (**95%)**	0,1850	m		VAPz (**95%)**	0,1500	m

F30900-

ANEXO F. Verificación de la exactitud posicional (x, y, z) del bloque aerotriangulado 3.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z)
1		P1	1012485,590	1028715,137	1012485,571	1028715,154	0,019	-0,016	0,025	1	2635,074	2634,994	0,080
2		P11	1012352,226	1028774,884	1012352,226	1028774,844	0,000	0,040	0,040	2	2660,337	2660,404	0,067
3		P15	1012398,725	1028876,562	1012398,665	1028876,608	0,060	-0,046	0,076	3	2650,148	2650,084	0,064
4		P6	1012545,512	1028808,129	1012545,554	1028808,085	-0,042	0,044	0,061	4	2632,283	2632,204	0,079
5		TEJA	1012451,021	1028821,052	1012451,006	1028821,069	0,015	-0,017	0,023	5	2642,264	2642,284	0,020
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	5	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	5	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,045	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,062	m
ERROR MEDIO CUADRÀTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,049	m		ERROR MEDIO CUADRÀTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,06584	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,023	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz)**	0,025	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,075	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,075	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,121	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%**)	0,129	m
VAP_x (**95%)**	0,1850	m		VAPz (**95%)**	0,1500	m

F30900-

ANEXO G. Verificación de la exactitud posicional (x, y, z) del bloque aerotriangulado 4.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		P1	1012485,590	1028715,137	1012485,576	1028715,125	0,013	0,012	0,018	1	2635,074	2635,051	0,023
2		P11	1012352,226	1028774,884	1012352,237	1028774,902	-0,010	-0,018	0,020	2	2660,337	2660,326	0,011
3		P15	1012398,725	1028876,562	1012398,726	1028876,587	-0,001	-0,025	0,025	3	2650,148	2650,126	0,021
4		P6	1012545,512	1028808,129	1012545,526	1028808,121	-0,014	0,008	0,016	4	2632,283	2632,306	0,023
5		TEJA	1012451,021	1028821,052	1012451,009	1028821,012	0,012	0,040	0,042	5	2642,264	2642,281	0,017
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	5	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	5	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,024	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,019	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,026	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,01958	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,010	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz)**	0,005	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,075	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,075	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,063	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,038	m
VAP_x (**95%)**	0,1850	m		VAPz (**95%)**	0,1500	m

E30900-

ANEXO H. Verificación de la exactitud absoluta (x, y, z) del bloque aerotriangulado 1.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57	1012469,306	1028735,935	1012469,255	1028735,796	0,051	0,139	0,148	1	2637,310	2637,282	0,028
2		45_CH_114	1012350,643	1028744,675	1012350,570	1028744,779	0,073	-0,104	0,127	2	2663,035	2663,053	0,018
3		20_CH_111	1012386,703	1028749,652	1012386,615	1028749,711	0,089	-0,059	0,107	3	2652,779	2652,898	0,119
4		17_CH_60	1012431,764	1028755,952	1012431,789	1028755,954	-0,025	-0,002	0,025	4	2643,018	2642,923	0,096
5		19_CH_110	1012402,760	1028757,566	1012402,768	1028757,612	-0,008	-0,046	0,047	5	2649,828	2649,778	0,050
6		46_CH_113	1012367,907	1028763,020	1012367,854	1028763,068	0,053	-0,049	0,072	6	2657,164	2657,173	0,009
7		34_CH_121	1012401,791	1028871,015	1012401,803	1028871,172	-0,012	-0,157	0,158	7	2648,467	2648,428	0,039
8		25_CH_100	1012467,140	1028768,764	1012467,136	1028768,765	0,004	0,000	0,004	8	2636,849	2636,803	0,046
9		44_CH_115	1012356,401	1028775,789	1012356,463	1028775,850	-0,062	-0,061	0,087	9	2659,219	2659,153	0,066
10		24_CH_104	1012433,038	1028779,790	1012433,080	1028779,910	-0,042	-0,121	0,128	10	2641,772	2641,753	0,019
11		22_CH_106	1012418,134	1028786,289	1012418,086	1028786,331	0,048	-0,042	0,063	11	2646,334	2646,373	0,039
12		41_CH_109	1012385,582	1028792,391	1012385,557	1028792,397	0,026	-0,006	0,026	12	2653,266	2653,273	0,007
13		2_ESQ_KSA	1012567,505	1028799,192	1012567,469	1028799,178	0,036	0,014	0,039	13	2632,755	2632,663	0,092
14		40_CH_108	1012393,053	1028800,683	1012392,997	1028800,777	0,057	-0,095	0,111	14	2650,033	2650,003	0,030
15		26_CH_101	1012481,054	1028808,840	1012481,169	1028809,053	-0,115	-0,213	0,242	15	2636,983	2637,073	0,089
16		43_CH_116	1012364,049	1028809,739	1012363,871	1028810,219	0,179	-0,481	0,513	16	2656,751	2656,750	0,001
17		42_CH_117	1012373,519	1028812,271	1012373,501	1028812,322	0,019	-0,051	0,054	17	2655,338	2655,253	0,085
18		11_PIEDRA	1012481,045	1028724,174	1012481,036	1028724,187	0,009	-0,014	0,016	18	2635,587	2635,603	0,015
19		27_CH_65	1012489,101	1028822,831	1012489,041	1028822,923	0,059	-0,092	0,110	19	2636,698	2636,853	0,155
20		37_CH_118	1012376,427	1028834,445	1012376,412	1028834,569	0,015	-0,124	0,125	20	2648,629	2648,645	0,016
21		1_ESQ_KSA	1012512,045	1028853,919	1012512,049	1028853,920	-0,005	-0,001	0,005	21	2640,171	2640,043	0,128
22		29_ESQ_KSA	1012491,565	1028856,926	1012491,560	1028856,870	0,005	0,056	0,056	22	2639,990	2639,968	0,022
23		31_ESQ_KSA	1012453,218	1028861,071	1012453,202	1028861,136	0,016	-0,065	0,067	23	2643,354	2643,253	0,101
24		33_ESQ_KSA	1012438,787	1028876,037	1012438,806	1028876,076	-0,019	-0,039	0,043	24	2646,596	2646,553	0,043
25		32_ESQ_KSA	1012448,161	1028868,738	1012448,158	1028868,749	0,004	-0,010	0,011	25	2644,323	2644,303	0,020

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,095	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,053	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,140	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,06802	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,104	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,043	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,342	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,133	m
VAP_x (**95%)**	0,3700	m		VAPz (**95%)**	0,3000	m

F30900-

ANEXO I. Verificación de la exactitud absoluta (x, y, z) del bloque aerotriangulado 2.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57	1012469,306	1028735,935	1012469,326	1028735,982	-0,019	-0,047	0,051	1	2637,310	2637,184	0,126
2		45_CH_114	1012350,643	1028744,675	1012350,546	1028744,761	0,097	-0,086	0,129	2	2663,035	2662,962	0,073
3		20_CH_111	1012386,703	1028749,652	1012386,527	1028749,727	0,176	-0,075	0,192	3	2652,779	2652,829	0,050
4		17_CH_60	1012431,764	1028755,952	1012431,677	1028755,899	0,087	0,053	0,102	4	2643,018	2642,697	0,321
5		19_CH_110	1012402,760	1028757,566	1012402,697	1028757,650	0,063	-0,084	0,105	5	2649,828	2649,612	0,216
6		46_CH_113	1012367,907	1028763,020	1012367,846	1028763,063	0,061	-0,043	0,075	6	2657,164	2657,119	0,045
7		34_CH_121	1012401,791	1028871,015	1012401,821	1028871,156	-0,030	-0,141	0,144	7	2648,467	2648,509	0,042
8		25_CH_100	1012467,140	1028768,764	1012467,100	1028768,769	0,040	-0,005	0,041	8	2636,849	2636,824	0,025
9		44_CH_115	1012356,401	1028775,789	1012356,297	1028775,823	0,104	-0,034	0,109	9	2659,219	2659,129	0,090
10		24_CH_104	1012433,038	1028779,790	1012433,086	1028779,912	-0,048	-0,122	0,132	10	2641,772	2641,729	0,043
11		22_CH_106	1012418,134	1028786,289	1012418,132	1028786,328	0,002	-0,039	0,039	11	2646,334	2646,229	0,105
12		41_CH_109	1012385,582	1028792,391	1012385,537	1028792,377	0,045	0,014	0,048	12	2653,266	2653,249	0,017
13		2_ESQ_KSA	1012567,505	1028799,192	1012567,490	1028799,173	0,015	0,019	0,024	13	2632,755	2632,654	0,101
14		40_CH_108	1012393,053	1028800,683	1012392,970	1028800,771	0,083	-0,088	0,122	14	2650,033	2650,009	0,024
15		26_CH_101	1012481,054	1028808,840	1012481,011	1028808,893	0,043	-0,053	0,068	15	2636,983	2637,004	0,021
16		43_CH_116	1012364,049	1028809,739	1012363,886	1028810,311	0,164	-0,572	0,595	16	2656,751	2656,789	0,038
17		42_CH_117	1012373,519	1028812,271	1012373,514	1028812,355	0,005	-0,084	0,084	17	2655,338	2655,199	0,139
18		11_PIEDRA	1012481,045	1028724,174	1012481,045	1028724,165	0,000	0,009	0,009	18	2635,587	2635,489	0,098
19		27_CH_65	1012489,101	1028822,831	1012489,057	1028822,948	0,043	-0,117	0,125	19	2636,698	2636,899	0,201
20		37_CH_118	1012376,427	1028834,445	1012376,388	1028834,422	0,039	0,023	0,045	20	2648,629	2648,659	0,030
21		1_ESQ_KSA	1012512,045	1028853,919	1012512,070	1028853,896	-0,025	0,023	0,034	21	2640,171	2639,914	0,257
22		29_ESQ_KSA	1012491,565	1028856,926	1012491,557	1028856,892	0,008	0,034	0,035	22	2639,990	2639,899	0,091
23		31_ESQ_KSA	1012453,218	1028861,071	1012453,219	1028861,084	-0,001	-0,013	0,013	23	2643,354	2643,379	0,025
24		33_ESQ_KSA	1012438,787	1028876,037	1012438,794	1028876,068	-0,006	-0,031	0,032	24	2646,596	2646,691	0,095
25		32_ESQ_KSA	1012448,161	1028868,738	1012448,179	1028868,743	-0,017	-0,005	0,018	25	2644,323	2644,249	0,074

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,095	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,094	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,147	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,12188	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,115	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,079	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,360	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,239	m
VAP_x (**95%**)	0,3700	m		VAPz (**95%**)	0,3000	m

F30900-

ANEXO J. Verificación de la exactitud absoluta (x, y, z) del bloque aerotriangulado 3.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57	1012469,306	1028735,935	1012469,298	1028735,997	0,009	-0,061	0,062	1	2637,310	2637,318	0,009
2		45_CH_114	1012350,643	1028744,675	1012350,557	1028744,741	0,086	-0,066	0,108	2	2663,035	2662,984	0,051
3		20_CH_111	1012386,703	1028749,652	1012386,566	1028749,695	0,138	-0,043	0,144	3	2652,779	2652,814	0,035
4		17_CH_60	1012431,764	1028755,952	1012431,721	1028756,040	0,043	-0,088	0,098	4	2643,018	2643,019	0,000
5		19_CH_110	1012402,760	1028757,566	1012402,768	1028757,587	-0,008	-0,021	0,022	5	2649,828	2649,829	0,001
6		46_CH_113	1012367,907	1028763,020	1012367,860	1028763,067	0,048	-0,047	0,067	6	2657,164	2657,194	0,030
7		34_CH_121	1012401,791	1028871,015	1012401,847	1028871,139	-0,056	-0,125	0,137	7	2648,467	2648,524	0,057
8		25_CH_100	1012467,140	1028768,764	1012467,138	1028768,760	0,002	0,004	0,005	8	2636,849	2636,869	0,020
9		44_CH_115	1012356,401	1028775,789	1012356,428	1028775,780	-0,027	0,009	0,028	9	2659,219	2659,144	0,075
10		24_CH_104	1012433,038	1028779,790	1012433,048	1028779,932	-0,010	-0,142	0,143	10	2641,772	2641,834	0,062
11		22_CH_106	1012418,134	1028786,289	1012418,144	1028786,328	-0,010	-0,039	0,040	11	2646,334	2646,334	0,000
12		41_CH_109	1012385,582	1028792,391	1012385,561	1028792,399	0,021	-0,008	0,023	12	2653,266	2653,294	0,028
13		2_ESQ_KSA	1012567,505	1028799,192	1012567,459	1028799,178	0,047	0,015	0,049	13	2632,755	2632,594	0,161
14		40_CH_108	1012393,053	1028800,683	1012393,048	1028800,705	0,006	-0,022	0,023	14	2650,033	2650,099	0,066
15		26_CH_101	1012481,054	1028808,840	1012481,100	1028809,232	-0,046	-0,393	0,395	15	2636,983	2637,155	0,172
16		43_CH_116	1012364,049	1028809,739	1012364,007	1028809,882	0,043	-0,143	0,149	16	2656,751	2656,744	0,007
17		42_CH_117	1012373,519	1028812,271	1012373,550	1028812,333	-0,030	-0,061	0,068	17	2655,338	2655,274	0,064
18		11_PIEDRA	1012481,045	1028724,174	1012481,018	1028724,193	0,027	-0,019	0,033	18	2635,587	2635,639	0,051
19		27_CH_65	1012489,101	1028822,831	1012489,001	1028822,603	0,099	0,228	0,249	19	2636,698	2636,734	0,036
20		37_CH_118	1012376,427	1028834,445	1012376,504	1028834,441	-0,078	0,004	0,078	20	2648,629	2648,794	0,164
21		1_ESQ_KSA	1012512,045	1028853,919	1012512,066	1028853,907	-0,021	0,012	0,024	21	2640,171	2640,094	0,077
22		29_ESQ_KSA	1012491,565	1028856,926	1012491,564	1028856,905	0,001	0,021	0,021	22	2639,990	2639,974	0,016
23		31_ESQ_KSA	1012453,218	1028861,071	1012453,233	1028861,115	-0,016	-0,044	0,047	23	2643,354	2643,335	0,019
24		33_ESQ_KSA	1012438,787	1028876,037	1012438,917	1028876,040	-0,130	-0,003	0,130	24	2646,596	2646,664	0,068
25		32_ESQ_KSA	1012448,161	1028868,738	1012448,195	1028868,726	-0,034	0,012	0,036	25	2644,323	2644,385	0,062

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA	
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25 pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,087	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,053 m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,122	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,07176 m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,086	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,049 m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150 m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,298	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,141 m
VAP_x (**95%)**	0,3700	m		VAPz (**95%)**	0,3000 m

F30900-

ANEXO K. Verificación de la exactitud absoluta (x, y, z) del bloque aerotriangulado 4.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: Hacienda Buenavista

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57	1012469,306	1028735,935	1012469,290	1028735,936	0,017	-0,001	0,017	1	2637,310	2637,346	0,036
2		45_CH_114	1012350,643	1028744,675	1012350,523	1028744,788	0,120	-0,113	0,165	2	2663,035	2662,966	0,069
3		20_CH_111	1012386,703	1028749,652	1012386,649	1028749,739	0,055	-0,087	0,103	3	2652,779	2652,826	0,048
4		17_CH_60	1012431,764	1028755,952	1012431,769	1028755,966	-0,005	-0,015	0,016	4	2643,018	2643,046	0,028
5		19_CH_110	1012402,760	1028757,566	1012402,767	1028757,607	-0,007	-0,041	0,042	5	2649,828	2649,812	0,016
6		46_CH_113	1012367,907	1028763,020	1012367,872	1028763,065	0,035	-0,045	0,057	6	2657,164	2657,146	0,018
7		34_CH_121	1012401,791	1028871,015	1012401,843	1028871,172	-0,052	-0,157	0,166	7	2648,467	2648,386	0,081
8		25_CH_100	1012467,140	1028768,764	1012467,107	1028768,777	0,034	-0,013	0,036	8	2636,849	2636,896	0,047
9		44_CH_115	1012356,401	1028775,789	1012356,426	1028775,791	-0,025	-0,002	0,025	9	2659,219	2659,096	0,123
10		24_CH_104	1012433,038	1028779,790	1012433,114	1028779,935	-0,076	-0,145	0,164	10	2641,772	2641,786	0,014
11		22_CH_106	1012418,134	1028786,289	1012418,122	1028786,349	0,012	-0,059	0,061	11	2646,334	2646,376	0,042
12		41_CH_109	1012385,582	1028792,391	1012385,568	1028792,423	0,014	-0,032	0,035	12	2653,266	2653,336	0,070
13		2_ESQ_KSA	1012567,505	1028799,192	1012567,468	1028799,182	0,038	0,011	0,039	13	2632,755	2632,696	0,059
14		40_CH_108	1012393,053	1028800,683	1012392,998	1028800,733	0,055	-0,051	0,075	14	2650,033	2650,036	0,003
15		26_CH_101	1012481,054	1028808,840	1012481,096	1028808,786	-0,042	0,054	0,068	15	2636,983	2637,076	0,093
16		43_CH_116	1012364,049	1028809,739	1012363,994	1028809,819	0,056	-0,080	0,097	16	2656,751	2656,816	0,065
17		42_CH_117	1012373,519	1028812,271	1012373,551	1028812,361	-0,031	-0,089	0,095	17	2655,338	2655,286	0,052
18		11_PIEDRA	1012481,045	1028724,174	1012481,020	1028724,158	0,025	0,016	0,029	18	2635,587	2635,591	0,004
19		27_CH_65	1012489,101	1028822,831	1012489,056	1028822,865	0,045	-0,034	0,056	19	2636,698	2636,956	0,258
20		37_CH_118	1012376,427	1028834,445	1012376,484	1028834,521	-0,057	-0,077	0,096	20	2648,629	2648,641	0,012
21		1_ESQ_KSA	1012512,045	1028853,919	1012512,058	1028853,917	-0,013	0,001	0,013	21	2640,171	2640,106	0,065
22		29_ESQ_KSA	1012491,565	1028856,926	1012491,557	1028856,894	0,008	0,033	0,034	22	2639,990	2639,986	0,004
23		31_ESQ_KSA	1012453,218	1028861,071	1012453,246	1028861,089	-0,028	-0,019	0,034	23	2643,354	2643,346	0,008
24		33_ESQ_KSA	1012438,787	1028876,037	1012438,821	1028876,068	-0,033	-0,031	0,046	24	2646,596	2646,586	0,010
25		32_ESQ_KSA	1012448,161	1028868,738	1012448,192	1028868,760	-0,031	-0,022	0,038	25	2644,323	2644,336	0,013

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA	
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25 pts
MEDIA: $\bar{x}$	0,064	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,050 m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	0,078	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,07235 m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,046	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,054 m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150 m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	0,192	m		PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	0,142 m
VAP_x (**95%)**	0,3700	m		VAPz (**95%)**	0,3000 m

F30900-

ANEXO L. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 1 con DSM.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,249	0,061
2		45_CH_114								2	2663,035	2661,845	1,190
3		20_CH_111								3	2652,779	2653,142	0,363
4		17_CH_60								4	2643,018	2642,921	0,097
5		19_CH_110								5	2649,828	2649,650	0,178
6		46_CH_113								6	2657,164	2656,937	0,227
7		34_CH_121								7	2648,467	2648,616	0,149
8		25_CH_100								8	2636,849	2636,688	0,160
9		44_CH_115								9	2659,219	2659,094	0,125
10		24_CH_104								10	2641,772	2642,201	0,429
11		22_CH_106								11	2646,334	2646,285	0,049
12		41_CH_109								12	2653,266	2653,200	0,066
13		2_ESQ_KSA								13	2632,755	2630,866	1,889
14		40_CH_108								14	2650,033	2650,097	0,065
15		26_CH_101								15	2636,983	2637,227	0,244
16		43_CH_116								16	2656,751	2657,035	0,284
17		42_CH_117								17	2655,338	2655,290	0,047
18		11_PIEDRA								18	2635,587	2635,438	0,150
19		27_CH_65								19	2636,698	2636,819	0,121
20		37_CH_118								20	2648,629	2649,044	0,415
21		1_ESQ_KSA								21	2640,171	2639,327	0,844
22		29_ESQ_KSA								22	2639,990	2639,746	0,244
23		31_ESQ_KSA								23	2643,354	2641,867	1,487
24		33_ESQ_KSA								24	2646,596	2643,530	3,067
25		32_ESQ_KSA								25	2644,323	2643,559	0,764

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	#¡DIV/0!	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,509	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	0,86698	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,717	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	1,699	m
VAP_x (**95%**)	0,3700	m		VAPz (**95%**)	0,3000	m

F30900-

ANEXO M. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 2 con DSM.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,239	0,071
2		45_CH_114								2	2663,035	2659,705	3,330
3		20_CH_111								3	2652,779	2653,132	0,353
4		17_CH_60								4	2643,018	2642,915	0,103
5		19_CH_110								5	2649,828	2649,671	0,157
6		46_CH_113								6	2657,164	2656,939	0,225
7		34_CH_121								7	2648,467	2648,616	0,149
8		25_CH_100								8	2636,849	2636,725	0,124
9		44_CH_115								9	2659,219	2659,086	0,133
10		24_CH_104								10	2641,772	2642,086	0,314
11		22_CH_106								11	2646,334	2646,239	0,095
12		41_CH_109								12	2653,266	2653,210	0,055
13		2_ESQ_KSA								13	2632,755	2630,701	2,054
14		40_CH_108								14	2650,033	2649,996	0,037
15		26_CH_101								15	2636,983	2637,399	0,416
16		43_CH_116								16	2656,751	2656,983	0,233
17		42_CH_117								17	2655,338	2655,257	0,081
18		11_PIEDRA								18	2635,587	2635,433	0,155
19		27_CH_65								19	2636,698	2636,849	0,151
20		37_CH_118								20	2648,629	2649,237	0,607
21		1_ESQ_KSA								21	2640,171	2639,969	0,202
22		29_ESQ_KSA								22	2639,990	2639,864	0,126
23		31_ESQ_KSA								23	2643,354	2642,959	0,395
24		33_ESQ_KSA								24	2646,596	2643,393	3,203
25		32_ESQ_KSA								25	2644,323	2643,345	0,978

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	#¡DIV/0!	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,550	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	1,05395	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	0,918	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	2,066	m
VAP_x (**95%**)	0,3700	m		VAPz (**95%**)	0,3000	m

F30900-

ANEXO N. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 3 con DSM.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,354	0,044
2		45_CH_114								2	2663,035	2659,675	3,360
3		20_CH_111								3	2652,779	2653,203	0,424
4		17_CH_60								4	2643,018	2643,055	0,037
5		19_CH_110								5	2649,828	2649,748	0,080
6		46_CH_113								6	2657,164	2656,967	0,196
7		34_CH_121								7	2648,467	2648,640	0,173
8		25_CH_100								8	2636,849	2636,882	0,033
9		44_CH_115								9	2659,219	2659,093	0,126
10		24_CH_104								10	2641,772	2642,202	0,430
11		22_CH_106								11	2646,334	2646,369	0,035
12		41_CH_109								12	2653,266	2653,276	0,010
13		2_ESQ_KSA								13	2632,755	2630,609	2,146
14		40_CH_108								14	2650,033	2650,116	0,083
15		26_CH_101								15	2636,983	2637,536	0,553
16		43_CH_116								16	2656,751	2657,011	0,260
17		42_CH_117								17	2655,338	2655,317	0,021
18		11_PIEDRA								18	2635,587	2635,503	0,084
19		27_CH_65								19	2636,698	2636,977	0,279
20		37_CH_118								20	2648,629	2649,280	0,650
21		1_ESQ_KSA								21	2640,171	2639,423	0,748
22		29_ESQ_KSA								22	2639,990	2639,905	0,085
23		31_ESQ_KSA								23	2643,354	2648,368	5,014
24		33_ESQ_KSA								24	2646,596	2643,451	3,145
25		32_ESQ_KSA								25	2644,323	2643,585	0,738

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	#¡DIV/0!	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,750	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	1,46137	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz**)	1,280	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	2,864	m
VAP_x (**95%**)	0,3700	m		VAPz (**95%**)	0,3000	m

F30900-

ANEXO O. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 4 con DSM.

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z.)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,346	0,036
2		45_CH_114								2	2663,035	2659,845	3,190
3		20_CH_111								3	2652,779	2652,908	0,129
4		17_CH_60								4	2643,018	2643,058	0,040
5		19_CH_110								5	2649,828	2649,734	0,093
6		46_CH_113								6	2657,164	2656,999	0,165
7		34_CH_121								7	2648,467	2648,580	0,113
8		25_CH_100								8	2636,849	2636,905	0,056
9		44_CH_115								9	2659,219	2659,080	0,139
10		24_CH_104								10	2641,772	2642,130	0,358
11		22_CH_106								11	2646,334	2646,353	0,019
12		41_CH_109								12	2653,266	2653,237	0,028
13		2_ESQ_KSA								13	2632,755	2630,468	2,287
14		40_CH_108								14	2650,033	2650,081	0,048
15		26_CH_101								15	2636,983	2637,557	0,574
16		43_CH_116								16	2656,751	2656,973	0,222
17		42_CH_117								17	2655,338	2655,276	0,062
18		11_PIEDRA								18	2635,587	2635,553	0,034
19		27_CH_65								19	2636,698	2636,974	0,276
20		37_CH_118								20	2648,629	2649,167	0,537
21		1_ESQ_KSA								21	2640,171	2639,978	0,193
22		29_ESQ_KSA								22	2639,990	2639,898	0,092
23		31_ESQ_KSA								23	2643,354	2647,832	4,478
24		33_ESQ_KSA								24	2646,596	2643,417	3,179
25		32_ESQ_KSA								25	2644,323	2642,414	1,909

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	25	pts
MEDIA: $\bar{x}$	#¡DIV/0!	m		MEDIA: $\bar{z}$	0,730	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCr**	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO: **EMCz**	1,41743	m
DESV. ESTÁNDAR: **σx**	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR (**σz)**	1,240	m
EMC MAX_PERMITIDO_x	0,150	m		**EMC** MAX_PERMITIDO_z	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%: **Px(95%)**	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%: **Pz(95%)**	2,778	m
VAP_x (**95%)**	0,3700	m		VAPz (**95%)**	0,3000	m

F30900-

ANEXO P. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 1 con DSM (filtro)

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z.)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,249	0,061
2		20_CH_111								2	2652,779	2653,142	0,363
3		17_CH_60								3	2643,018	2642,921	0,097
4		19_CH_110								4	2649,828	2649,650	0,178
5		46_CH_113								5	2657,164	2656,937	0,227
6		34_CH_121								6	2648,467	2648,616	0,149
7		25_CH_100								7	2636,849	2636,688	0,160
8		44_CH_115								8	2659,219	2659,094	0,125
9		22_CH_106								9	2646,334	2646,285	0,049
10		41_CH_109								10	2653,266	2653,200	0,066
11		40_CH_108								11	2650,033	2650,097	0,065
12		26_CH_101								12	2636,983	2637,227	0,244
13		43_CH_116								13	2656,751	2657,035	0,284
14		42_CH_117								14	2655,338	2655,290	0,047
15		11_PIEDRA								15	2635,587	2635,438	0,150
16		27_CH_65								16	2636,698	2636,819	0,121
17		37_CH_118								17	2648,629	2649,044	0,415
18										18			
19										19			
20										20			
21										21			
22										22			
23										23			
24										24			
25										25			

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts
MEDIA:	#¡DIV/0!	m		MEDIA:	0,165	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO:	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL	0,19625	m
DESV. ESTÁNDAR:	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR:	0,110	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX. PERMITIDO:	0,150	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX.	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%:	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%:	0,385	m
VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN AL 95%:	0,3700	m		VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN	0,3000	m

F30900-

ANEXO Q. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 2 con DSM (filtro)

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,239	0,071
2		20_CH_111								2	2652,779	2653,132	0,353
3		17_CH_60								3	2643,018	2642,915	0,103
4		19_CH_110								4	2649,828	2649,671	0,157
5		46_CH_113								5	2657,164	2656,939	0,225
6		34_CH_121								6	2648,467	2648,616	0,149
7		25_CH_100								7	2636,849	2636,725	0,124
8		44_CH_115								8	2659,219	2659,086	0,133
9		22_CH_106								9	2646,334	2646,239	0,095
10		41_CH_109								10	2653,266	2653,210	0,055
11		40_CH_108								11	2650,033	2649,996	0,037
12		26_CH_101								12	2636,983	2637,399	0,416
13		43_CH_116								13	2656,751	2656,983	0,233
14		42_CH_117								14	2655,338	2655,257	0,081
15		11_PIEDRA								15	2635,587	2635,433	0,155
16		27_CH_65								16	2636,698	2636,849	0,151
17		37_CH_118								17	2648,629	2649,237	0,607
18										18			
19										19			
20										20			
21										21			
22										22			
23										23			
24										24			
25										25			

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts
MEDIA:	#¡DIV/0!	m		MEDIA:	0,185	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO:	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL	0,2344	m
DESV. ESTÁNDAR:	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR:	0,148	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX. PERMITIDO:	0,150	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX.	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%:	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%:	0,459	m
VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN AL 95%:	0,3700	m		VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN	0,3000	m

F30900-

ANEXO R. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 3 con DSM (filtro)

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,354	0,044
2		20_CH_111								2	2652,779	2653,203	0,424
3		17_CH_60								3	2643,018	2643,055	0,037
4		19_CH_110								4	2649,828	2649,748	0,080
5		46_CH_113								5	2657,164	2656,967	0,196
6		34_CH_121								6	2648,467	2648,640	0,173
7		25_CH_100								7	2636,849	2636,882	0,033
8		44_CH_115								8	2659,219	2659,093	0,126
9		22_CH_106								9	2646,334	2646,369	0,035
10		41_CH_109								10	2653,266	2653,276	0,010
11		40_CH_108								11	2650,033	2650,116	0,083
12		26_CH_101								12	2636,983	2637,536	0,553
13		43_CH_116								13	2656,751	2657,011	0,260
14		42_CH_117								14	2655,338	2655,317	0,021
15		11_PIEDRA								15	2635,587	2635,503	0,084
16		27_CH_65								16	2636,698	2636,977	0,279
17		37_CH_118								17	2648,629	2649,280	0,650
18										18			
19										19			
20										20			
21										21			
22										22			
23										23			
24										24			
25										25			

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts
MEDIA:	#¡DIV/0!	m		MEDIA:	0,182	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO:	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL	0,26179	m
DESV. ESTÁNDAR:	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR:	0,194	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX. PERMITIDO:	0,150	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX.	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%:	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%:	0,513	m
VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN AL 95%:	0,3700	m		VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN	0,3000	m

F30900-

ANEXO S. Verificación de la exactitud absoluta (z) del bloque aerotriangulado 4 con DSM (filtro).

VERIFICACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DEL BLOQUE AEROTRIANGULADO

PROYECTO: 0

FACTOR DE ESCALA: 500 **GSD DEL PROYECTO:** 5 HOJA Nº _____ DE _____

EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS HORIZONTALES)										EXACTITUD EN POSICIÓN (COORDENADAS VERTICALES)			
No.	No. Modelo	No. Punto	Coor_Este Terreno	Coor_Norte Terreno	coor_Este Lectura modelo	coor_Norte Lectura modelo	dif_E	dif_N	(Xi) Error en Posición	No.	h_Terreno	h_modelo	Error en Cota (Z_i)
1		14_CH_57								1	2637,310	2637,346	0,036
2		20_CH_111								2	2652,779	2652,908	0,129
3		17_CH_60								3	2643,018	2643,058	0,040
4		19_CH_110								4	2649,828	2649,734	0,093
5		46_CH_113								5	2657,164	2656,999	0,165
6		34_CH_121								6	2648,467	2648,580	0,113
7		25_CH_100								7	2636,849	2636,905	0,056
8		44_CH_115								8	2659,219	2659,080	0,139
9		22_CH_106								9	2646,334	2646,353	0,019
10		41_CH_109								10	2653,266	2653,237	0,028
11		40_CH_108								11	2650,033	2650,081	0,048
12		26_CH_101								12	2636,983	2637,557	0,574
13		43_CH_116								13	2656,751	2656,973	0,222
14		42_CH_117								14	2655,338	2655,276	0,062
15		11_PIEDRA								15	2635,587	2635,553	0,034
16		27_CH_65								16	2636,698	2636,974	0,276
17		37_CH_118								17	2648,629	2649,167	0,537
18										18			
19										19			
20										20			
21										21			
22										22			
23										23			
24										24			
25										25			

RESULTADOS: PLANIMETRIA			OBSERVACIONES GENERALES	RESULTADOS: ALTIMETRIA		
NÚMERO DE PUNTOS (n) :	0	pts		NÚMERO DE PUNTOS (n) :	17	pts
MEDIA:	#¡DIV/0!	m		MEDIA:	0,151	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL PROYECTO:	#¡DIV/0!	m	El RMS esta por debajo del valor máximo permitido para la escala del producto cartografico esperado	ERROR MEDIO CUADRÁTICO DEL	0,22264	m
DESV. ESTÁNDAR:	0,000	m		DESV. ESTÁNDAR:	0,168	m
ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX. PERMITIDO:	0,150	m		ERROR MEDIO CUADRÁTICO MAX	0,150	m
PRECISIÓN AL 95%:	#¡DIV/0!	m	No cumple con la precisión	PRECISIÓN AL 95%:	0,436	m
VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN AL 95%:	0,3700	m		VALOR ACEPTABLE DE PRECISIÓN	0,3000	m

F30900-