MEDICIONES SOBRE ORTOFOTOS CON BASE EN VIDEOGRAMETRÍA UAV

PAOLA ANDREA MEJÍA ZULUAGA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
BOGOTÁ D.C.
2016

MEDICIONES SOBRE ORTOFOTOS CON BASE EN VIDEOGRAMETRÍA UAV

Paola Andrea Mejía Zuluaga

Cód. 20112032032

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al Grado de INGENIERA TOPOGRÁFICA bajo la dirección de:

William Barragán Zaque

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

BOGOTÁ D.C.

2016

Este trabajo hace parte de las investigaciones realizadas por la Facultad del Medio Ambiente - Bogotá, Universidad Distrital. Sin embargo, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente opiniones de la Universidad" (Artículo 117 del Acuerdo 029 de 1998).

CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 14

Capítulo 2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 16

Capítulo 3. MARCO TEÓRICO 19

3.1. SENSORES REMOTOS 19

3.2. FOTOGRAMETRÍA AÉREA 22

3.2.1. Estereoscopía 24

3.2.2. Tipos de fotografía aérea 25

3.3. FOTOGRAMETRÍA UAV 29

3.3.1. Parámetros del proyecto 29

3.3.2. Planeación del vuelo 30

3.3.3. Puntos de control 34

3.3.4. Procesamiento de información 35

3.3.5. Generación de superficies 37

3.3.6. Generación de ortofoto 38

3.4. VIDEOGRAMETRÍA 39

Capítulo 4. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS 41

4.1. UAV – PHANTOM 3 PROFESSIONAL 41

4.2. CÁMARA 42

4.3. GPS-RTK 44

Capítulo 5. VIDEOGRAMETRÍA UAV 45

5.1. METODOLOGÍA DEL PLAN DE TRABAJO 45

5.1.1. Determinación del área de estudio 47

5.1.2. Planeación del vuelo Videogramétrico 50

5.1.3. Planeación y posicionamiento de los GCP y los puntos de chequeo con GPS-RTK 65

5.1.4. Ejecución del vuelo 70

5.1.5. Procesamiento de la información 71

5.1.6. Producción de la ortofoto 79

Capítulo 6. ALGORITMO DE MEDICIÓN 81

6.1. PARÁMETROS 81

6.1.1. Distancia entre dos puntos 81

6.1.2. Corrección por distorsión de lentes 82

Capítulo 7. DISEÑO EXPERIMENTAL 85

Capítulo 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS 88

8.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO 1 Y EL MÉTODO 2 88

8.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO VIDEOGRAMÉTRICO ... 91

Capítulo 9. CONCLUSIONES 93

Capítulo 10. RECOMENDACIONES 95

Anexos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sensores activos y pasivos 20
Figura 2. Sensores Remotos en aeronaves y satélites 21
Figura 3. Métodos de medición de no contacto 22
Figura 4. Par estereoscópico de fotografías 24
Figura 5. (A) Fotografía muy oblicua, (B) Fotografía poco oblicua, (C) fotografía vertical y (D) Tipos de fotografía aérea, según orientación 25
Figura 6. Fotografía con orientación: (a) oblicua, (b) vertical 26
Figura 7. Parámetros de orientación interna y externa 28
Figura 8. Metodología Fotogrametría UAV 29
Figura 9. Esquema de un plan de vuelo 31
Figura 10. Esquema de recubrimiento longitudinal y transversal 33
Figura 11. Diseños de targets 34
Figura 12. Procedimiento extracción y emparejamiento de puntos 35
Figura 13. DSM, (a) malla creada a partir de la nube de puntos, (b) relieve de sombras, (c) DSM con la textura de la imagen 37
Figura 14. Modelo digital de elevación 38
Figura 15. Ejemplo Ortofoto 38
Figura 16. Flujo de trabajo Videogrametría 39
Figura 17. Componentes del proceso Videogramétrico 40
Figura 18. UAV Phantom 3 professional 42

Figura 19. Cámara Phantom 3 professional 43
Figura 20. GPS System 500 44
Figura 21. Propuesta metodológica para elaborar Videogrametría Uav 46
Figura 22. Mapa ubicación del área de estudio, (a) Bogotá - Colombia, (b) Localidad San Cristóbal – Bogotá, (c) Barrio San Cristóbal sur. 47
Figura 23. (a) Mapa ubicación área de estudio, barrio San Cristóbal sur, (b) área de estudio dentro del parque metropolitano san Cristóbal. 49
Figura 24. Diagrama de flujo, propuesta planeación vuelo Videogramétrico 51
Figura 25. Grilla de calibración 53
Figura 26. Reporte de calibración 56
Figura 27. Secuencia grilla de calibración Agisoft 57
Figura 28. Diseño del vuelo, del proyecto 64
Figura 29. Ubicación preliminar GCP del proyecto 65
Figura 30. Diseño del target 66
Figura 31. Ubicación preliminar de los puntos de chequeo del proyecto 67
Figura 32. Posición del sol, día 02 de Julio 70
Figura 33. Desarrollo de la línea de vuelo del proyecto 71
Figura 34. Herramienta " Video Frame Extractor” 72
Figura 35. Secuencia frames finales del proyecto, frame 1 – frame 15 73
Figura 36. Alineamiento de frames, nube de puntos dispersa 75
Figura 37. Nube de puntos dispersa 75
Figura 38. (a) Señalización GCP7 en el terreno, (b) Georreferenciación GCP 7 . 76
Figura 39. Asignación de coordenadas GCP 76

Figura 40. GCP sobre la nube de puntos densa 77

Figura 41. Modelo 3D del proyecto, (a) DSM con la textura de la imagen, (b) relieve de sombras, (c) malla creada a partir de la nube de puntos..... 78

Figura 42. DEM del proyecto..... 79

Figura 43. Ortofoto del proyecto..... 80

Figura 44. Diagrama de flujo, algoritmo de medición. 84

Figura 45. Toma de coordenadas en Agisoft, método 2 86

Figura 46. Aplicación del algoritmo, pareja aleatoria 6 – 73..... 87

Figura 47. Histograma de distribución, método 1..... 89

Figura 48. Histograma de distribución, método 2..... 89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de las fotografías aéreas 27

Tabla 2. Parámetros de la cámara y del vuelo 29

Tabla 3. Cálculo planeación del vuelo 32

Tabla 4. Especificaciones del UAV 42

Tabla 5. Especificaciones de la cámara 43

Tabla 6. Parámetros iniciales del proyecto 52

Tabla 7. Secuencia extracción de frames, grilla Photomodeler 55

Tabla 8. Resultados calibración Agisoft 57

Tabla 9. Porcentajes de solapamiento 60

Tabla 10. Planeación vuelo Videogramétrico del proyecto 63

Tabla 11. Coordenadas Bogotá-16, época 1995.4 67

Tabla 12. Coordenadas Bogotá-16, época 2016.6 68

Tabla 13. Cambio de época Coordenadas GCP y puntos de chequeo 69

Tabla 14. Prueba de normalidad, Kolmogorov-Smirnov 88

Tabla 15. ANOVA 90

Tabla 16. Estadísticas de precisión con las coordenadas 3D del proyecto. 92

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo GSD 32
Ecuación 2. Cálculo distancia en el terreno 32
Ecuación 3. Cálculo base aérea 32
Ecuación 4. Separación entre líneas de vuelo 32
Ecuación 5. Cobertura del modelo en el terreno 32
Ecuación 6. Tiempo de exposición 32
Ecuación 7. Número de líneas de vuelo 32
Ecuación 8. Cantidad de imágenes por línea de vuelo 32
Ecuación 9. Transformación de (X, Y, Z) a (xc, yc, zc) 36
Ecuación 10. Altura de vuelo proyecto 59
Ecuación 11. Tamaño de la imagen en el terreno del proyecto 60
Ecuación 12. Base aérea del proyecto 60
Ecuación 13. Separación entre líneas de vuelo del proyecto 61
Ecuación 14. Intervalo de extracción del proyecto 61
Ecuación 15. Número de líneas de vuelo del proyecto 62
Ecuación 16. Número de frames por línea de vuelo del proyecto 62
Ecuación 17. Cálculo distancia métrica euclidiana 81
Ecuación 18. Cálculo posición relativa de los puntos 82
Ecuación 19. Cálculo distancia radial 82
Ecuación 20. Polinomio de distorsión radial 83

Ecuación 21. Cálculo de la corrección de la distancia en “x” y en “y”. 83

Ecuación 22. Cálculo de las coordenadas finales corregidas 83

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Calibración de la cámara con Photomodeler scanner

Anexo 2. Calibración de la cámara con Agisoft PhotoScan

Anexo 3. Mapa – Ubicación GCP y puntos de chequeo (CP)

Anexo 4. Seguimiento GCP

Anexo 5. Mapa distribución de la población

Anexo 6. Algoritmo de medición

RESUMEN

Este trabajo de grado, presenta una propuesta y posterior implementación, de una metodología para la elaboración de productos cartográficos (ortofoto), a partir de la Videogrametría Uav; además de ello, tiene como objetivo realizar un algoritmo, que calcula la distancia entre dos puntos con una corrección por distorsión de lentes, sobre una ortofoto producida por esta técnica cartográfica alternativa; finalmente se realiza un contraste entre la metodología tradicional, y la metodología propuesta en este trabajo.

Los métodos utilizados para comprobar la eficiencia del algoritmo, son el GPS-RTK como una técnica tradicional, y la Videogrametría Uav como una nueva alternativa para el diseño de mapas y modelos 3D.

ABSTRACT

This thesis presents a proposal and subsequent implementation of a methodology for developing cartographic products (orthophoto) from the Uav Videogrammetry; in addition, it aims to make an algorithm that calculates the distance between two points with a lens distortion correction on an orthophoto produced by this alternative cartography technique; finally is made a contrast between the traditional methodology and the methodology proposed in this paper.

The methods used to check the efficiency of the algorithm, are GPS-RTK as a traditional technique, and Uav Videogrammetry as a new alternative for the design of maps and 3D models.

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se ha hecho necesaria la investigación y profundización, acerca de nuevos procesos para la toma de información y la posterior representación de una superficie, la cual implica un alto grado de precisión, así como también, una reducción en tiempo. Uno de estos nuevos desarrollos, es la Videogrametría, la cual permite la representación de un terreno o de una superficie 3D en una forma no contacto, utilizando como insumo principal, la extracción de *frames* (fotograma, es cada imagen que compone una secuencia de video) a partir de un video.

El presente trabajo de grado, expone una investigación acerca de la implementación de un algoritmo que permita realizar mediciones sobre ortofotos, que hayan sido procesadas a partir de técnicas Videogramétricas, y analizar la precisión del mismo, en contraste con técnicas tradicionales como el GPS-RTK (Sistema global de posicionamiento – Navegación cinemática satelital); así mismo, también se pretende proponer una metodología orientada a la Videogrametría Uav (Uav - Vehículo aéreo no tripulado), presentada por primera vez, en este trabajo.

Se pretende demostrar, si la Videogrametría Uav es una técnica apropiada para la producción de trabajos cartográficos, y además de ello, si un algoritmo que calcula la distancia y la corrección por distorsión de lentes entre dos puntos, es apropiado para la toma de medidas sobre ortofotos, basadas en esta técnica.

Este trabajo, se desarrolla en 9 capítulos, que contemplan la implementación y análisis de todos los objetivos propuestos. Los capítulos 2 y 3, describen los avances y las bases teóricas que maneja la Videogrametría al día de hoy; el capítulo 4 por otra parte, describe la tecnología utilizada respecto al Uav, la cámara y el GPS-RTK; el capítulo 5, describe la metodología propuesta, para realizar Videogrametría Uav, y al mismo tiempo, muestra el paso a paso y el resultado de la primera aproximación de un vuelo bajo la técnica Videogramétrica, realizado en el parque metropolitano San Cristóbal, en la ciudad de Bogotá - Colombia; las bases teóricas y los cálculos realizados por el algoritmo, se presentan en el capítulo 6.

Finalmente, el diseño del experimento para analizar el algoritmo, el análisis de resultados y las conclusiones, se encuentran en los capítulos 7, 8 y 9 respectivamente.

La finalidad de complementar el desarrollo de esta técnica, es que sea posible realizar la misma tarea sólo con un proceso en campo, el cual permita reducir el tiempo de captura de datos. De esta forma se puede ofrecer un producto final, económico y de alta precisión.

Capítulo 2.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

A nivel nacional, existe una investigación realizada por Díaz et.al., (2006), titulada: “Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones, CineMED”; este trabajo, desarrolló un programa el cual, por medio de la videogrametría detecta los marcadores de un modelo humano en marcha y grafica los valores de los ángulos articulares de los miembros inferiores. Este trabajo se relaciona con la investigación, porque constituye la primera aproximación publicada, de la videogrametría en Colombia.

En el ámbito internacional, se encuentran varias investigaciones en el campo de la videogrametría terrestre, más orientadas al área de la geomática; un gran ejemplo de ello es una revisión realizada por Gruen, (1997) con un trabajo titulado: “Fundamentos de videogrametría”, donde relaciona las bases teóricas de la técnica, el desarrollo que ha tenido la misma con las cámaras-CCD, los algoritmos necesarios para la elaboración de productos Videogramétricos y un ejemplo de la aplicación de la técnica en la determinación del movimiento humano, con ayuda de aplicaciones biomecánicas. Con este trabajo, Armin Gruen concluye que la videogrametría es una excelente técnica para desarrollar productos tanto con objetos en movimiento como con objetos estáticos.

Un segundo trabajo de Black & Pappa (2003), se denomina: “Videogrametría con el uso de objetos circulares proyectados”, se trata del seguimiento que se le puede realizar a un objeto por medio de puntos con identificación conocida, llamados *targets*, en el proceso, dichos *targets* pueden ser más eficientes si tienen una forma circular, y son reflectivos; el estudio arroja como resultado; que los puntos de control con esas características, son capaces de seguir una secuencia tridimensional la cual ayuda a la correcta proyección de todos los puntos con la videogrametría. El aporte más importante de esta publicación, hacia el presente trabajo, es el desarrollo y manejo de targets enfocados en la presente técnica.

Leifer et al., (2011) publicaron un trabajo llamado: “Medición de la aceleración en 3 dimensiones, usando un seguimiento de datos Videogramétricos”, donde el objetivo principal fue comparar el análisis de la velocidad en un eje rodante, con *targets* sobrepuestos, a partir de dos métodos; el primer método fue la videogrametría, y el segundo fue el cálculo de los puntos con acelerómetro; el resultado, fue una coincidencia de métodos del 68.3%. De este trabajo se analiza la metodología empleada para la adquisición de los modelos 3D.

Brilakis et al., (2011) realizaron una investigación titulada: “Reconstrucción progresiva 3D de estructuras con videogrametría”, en este trabajo se presenta un marco metodológico para la adquisición de datos espaciales de infraestructura, por medio de videogrametría; el experimento allí contenido, representa la reconstrucción 3D de todas las tomas realizadas, para reconstruir por completo una infraestructura. Esta investigación le aporta a este proyecto de grado, una

descripción general de la metodología usada, para la adquisición y procesamiento de información Videogramétrica.

Herráez et al., (2013), realizaron un trabajo denominado: “Diseño y calibración de un sistema de modelamiento 3D, con videogrametría”, en este trabajo se desarrolló una plataforma giratoria, que permite (mediante un sistema integrado de cámaras) hacer la reconstrucción del objeto contenido en ella, con base en una metodología Videogramétrica. Este trabajo ha sido de gran importancia para esta investigación, porque ofrece las pautas de calibración y orientación de cámaras para procesamientos con video.

Otro trabajo representativo, es el realizado por Liu et al., (2015) denominado: “Técnica Videogramétrica, para la medición del colapso progresivo de estructuras en 3D”, donde el objetivo principal fue realizar un seguimiento al colapso progresivo de una estructura de 5 pisos con marco reforzado; como resultado se obtuvo una precisión de 0.61 mm, 0.29 mm y 0.62 mm para X, Y y Z respectivamente; concluyendo así, que la videogrametría es una técnica alternativa para monitorear el colapso de estructuras. Este trabajo, aporta un nuevo desarrollo metodológico y complementario para la implementación de la videogrametría.

Todas las investigaciones aquí mencionadas, hacen parte de una revisión de antecedentes realizada por el autor de este trabajo, las cuales no constituyen el universo total de información publicada acerca de este tema; si no que han sido de mayor relevancia para la orientación de este proyecto de grado.

Capítulo 3.

MARCO TEÓRICO

3.1. SENSORES REMOTOS

El hombre ha tenido la necesidad de documentar el espacio a su alrededor, y por ello, ha perfeccionado técnicas para representar el mundo. Una de estas técnicas son los Sensores Remotos; cuya función principal es medir y adquirir información de una forma no contacto, acerca de un objeto, elemento o material que se encuentre sobre la superficie terrestre (Khorram et al., 2012).

Según González Iturbe Ahumada (2004), los sensores remotos se definen como "Una tecnología basada en el muestreo de la energía electromagnética reflejada o emitida por los diferentes tipos de cobertura terrestre".

La transferencia de energía electromagnética por radiación, es de gran importancia para los Sensores Remotos porque se basa en la teoría ondulatoria de luz. Las ondas captadas por los sensores son, las ondas muy cortas (10^{-7} mm), los rayos X, 30 km (10^{3} m) y todas las siguientes hasta las ondas de radio (González Iturbe Ahumada, 2004); dentro de ellas, las dos regiones más importantes para el espectro son la visible (0.39 µm – 0.78 µm, 1 µm = 10^{-3} µm) y el infrarrojo (Cercano 0.7-0.9 µm y térmico 3-14 µm) (Hernández López, 2006). Todos los objetos tienen diferentes niveles de radiación electromagnética, lo que

permite analizar los aspectos de la radiación absorbida, transmitida o reflejada, de acuerdo a los valores de longitud de onda de cada uno (González Iturbe Ahumada, 2004).

Los sensores pueden clasificarse en activos y pasivos de acuerdo con la forma en que capturan la energía (figura 1), donde los activos se caracterizan porque emiten energía propia, y capturan la energía reflejada por la superficie terrestre (Gregersen, s.f.); por otra parte, los sensores pasivos trabajan con fuentes de iluminación externa (generalmente luz solar); un ejemplo de este tipo de sensores son las cámaras fotográficas, que debido a su gran avance, pueden ser usados desde restitución fotogramétrica, hasta estudios de medio ambiente (Grupo PR, 2009).

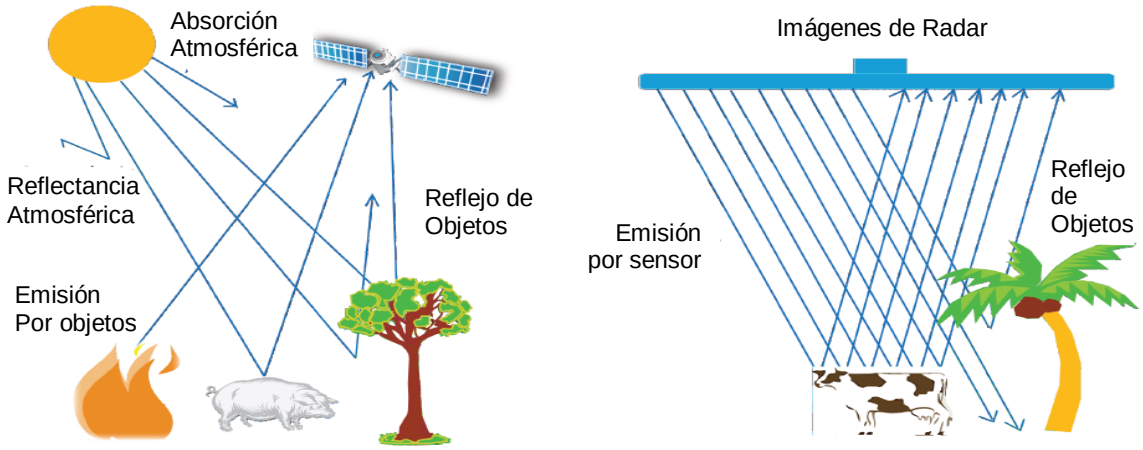


Figura 1. Sensores activos y pasivos

Fuente: Adaptado de: (Grupo PR, 2009)

Todos los sensores, ya sean activos o pasivos, utilizan diferentes tipos de plataformas para realizar la captura de información, las plataformas convencionales son: las aeronaves y los satélites (Levin, 1999) (figura 2). Sin embargo, hoy en día existen nuevas tecnologías, un ejemplo de ello es el UAV, el cual ofrece una nueva gama de ventajas asociadas a la cartografía, como el bajo costo del proyecto y la capacidad de volar sobre zonas peligrosas y de difícil acceso, entre otras (Vollgger & Cruden, 2016).



Figura 2. Sensores Remotos en aeronaves y satélites

Fuente: Adaptado de: (Siamak Khorram, 2012)

Dentro de las técnicas de no contacto, asociadas a los sensores remotos, también se encuentran los mapas, los Sistemas de Información Geográfica, el sonar, la fotogrametría aérea y recientemente la Videogrametría (figura 3).

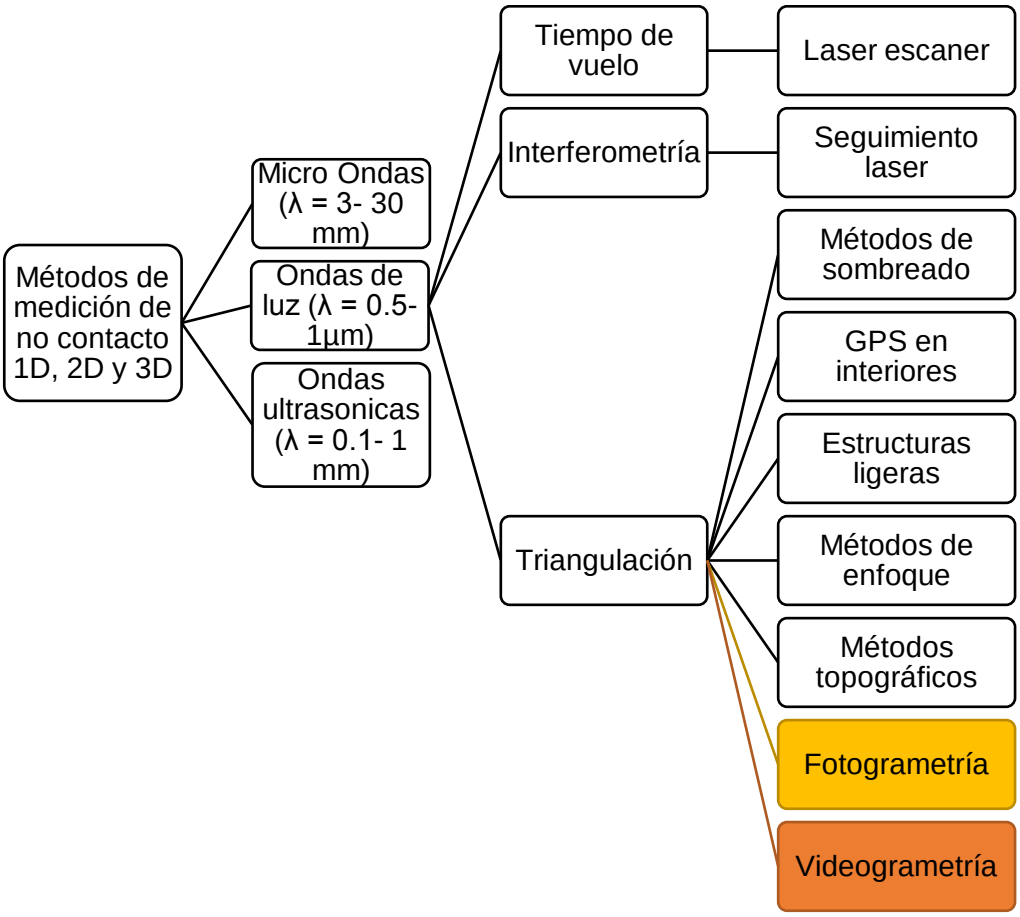


Figura 3. Métodos de medición de no contacto

Fuente: Adaptado de: (Luhmann et al., 2006)

3.2. FOTOGRAMETRÍA AÉREA

La fotografía aérea nace alrededor del año de 1840 con el uso del globo aerostático, el cual sería reemplazado luego por aeronaves; esta técnica continuó su perfeccionamiento en la primera y segunda guerra mundial. A partir de las cuales se adaptó al uso de la representación geográfica de la tierra y la medición

de la misma, sin necesidad de tener contacto directo con el objeto de estudio por medio de una aeronave (Linder, 2003).

De acuerdo con la ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), la fotogrametría es “El arte, la ciencia y la tecnología de obtener información fiable sobre los objetos físicos y el medio ambiente a través de procesos de grabación, medición e interpretación de las imágenes fotográficas y los patrones grabados de la radiación de energía electromagnética y otros fenómenos”. Las técnicas fotogramétricas pueden aplicarse de forma terrestre o aérea.

Con los nuevos avances de la tecnología, nace la fotogrametría digital; en la cual, las imágenes son capturadas y almacenadas en los sensores electrónicos de las cámaras, lo que hace prescindible la impresión y posterior escaneo de las fotografías con técnicas análogas.

Dichas imágenes digitales, están compuestas por una matriz de pixeles que son identificados por números digitales, en valores de escala de grises o en valores RGB (Hernández López, 2006); para su apropiada obtención, es importante tener en cuenta la resolución espacial, en la cual es posible determinar el valor del GSD; la resolución espectral, para la definición de las bandas espectrales; la resolución radiométrica, para determinar la sensibilidad del sensor; y por último, la resolución temporal que determina la frecuencia de captura de las imágenes (Perez, 2007).

3.2.1. Estereoscopía

La visión estereoscópica, es una habilidad que tiene todo ser humano para enfocar un elemento (con ambos ojos), y percibir la profundidad y tamaño del mismo; lo cual, da la impresión de un espacio tridimensional con la apreciación de dos diferentes perspectivas (Caire Lomeli, 1977). Esta misma visión, se puede desarrollar de una forma artificial, apoyada por mecanismos ópticos como el estereoscopio de espejos; con el cual se puede observar una imagen 3D, generada a partir de la zona en común de un par estereoscópico de fotografías. Sin embargo, hoy en día los pares de imágenes, son analizados y procesados en centros de cómputo en forma digital.

En consecuencia, un requisito básico para ejecutar un proyecto fotogramétrico, es que se cumpla el principio de la estereoscopía, en el cual debe existir mínimo un par de imágenes con una zona en común en el terreno (figura 4) captadas desde dos puntos diferentes (Santamaría Peña & Sanz Méndez, 2011).

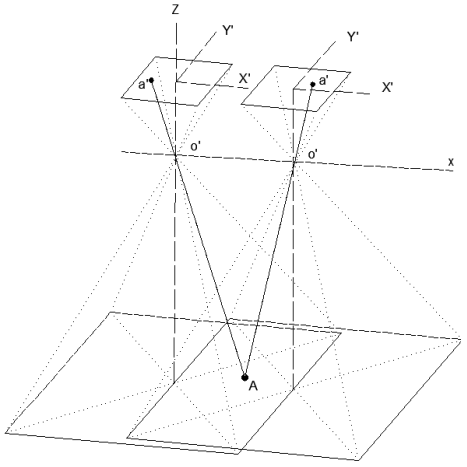


Figura 4. Par estereoscópico de fotografías

Fuente: Adaptado de: (Linder, 2003)

3.2.2. Tipos de fotografía aérea

Las fotografías aéreas pueden ser muy oblicuas, poco oblicuas o verticales, como se muestra en la figura 5.

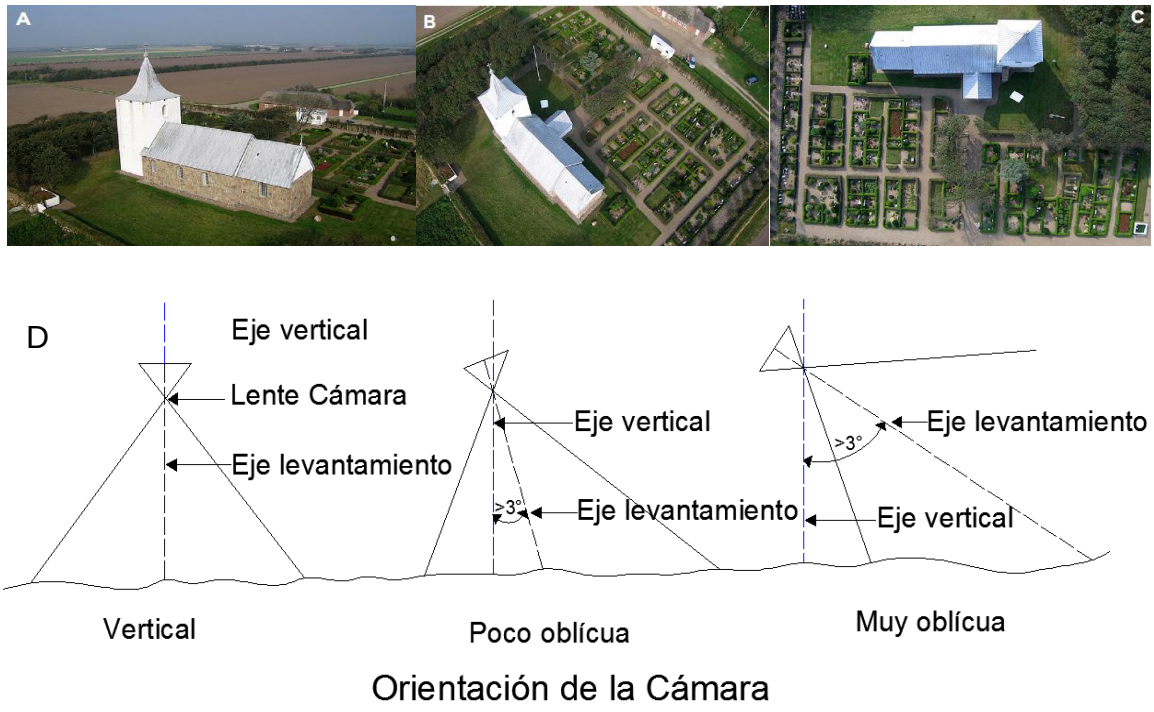


Figura 5. (A) Fotografía muy oblicua, (B) Fotografía poco oblicua, (C) fotografía vertical y (D) Tipos de fotografía aérea, según orientación,

Fuente: Adaptado de: (A – C): (Aber et al., 2010), (D): (Wolf & Dewitt, 2000)

Las fotografías oblicuas (figura 6.a), se utilizan para asuntos de importancia inmediata, como los desastres naturales, el reconocimiento militar, entre otros; este tipo de proyectos no requiere un diseño y planeación de vuelo tan exhaustivo como los proyectos de fotografías verticales, dada su naturaleza de acción inmediata a la hora de la captura de información (Graham & Koh, 2002).

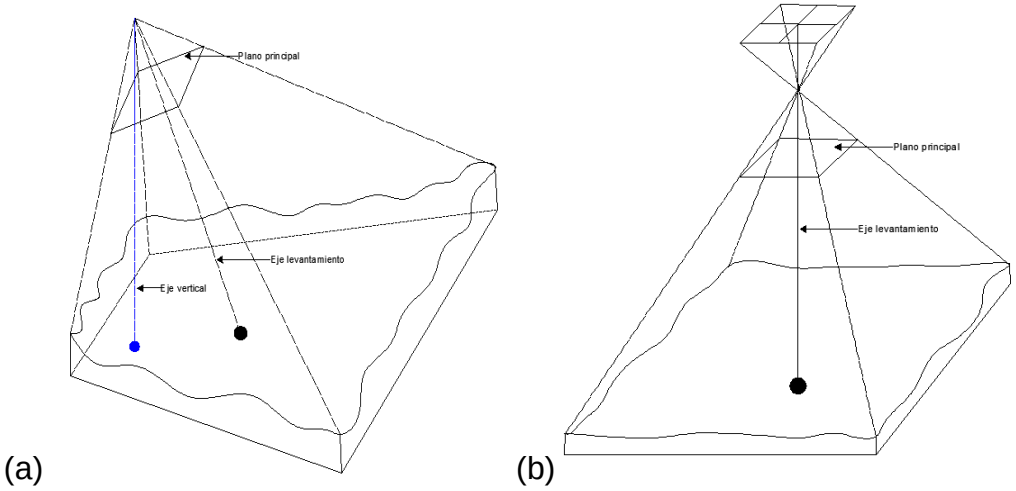


Figura 6. Fotografía con orientación: (a) oblicua, (b) vertical

Fuente: Adaptado de: (Wolf & Dewitt, 2000)

Por otra parte, las fotografías verticales (figura 6.b), conservan teóricamente el eje óptico de la cámara lo más vertical posible, para conservar la ortogonalidad entre el plano del terreno y el plano de la cámara. La diferencia principal entre las fotografías verticales y oblicuas, es que en las fotografías oblicuas el ángulo de separación entre el eje vertical y el eje de levantamiento es mayor a 3°, mientras que las fotografías verticales conservan un ángulo mejor o igual a 3° (Santamaría Peña & Sanz Méndez, 2011).

A continuación en la tabla 1, se resumen las principales características de los tipos de fotografías aéreas.

Tabla 1. Características de las fotografías aéreas

Fuente: Adaptado de (Mengual, n.d.)

CARACTERÍSTICAS	**VERTICAL**	**OBLICUA BAJA**	**OBLICUA ALTA**
Inclinación	< 3°	Sin horizonte en la foto	Con horizonte en la foto
Área fotografiada	Muy pequeña	Pequeña	Grande
Forma del área fotografiada	Rectangular	Trapezoidal	Trapezoidal
Escala	Uniforme para un plano horizontal	Decrece desde el primer plano hacia el fondo	Decrece desde el primer plano hacia el fondo
Ventaja	Fácil de mapear	Mayor área cubierta	Económica con gran cobertura
Uso más frecuente	Fotogrametría y fotointerpretación	Fotogrametría	Fotointerpretación y estudios geológicos

La geometría de las fotografías verticales, consta de 6 parámetros de orientación exterior y 3 de orientación interior (figura 7), (Graham & Koh, 2002).

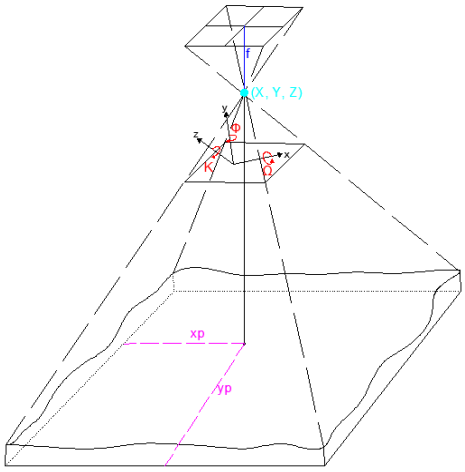


Figura 7. Parámetros de orientación interna y externa

Fuente: Adaptado de (Hernández López, 2006)

La orientación interna (OI), busca reconstruir los haces de luz que convergen en el centro de la imagen, esta orientación se compone por la distancia focal (f) y los puntos principales de la imagen (Xp y Yp). Por otro parte, la orientación externa (OE), busca posicionar correctamente los haces de luz de la imagen, respecto a un sistema de referencia en el terreno; los parámetros de esta orientación son: los centros ópticos de la posición espacial de cada cámara (X, Y, Z) y la orientación espacial del plano focal de la imagen (Ω, Φ, K), (Wolf & Dewitt, 2000).

La geometría de las fotografías verticales consta de 9 elementos, 6 de orientación exterior, (que es la relación que guarda la cámara con el espacio a su alrededor, o sea son los parámetros espacial que tiene la cámara cuando captura las imágenes); y 3 de orientación interior que son parámetro propios de la cámara, los cuales muestran la posición espacial de la perspectiva central de la misma.

3.3. FOTOGRAMETRÍA UAV

La fotogrametría Uav, es una técnica que se encuentra en avance; por lo cual, su metodología presenta variaciones entre cada investigador. Sin embargo, la técnica maneja los mismo principios básicos y procedimientos a gran escala, como los expuestos por (Eisenbeiß, 2009; Fernández-Hernández et al., 2015; Remondino et al., 2012; Saadatseresht et al., 2015).

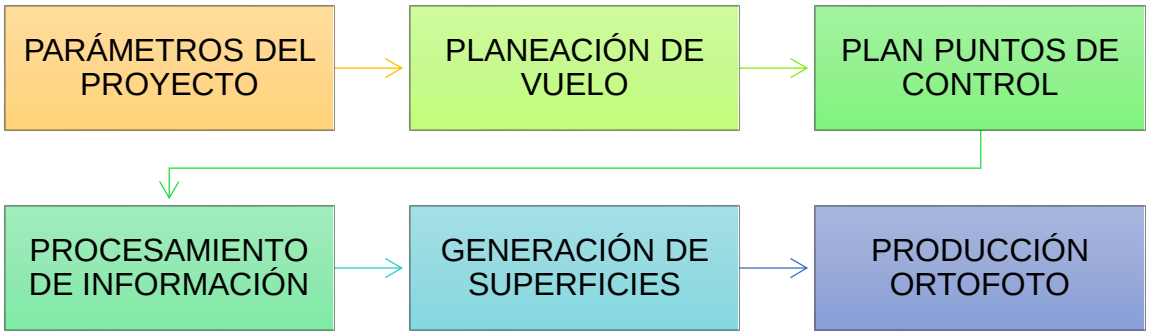


Figura 8. Metodología Fotogrametría UAV

3.3.1. Parámetros del proyecto

Antes de realizar la planeación del vuelo, es importante definir los parámetros iniciales como: las especificaciones de la cámara, el sistema de coordenadas, los límites del área de estudio, entre otros; (Eisenbeiß, 2009).

Tabla 2. Parámetros de la cámara y del vuelo

CÁMARA	Largo de la imagen (px)	$Largo_{imagen}$
	Ancho de la imagen (px)	$Ancho_{imagen}$
	Tamaño del sensor (mm)	$Tamaño_{sensor}$
	Distancia focal (mm)	f

SUPERFICIE UAV	Altura de vuelo (m)	*H*
	GSD Ground Sample Distance (cm/px)	*GSD*
	Traslapo longitudinal (%)	*p (%)*
	Traslapo transversal (%)	*q (%)*
	Velocidad horizontal de vuelo (m/s)	*v*

Para realizar ese tipo de levantamientos, se debe contar con los siguientes insumos: cámara digital, UAV, planeación en tierra y personal especializado (Niño Chicho, 2008).

3.3.2. Planeación del vuelo

La planeación del vuelo es un paso de gran importancia, debido a que determina las acciones inherentes al trabajo de campo y a los resultados que se obtienen a partir de éste; este paso metodológico está encaminado a definir la cobertura de cada imagen sobre el terreno, el diseño de las líneas de vuelo y todo lo que esto trae consigo. La planeación requiere de una visita previa al sitio de estudio o la revisión de un mapa actualizado de la zona (Fernández-Hernández et al., 2015).

Para garantizar la estereoscopía, es necesario tener un recubrimiento de ambas fotografías; el porcentaje de recubrimiento longitudinal "*p*", va desde el 60% hasta el 90% (Santamaría Peña & Sanz Méndez, 2011).

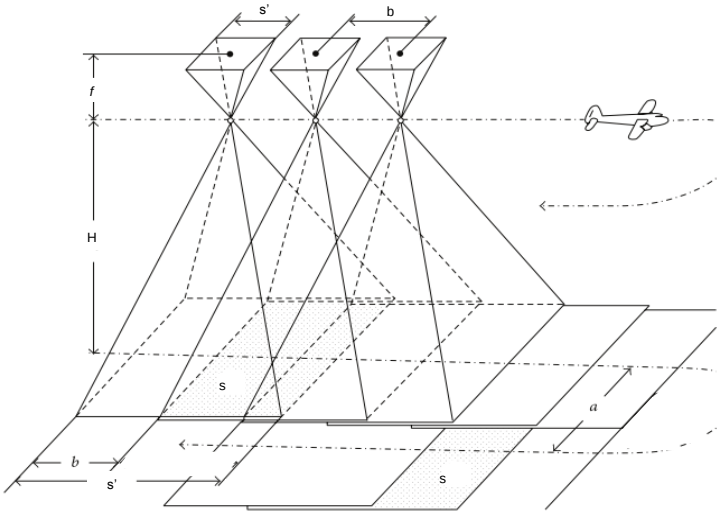


Figura 9. Esquema de un plan de vuelo

Fuente: Adaptado de: (Suziedelyte Visockiene et al., 2016)

En la figura 9, se pueden observar los componentes de un vuelo aéreo; *s* es el tamaño de la imagen en el terreno, *s'* es el ancho de la imagen en pixeles, *p* es el traslapo longitudinal que se debe asegurar en un modelo, *q* es el traslapo transversal, *b* es la base tomada entre las imágenes, *a* es la distancia entre líneas de vuelo, *f* es la distancia focal, *H* es la altura de vuelo.

En la tabla 3, se presentan los cálculos y ecuaciones necesarias para realizar la planeación, teniendo en cuenta todos los parámetros iniciales.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
GSD (Ground Sample Distance)	Corresponde a la distancia que abarca cada pixel en el terreno (Vollgger & Cruden, 2016), y se expresa en centímetros por pixel (cm/px).	$GSD = \frac{H * Ancho_{sensor}}{Ancho_{imagen} * f}$ *Ecuación 1. Cálculo GSD*
Cobertura de imagen	Está dada por la relación que existe entre el producto entre la distancia tomada en la imagen y la altura de vuelo; y la distancia focal.	$s = \frac{s' * H}{f}$ *Ecuación 2. Cálculo distancia en el terreno*
Base aérea (*b*)	Es la distancia que existe entre cada exposición de la cámara, expresada en metros (figura 10).	$b = s\left(1 - \frac{p}{100}\right)$ *Ecuación 3. Cálculo base aérea*
Separación entre líneas de vuelo (*a*)	Es la distancia en metros, que existe entre cada trayecto del uav, se calcula partiendo de los centros de las imágenes y permite garantizar el recubrimiento entre fajas (figura 10).	$a = s\left(1 - \frac{q}{100}\right)$ *Ecuación 4. Separación entre líneas de vuelo*
Huella en el terreno	Es la distancia cubierta por cada modelo en el terreno, a lo largo y ancho del mismo.	$Ancho_{huella} = \frac{GSD\ (\frac{cm}{px}) * Ancho_{video}(px)}{100}$ *Ecuación 5. Cobertura del modelo en el terreno*
Intervalo de exposición	Representa el tiempo (segundos), en el cual es tomada cada imagen.	$t = \frac{b}{v}$ *Ecuación 6. Tiempo de exposición*
Número de líneas de vuelo	Está dado por la relación entre el ancho del área de estudio y la separación que existe entre las líneas de vuelo.	$NLV = \frac{Ancho\ del\ terreno}{a}$ *Ecuación 7. Número de líneas de vuelo*
Número de imágenes de vuelo	Es la relación entre el largo del área de estudio y la base aérea.	$Número\ de\ imagenes\ por\ linea = \frac{Largo\ del\ terreno}{b}$ *Ecuación 8. Cantidad de imágenes por línea de vuelo*

Tabla 3. Cálculo planeación del vuelo

Donde,

f, es la distancia focal

H, es a altura de vuelo

s, es la distancia en el terreno, abarcada por cada fotografía.

s', es la distancia en la imagen.

b, es la base aérea

p, es el porcentaje de traslapo longitudinal al tanto por uno.

a, es la distancia entre líneas de vuelo.

q, es el porcentaje de traslapo transversal al tanto por uno.

t, es el tiempo de exposición de cada imagen.

v, es la velocidad del UAV expresada en metros por segundo (m/s).

NLV, es la cantidad de líneas de vuelo.

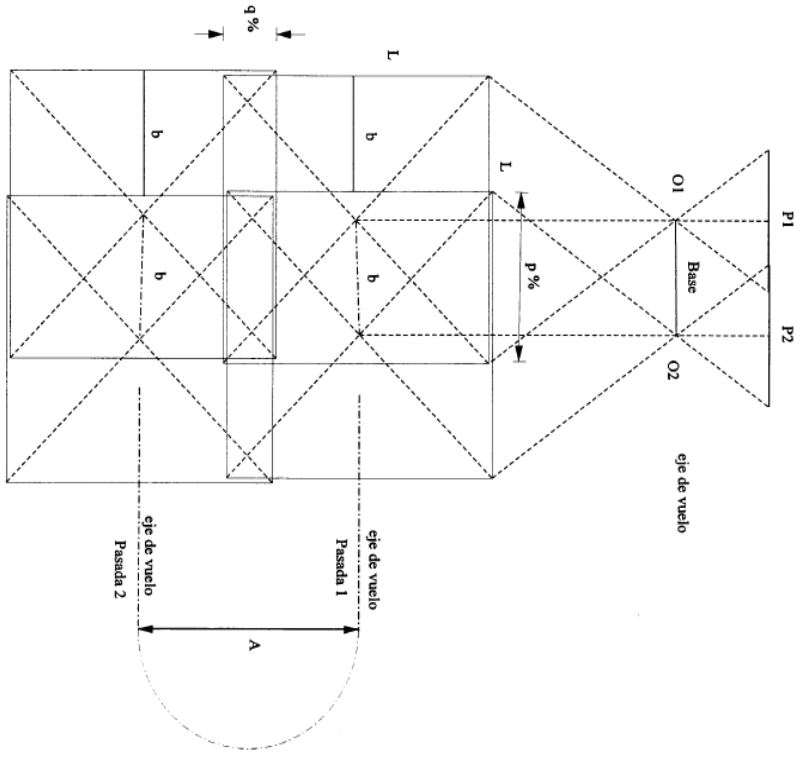


Figura 10. Esquema de recubrimiento longitudinal y transversal (Linder, 2009)

3.3.3. Puntos de control

Un punto de control sobre tierra (GCP – Ground Control Point) es un objeto que se puede identificar en una serie de imágenes y cuenta con coordenadas conocidas (Linder, 2003). El posicionamiento se realiza mediante instrumentos topográficos convencionales, como las estaciones totales, GPS y GPS-RTK (Real Time Kinematic Global Position System); éste último es utilizado en estudios de fotogrametría UAV (Ruzgienė et al., 2015), (González-Jorge et al., 2014), entre otros.

Para la fotogrametría UAV, la cantidad de puntos de control por área, no está aún definida (según la investigación realizada por el autor de este trabajo), sin embargo, investigadores como Tahar (2013), han realizado pruebas pilotos de estudios aéreos con 4, 6 y 9 GPC; Ruzgienė et al., (2015) recomienda que la cantidad de GCP no sea inferior a 5 puntos distribuidos de manera uniforme. Estos puntos pueden ser de control vertical, horizontal o ambos, y pueden ser identificados mediante targets (figura 11) o puntos de quiebre.

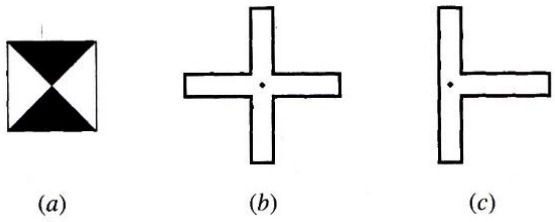


Figura 11. Diseños de targets

Fuente: Adaptado de: (Wolf & Dewitt, 2000)

3.3.4. Procesamiento de información

La información de campo, se procesa para unificar y orientar las imágenes obtenidas, en un sistema de coordenadas conocidas y construir un producto cartográfico.

3.3.4.1. Extracción y emparejamiento de puntos

El proceso de extracción y emparejamiento se realiza mínimo en un modelo, con el fin de encontrar puntos homólogos en cada imagen por medio de un algoritmo de correspondencia que extrae un objeto detector y un objeto descriptor (Brilakis et al., 2011), (figura 12). La correspondencia es efectuada mediante el cálculo del vecino más cercano en pixeles (Bay et al., 2008), con algoritmos como SURF (Speeded-Up Robust Features: Bay et al., 2008), y SIFT (Scale-Invariant Feature Transform: Lowe, 1999).

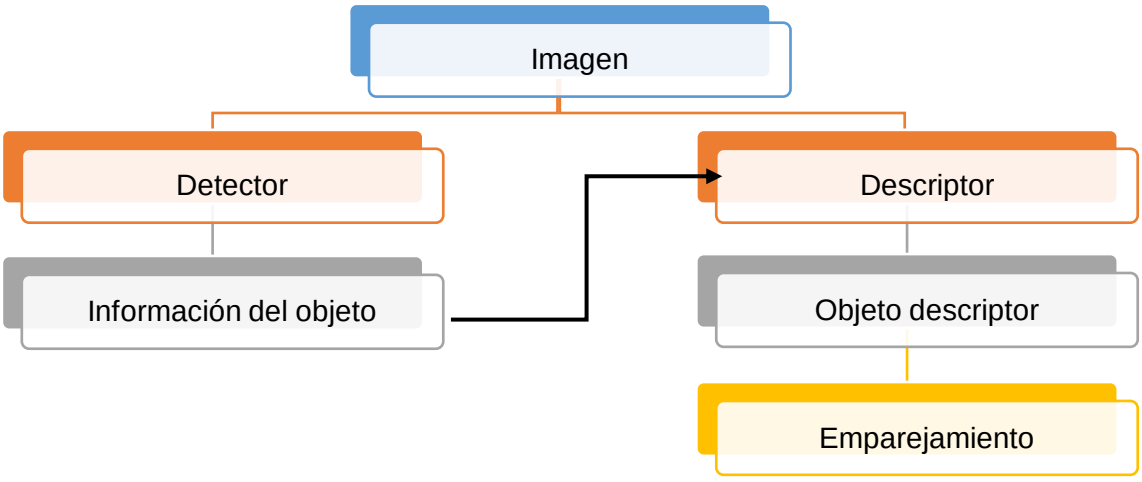


Figura 12. Procedimiento extracción y emparejamiento de puntos

Fuente: Adatado de: (Brilakis et al., 2011)

3.3.4.2. Orientación de imágenes

La finalidad de la orientación de las imágenes, es definir la posición exacta de todas las fotografías que cubren un terreno delimitado, con un sistema de coordenadas determinado (Linder, 2003).

- Calibración De La Cámara

La calibración se realiza para conocer la orientación interna y externa de la cámara, la cual sirve para reconstruir el momento espacial en el cual fue tomada cada imagen; la calibración se aplica para cámaras métricas y no métricas. A continuación se señala el método Heikkila y Silven, expuesto por (Oniga & Diac, 2013), para calibración de cámaras no métricas.

Heikkila & Silvén, (1997), señalan que debe realizarse una transformación y rotación espacial de las imágenes, por medio de una transformación linear directa (DLT – Direct linear transformation) que fue desarrollada por (Abdel-Aziz et al., 2015).

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = R\left\{\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{21} & r_{21} \\ r_{31} & r_{31} & r_{31} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + T\left\{\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (m)\right.\right.$$

Ecuación 9. Transformación de (X, Y, Z) a (xc, yc, zc)

Donde,

R, es una matriz ortogonal de rotación

T, es un vector de translación

Por otra parte, debe realizarse el ajuste de bundle (Bundle Adjustment Method) para hacer la reconstrucción de las coordenadas 3D de la orientación exterior

(Anai et al., 2014), para así, realizar una triangulación y conocer las coordenadas de nuevos puntos desconocidos (Luhmann et al., 2006); este ajuste está basado en la condición de colinealidad.

3.3.5. Generación de superficies

El DSM (Dense Surface Model – Modelo de superficie densa), es una representación 3D del área de estudio, que es posible calcular a partir del algoritmo SGM (Semi-global matching), con el cual se podrá obtener una resolución por pixel equivalente al valor del GSD.

El DSM es usado para construir el orto mosaico, y la información puede ser exportada en formato Geotiff de 32 u 8 bits (Gonçalves & Henriques, 2015).

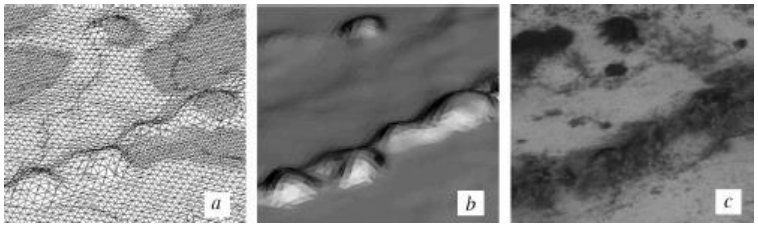


Figura 13. DSM, (a) malla creada a partir de la nube de puntos, (b) relieve de sombras, (c) DSM con la textura de la imagen

Fuente: Adaptado de: (Gonçalves & Henriques, 2015)

También es posible realizar un DEM (Digital elevation model – Modelo digital de elevación), el cual permite analizar la variación de alturas de un terreno. Este modelo es calculado a partir del algoritmo de reconstrucción de múltiples vistas, aplicado para producir una malla de polígonos en 3D que opera los valores de pixel para reproducir la geometría (Ryan et al., 2015).

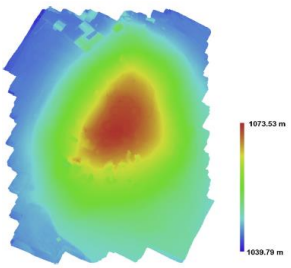


Figura 14. Modelo digital de elevación

Fuente: Adaptado de: (Uysal, Toprak, & Polat, 2015)

3.3.6. Generación de ortofoto

La ortofoto describe de una forma ortogonal, los objetos y superficies contenidas en un terreno; este producto puede ser utilizado como mapa topográfico (Wolf & Dewitt, 2000). Esta representación, es realizada mediante una rectificación diferencial, donde cada punto es proyectado individualmente de acuerdo a las coordenadas del mismo, dentro del área de interés; luego se define el factor de escala, el valor del ancho de la grilla, se calcula la correspondencia del valor en Z, y por último se calculan las coordenadas de la imagen (Luhmann et al., 2006).



Figura 15. Ejemplo Ortofoto

Fuente: Adaptado de: (Suziedelyte Visockiene et al., 2016)

3.4. VIDEOGRAMETRÍA

La Videogrametría es una técnica derivada de la fotogrametría, basada en la toma de información desde un modo no contacto, que permite registrar una gran cantidad de frames para post procesar y recrear superficies a gran escala (Hobbs et al., 2007); el insumo principal, es una grabación de video que permite ser desfragmentada en una serie de frames, planificados con anterioridad (Gruen, 1997).

Esta técnica tiene aplicaciones como, reconstrucción de estructuras, arqueología, estudio de movimientos humanos, entre otros. Dado que esta técnica se encuentra en desarrollo, algunos investigadores como (Hu et al., 2012) han propuesto la siguiente metodología (figura 16).



Figura 16. Flujo de trabajo Videogrametría

Fuente: Adaptado de: (Hu et al., 2012)

Los principales componentes de la Videogrametría, se encuentran divididos en 3 grandes grupos; la adquisición, el procesamiento y la salida de información (figura 20).

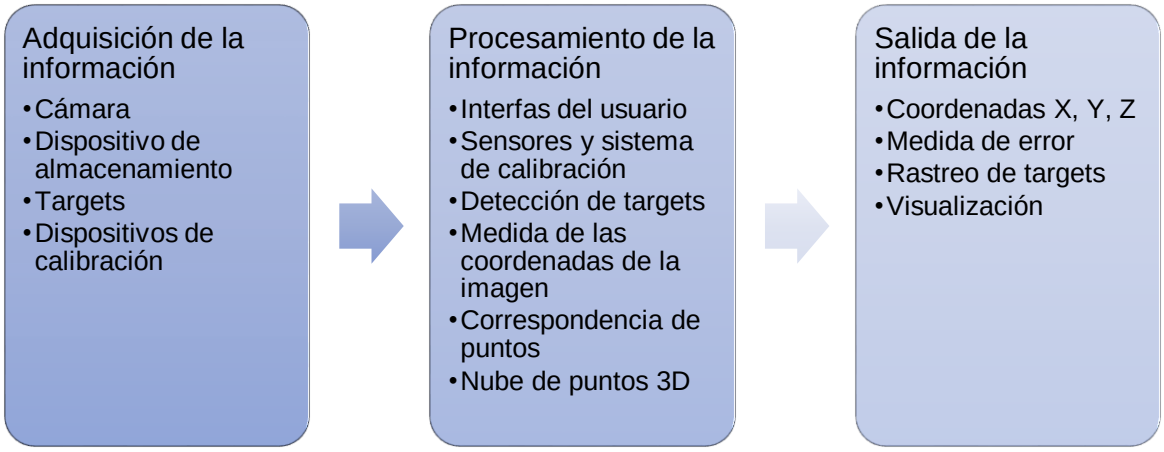


Figura 17. Componentes del proceso Videogramétrico

Fuente: Adaptado de: (Gruen, 1997)

Dentro del proceso Videogramétrico, es importante tener bajo control, los parámetros de la calibración de la cámara, y la distorsión radial. La cámara debe tener una distancia principal fija durante todo el proceso y debe ser posicionada con una distancia focal más larga de modo que abarque completamente el objeto (dependiendo del espacio físico), la distorsión se reduce al mínimo manteniendo la misma resolución (Hu et al., 2012).

Para la obtención de un modelo 3D, debe realizarse la selección de pares de imágenes con la superposición necesaria para cubrir todo el objeto, lo cual es suficiente para establecer el cálculo de las coordenadas de vértice por la condición de colinealidad, directamente a través de la medición de puntos homólogos (Fathi & Brilakis,2011).

Capítulo 4.

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

Las tecnologías apropiadas para la elaboración de un vuelo aéreo, se componen de un UAV; que tenga integrado un sistema GPS para controlar los resultados cartográficos, una cámara con una alta resolución que tenga estabilidad en el momento de la captura de imágenes sobre la plataforma, y de un equipo topográfico tradicional para realizar el control terrestre.

4.1. Uav – Phantom 3 Professional

El Phantom 3 professional, es un UAV que se encuentra dentro de los más recientes productos de la casa DJI, especializada en drones con aplicaciones de información, de recreación, de deportes y recientemente, esta versión ha sido utilizada en trabajos de cartografía; aun cuando el equipo de vuelo no ha sido construido específicamente para tal fin, las características del mismo, permiten realizar proyectos de gran precisión.

El phantom 3, cuenta con un sistema IMU (Unidad de Medición Inercial) de un giroscopio de 6 ejes y un acelerómetro, que detecta la inclinación de la aeronave, y la rectifican automáticamente.

En la tabla 4, se muestran las especificaciones técnicas del uav utilizado en este proyecto.

Tabla 4. Especificaciones del UAV

Fuente: Adaptado de: (DJI, 2015)

Peso (Batería y hélices incluidas)	1280 g
Velocidad de ascenso Máx.	5 m/s
Velocidad de descenso Máx.	5 m/s
Velocidad Máx.	16 m/s (sin viento)
Altura de vuelo Máx.	6000 m
Tiempo de vuelo Máx.	23 minutos aprox.
Temperatura de funcionamiento	0° C. a 40° C.
Modo GPS	GPS/GLONASS



Figura 18. UAV Phantom 3 professional

Fuente: Propia

4.2. Cámara

La cámara es el insumo principal, para realizar un proyecto de videogrametría, por medio de ella, se graba el video pertinente para su posterior desfragmentación y elaboración del producto cartográfico; por ello es indispensable contar con una alta resolución y un sensor pequeño para aumentar la precisión de los resultados.

En la tabla 5, se muestran las especificaciones de la cámara utilizada en este proyecto.

Tabla 5. Especificaciones de la cámara

Fuente: Adaptado de: (DJI, 2015)

Sensor	Sony EXMOR 1/2.3” Píxeles efectivos: 12.4 M (píxeles totales: 12.76)
Objetivo	FOV 94° 20 mm (equivalente a un formato de 35 mm) f/2.8
Intervalo ISO	100-3200 (vídeo) 100-1600 (fotos)
Velocidad obturador electrónico	8 s -1/8000 s
Tamaño máx. imagen	4000 x 3000
Modos de fotografía fija	Disparo fijo Disparo ráfagas: 3/5/7 fotogramas Horquilla de exposición automática
Modos de grabación de video	UHD: 4096x2160 p 24/25, 3840x2160 p 24/25/30 FHD: 1920x1080 p 24/25/30/48/50/60 HD: 1280x720 p 24/25/30/48/50/60
Tasa de bits máx. para almacenamiento de video	60 Mbps
Formato de archivos admitidos	FAT32/exFAT Fotografía: JPEG, DNG Video: MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)

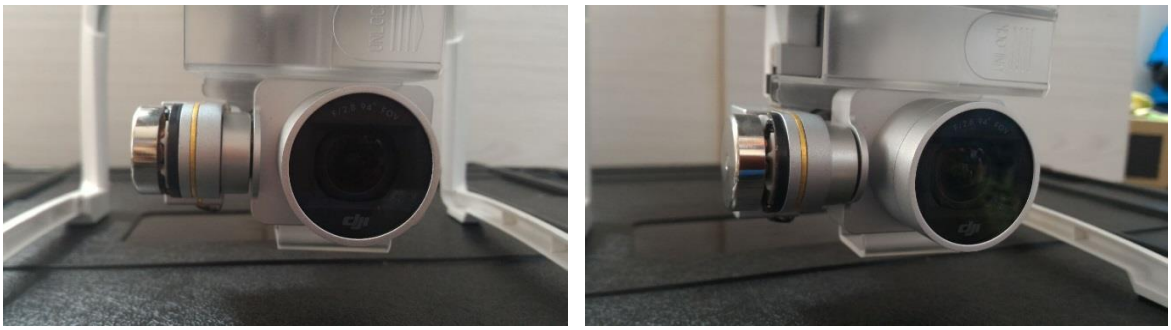


Figura 19. Cámara Phantom 3 professional

Fuente: Propia

4.3. GPS-RTK

Otro instrumento importante es el GPS-RTK, el cual permite obtener coordenadas en tiempo real a partir de las señales GPS que son recibidas y corregidas instantáneamente; el equipo utilizado para este proyecto es un GPS System 500, de la casa de Leica Geosystems, el cual ofrece una precisión centimétrica en levantamientos RTK y que dentro de sus aplicaciones se encuentra el control terrestre para fotogrametría (Leica, 2002).



Figura 20. GPS System 500

Fuente: Adaptado de: (Leica, 2002)

Capítulo 5.

VIDEOGRAMETRÍA UAV

La Videogrametría Uav, es la técnica empleada en capturar información de la superficie terrestre, por medio de un sistema de no contacto; donde el insumo principal es una grabación de video en modo vertical, sobre una plataforma Uav; la cual es posteriormente desfragmentada en frames, que cumplen con los requisitos estereoscópicos para la elaboración de productos cartográficos.

5.1. METODOLOGÍA DEL PLAN DE TRABAJO

Debido a que este trabajo, presenta un algoritmo de medición, sobre una primera aproximación a la Videogrametría Uav; se ha propuesto una metodología que cumple con los principios básicos de la producción de modelos 3D y ortofotos a partir de nuevas plataformas, como son los uav; con la variación que el insumo principal, es una grabación de video sobre el terreno.

En la figura 21, se presenta una metodología general, propuesta para la elaboración de proyectos basados en Videogrametría Uav.

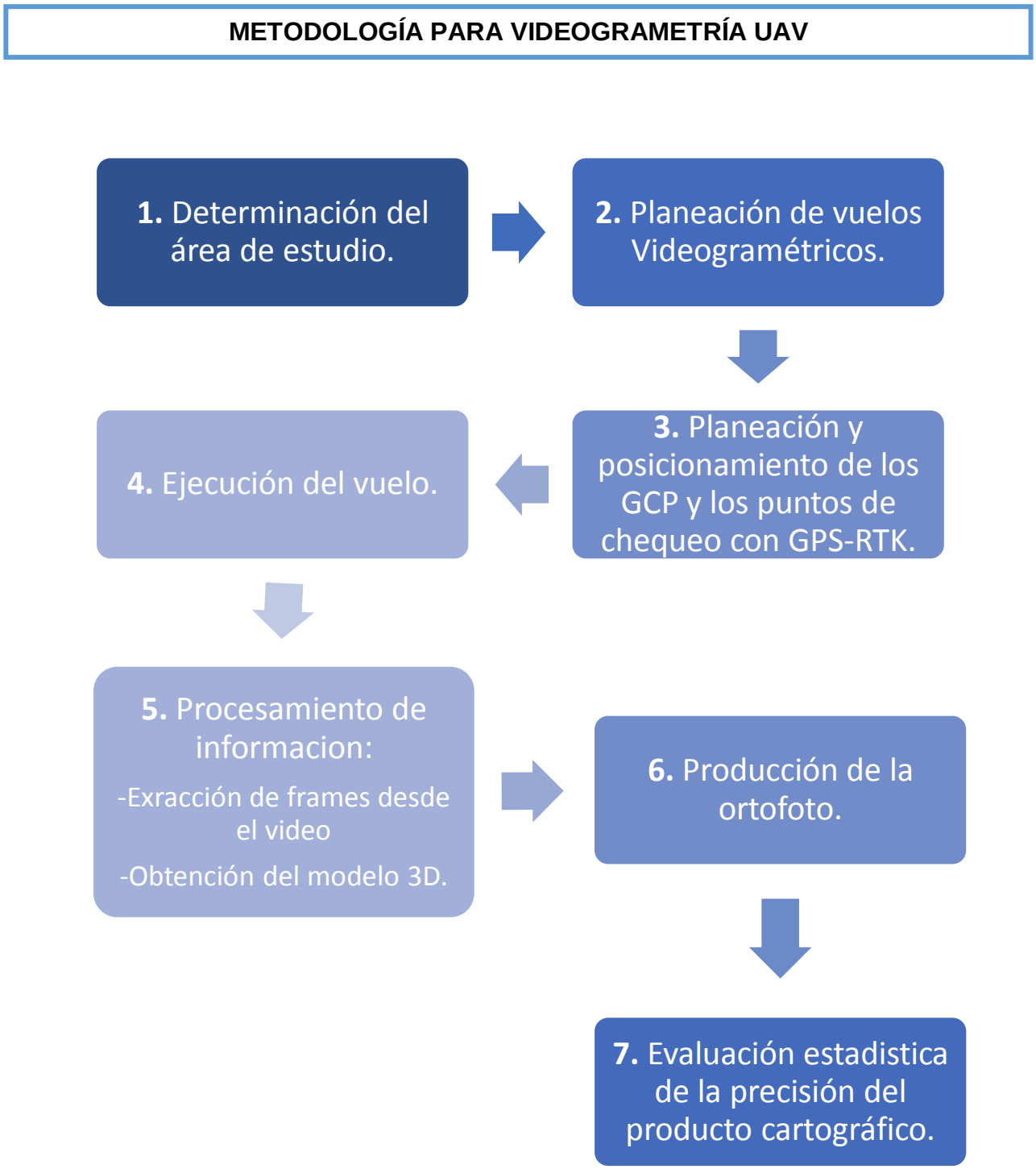


Figura 21. Propuesta metodológica para elaborar Videogrametría Uav

Fuente: Propia

5.1.1. Determinación del área de estudio

El área de estudio definida para este proyecto, es un fragmento del Parque Metropolitano San Cristóbal, en la localidad de San Cristóbal , ubicado al suroriente de la ciudad de Bogotá – Colombia,. La figura 22, representa la zona específica de estudio, a nivel nacional, departamental y distrital.

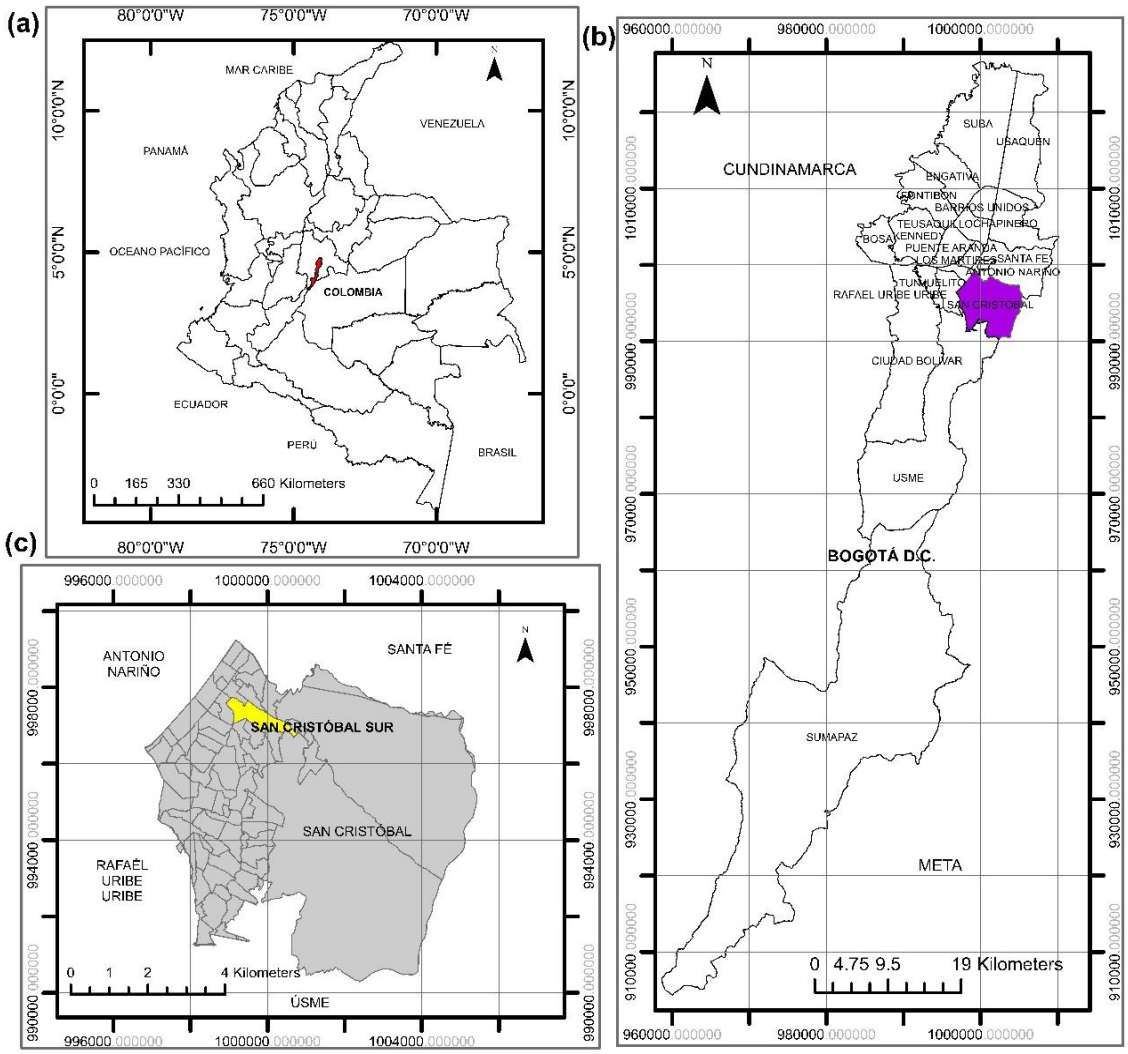
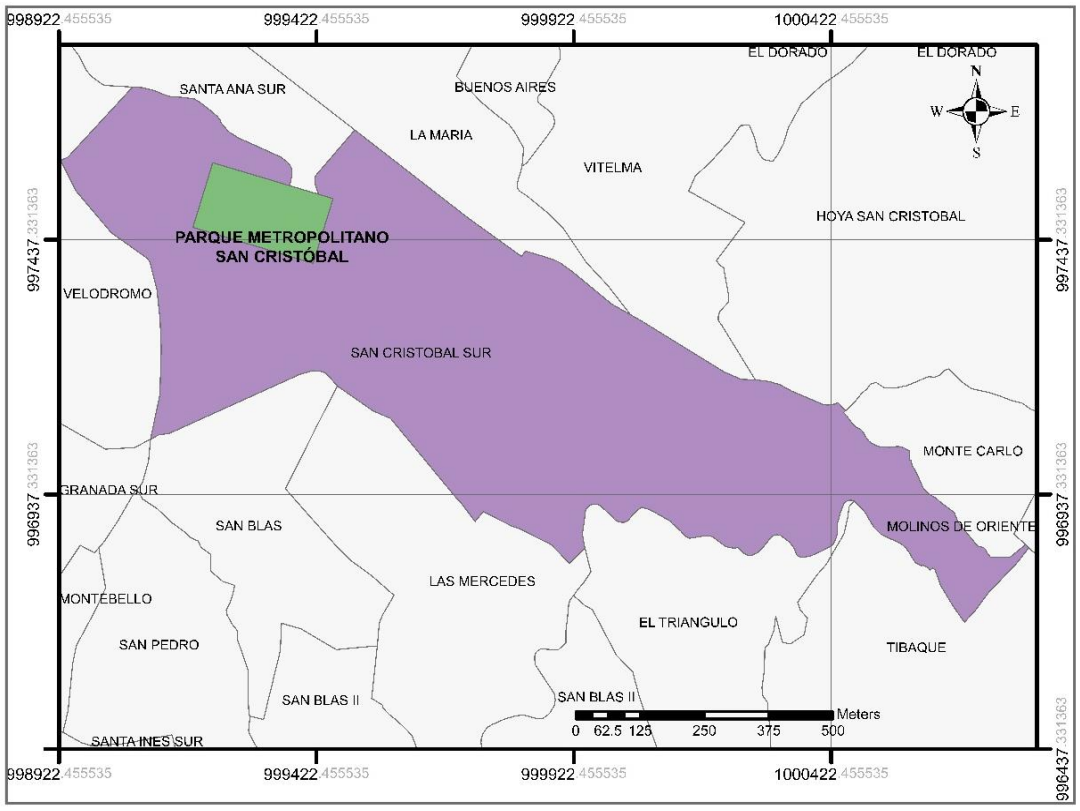


Figura 22. Mapa ubicación del área de estudio, (a) Bogotá - Colombia, (b) Localidad San Cristóbal – Bogotá, (c) Barrio San Cristóbal sur. Fuente: Propia

La figura 22.a, representa la ubicación del área de estudio a nivel nacional, señalando en color rojo la ciudad de Bogotá, este mapa se encuentra georreferenciado en el sistema de coordenadas geográficas WGS84 en una escala de 1:30.000.000; la figura 22.b, describe la localidad San Cristóbal (polígono morado) dentro de la división administrativa de la ciudad de Bogotá, tiene una escala de 1:1.000.000 y se encuentra georreferenciado en el sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá; finalmente, la figura 22.c. representa la ubicación del barrio San Cristóbal sur (polígono amarillo), dentro de la localidad de San Cristóbal, se encuentra en una escala de 1:15.000 en Magna Colombia Bogotá.



(a)

(b)



Figura 23. (a) Mapa ubicación área de estudio, barrio San Cristóbal sur, (b) área de estudio dentro del parque metropolitano san Cristóbal.

Fuente: Propia

La figura 23.a, representa el área de estudio, ubicada dentro del barrio san Cristóbal sur, en una escala de 1:15.000, en el sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá.; en la figura 23.b se puede observar la ubicación espacial de la zona de trabajo, dentro del parque metropolitano.

La zona de vuelo, tiene unas dimensiones de 120 metros de ancho y 220 metros de largo, lo que representa un área de 2.64 hectáreas (ha); abarca la zona deportiva del parque, la cual cuenta con 14 canchas distribuidas en diferentes deportes como: futbol, baloncesto y voleibol; cuenta también con zonas verdes y con senderos peatonales. Este terreno, trae consigo varios puntos a favor, como la distribución espacial de las estructuras físicas y la poca variación en la altura del terreno; lo que ayuda al procesamiento de la información y la posterior aplicación y análisis del algoritmo de medición sobre esta técnica.

5.1.2. Planeación del vuelo Videogramétrico

La planeación de vuelos con fines cartográficos, es una parte fundamental y primordial, para la elaboración de dichos productos; esta parte del flujo de trabajo, nos permite controlar de inicio a fin todos los parámetros y datos obtenidos, con la finalidad de alcanzar grandes precisiones en los resultados finales.

Para realizar la planeación de un vuelo Videogramétrico, es necesario conocer los parámetros iniciales del área de estudio, del equipo de vuelo (uav y cámara) y de las características con las cuales se desean conseguir los productos, siempre y cuando se encuentren dentro de las bases teóricas establecidas para tales fines. Dichas bases están ligadas a los principios fotogramétricos.

Sin embargo, debido a que el insumo principal en la Videogrametría, son frames extraídos de videos y no fotografías, algunos de los procesos expuestos en esta metodología de primera aproximación, presentan cambios significativos en la implementación de este nuevo insumo.

En la figura 24, se establece la metodología para la planeación de vuelos Videogramétricos, empleada en la primera aproximación de esta técnica.

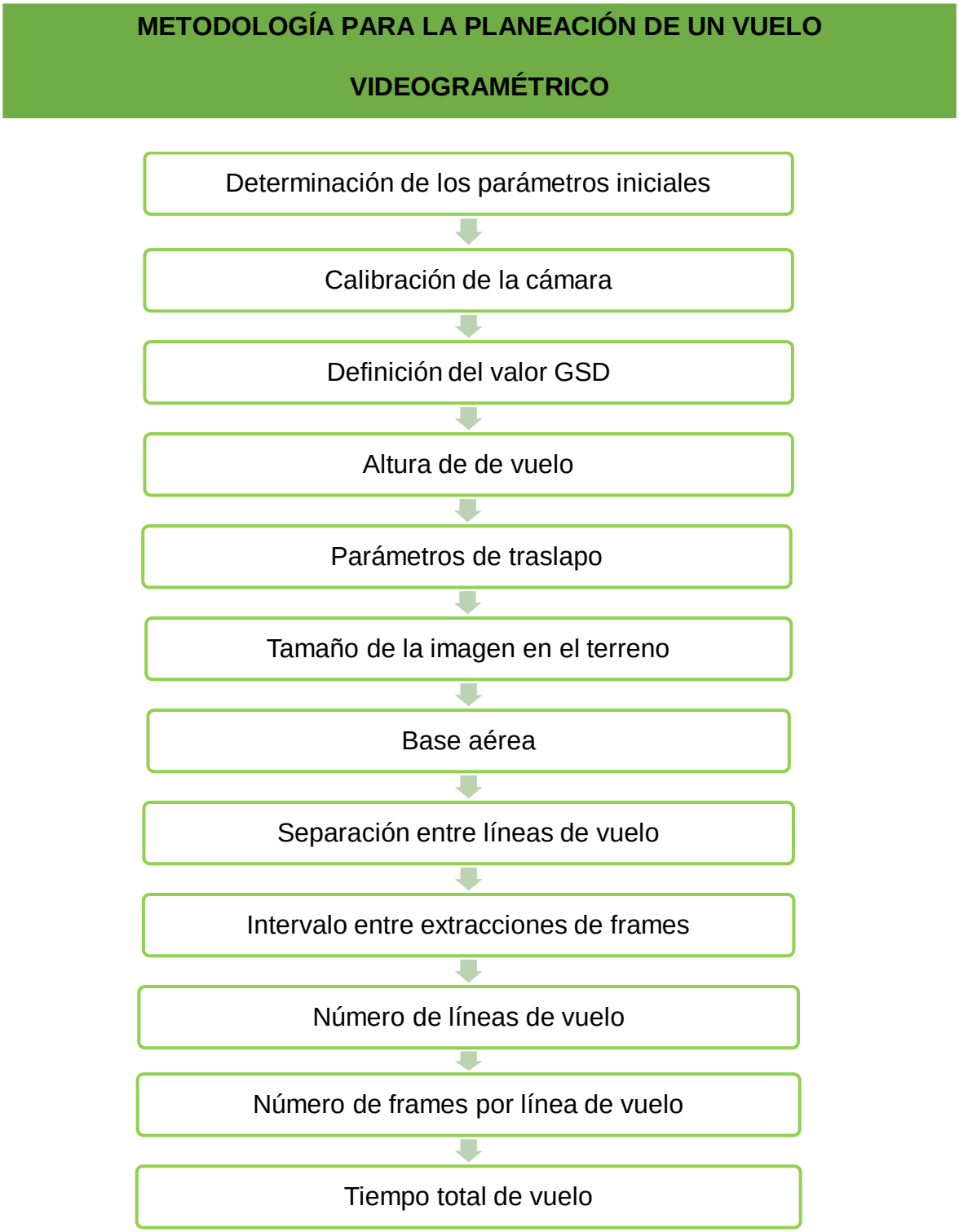


Figura 24. Diagrama de flujo, propuesta planeación vuelo Videogramétrico

Fuente: Propia

5.1.2.1. Determinación de los parámetros iniciales

Los parámetros iniciales del proyecto se presentan en la tabla 6, los cuales fueron definidos por el investigador de este proyecto.

Tabla 6. Parámetros iniciales del proyecto

Fuente: Propia

AREA DEL TERRENO	Ancho del terreno(Km)	0.12
	Largo del terreno (Km)	0.22
RESOLUCIÓN VIDEO - 4K	Ancho del video (px)	4096
	Largo del video (px)	2160
VELOCIDAD UAV	Velocidad (m/seg)	5

5.1.2.2. Calibración de la cámara

La calibración de la cámara es un proceso mediante el cual es posible conocer la orientación interna y externa de la misma, con el fin de reconstruir en tercera dimensión, la posición y los parámetros con los que fue tomada cada fotografía (Caire Lomeli, 1977). Dado que en la Videogrametría es necesario extraer los frames requeridos desde un video, esto hace que la imagen pierda los metadatos, es decir, la información interna de cada captura; por ello el primer paso en la planeación de un vuelo con video, es realizar la calibración.

Las cámaras fotográficas y de video tienen una distancia focal por defecto, pero esta distancia varía de acuerdo al zoom que se realiza sobre la captura del mismo;

esto es bastante influyente en el proceso Videogramétrico porque al cambiar la cámara de opción fotográfica a opción de video, el enfoque realizado cambia automáticamente; en otras palabras, la distancia focal definida por el fabricante de la cámara, no aplica para proyectos con video y es por ello que debe realizarse una calibración previa, sólo para conocer dicha distancia (Fathi, 2016).

Para conocer la distancia focal en video de la cámara, del uav phantom 3 professional se realiza un proceso de calibración con el software (*Photomodeler Scanner*, 2016); para ello, el software proporciona una grilla de calibración (figura 25) sobre la cual se deben capturar 12 frames (Numero optimo recomendado por los fabricantes) con ángulos de 0°, 90° y 270° de la cámara, por los 4 lados de la grilla respectivamente.

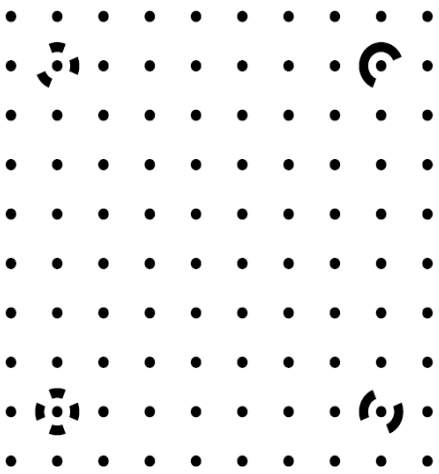


Figura 25. Grilla de calibración

*Fuente: (*Photomodeler Scanner*, 2016)*

Para este proceso, se realiza un video que contiene una secuencia de capturas de la grilla con los ángulos recomendados; el cual es posteriormente desfragmentado para extraer los 12 frames por medio de la opción “Video frame extraction” del mismo software.

Es importante controlar los parámetros de autoenfoque y de zoom antes de realizar cualquier proyecto de videogrametría, debido a que si alguno de estos dos aspectos cambia, la distancia y por ende la planeación del vuelo también cambia (Herráez, 2016).

En la tabla 7, se puede evidenciar la secuencia de extracción de los frames de calibración, utilizados para conocer la distancia focal; la captura de información inicia con un ángulo de cámara de 0° (posición cenital) para los frames a.1 – a.4, luego se utiliza un ángulo de 90° para capturar la información de los frames b.1 – b.4, y finalmente se usa un ángulo de 270° para los frames c.1 – c.4; los círculos rojos en cada una de las imágenes, indica la posición del obturador al momento de la grabación (frames), y su respectiva posición en una vista de planta (orientación de la cámara).

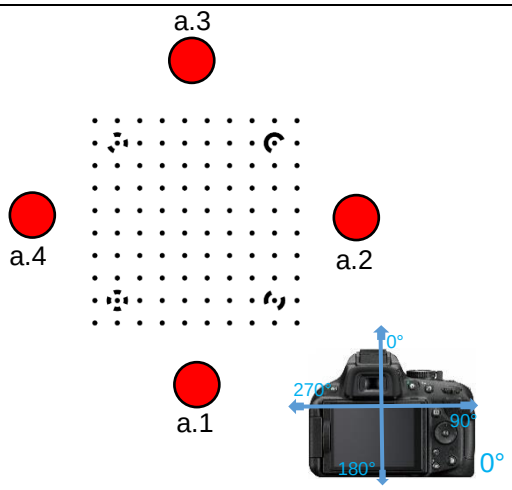
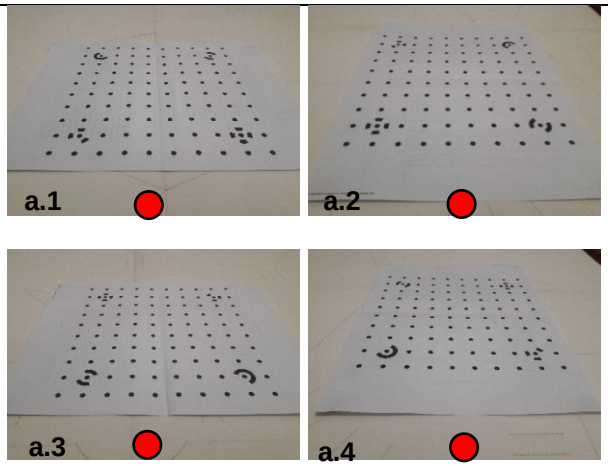
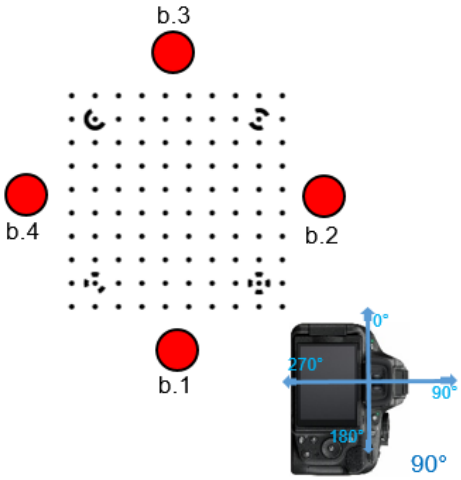
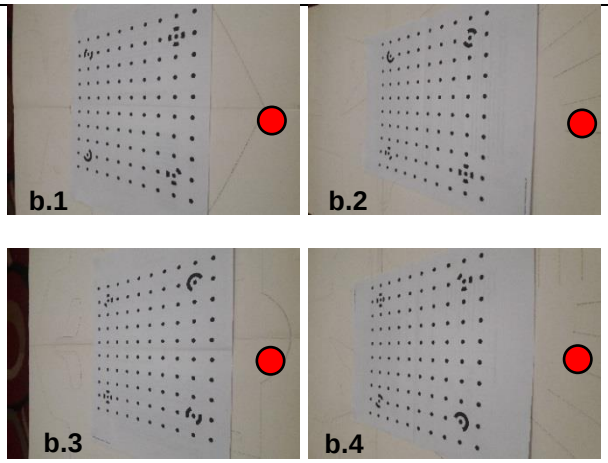
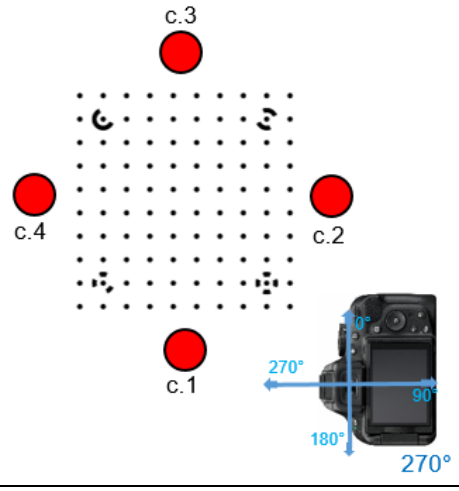
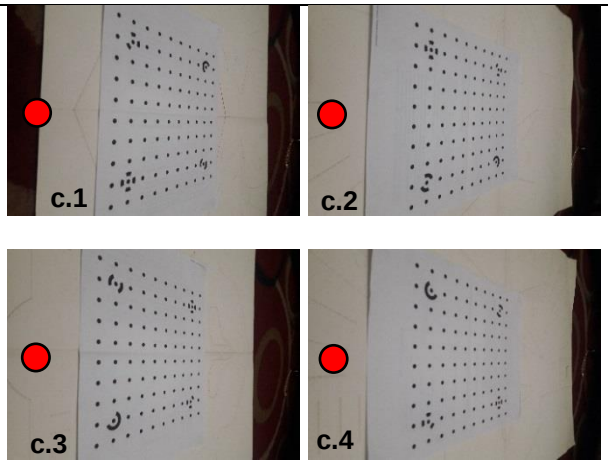
ORIENTACIÓN DE LA CÁMARA	FRAMES
	
	
	

Tabla 7. Secuencia extracción de frames, grilla Photomodeler. Fuente: Propia

El resultado de la calibración de la cámara en formato video para el valor de la distancia focal es de 4.8 mm; el reporte de calibración se presenta en el Anexo 1 de este trabajo.

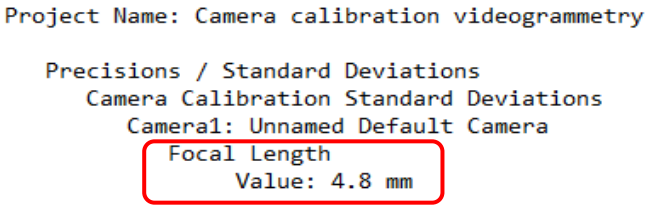


Figura 26. Reporte de calibración

Fuente: Propia

Además de conocer la distancia focal de la cámara, también es necesario definir los puntos principales y los parámetros de distorsión de lentes; para este proyecto, dichos parámetros se definen por medio de una segunda calibración con el software (*Agisoft PhotoScan Professional*, 2016), se usa la herramienta "Agisoft lens"; con el fin de realizar una continuidad en los datos, debido a que este software es la plataforma de procesamiento de las imágenes aéreas.

Para esta segunda calibración se realiza el mismo procedimiento de video y posterior extracción de frames, a la grilla que presenta Agisoft en forma de tablero de ajedrez, como se puede observar en la figura 27.

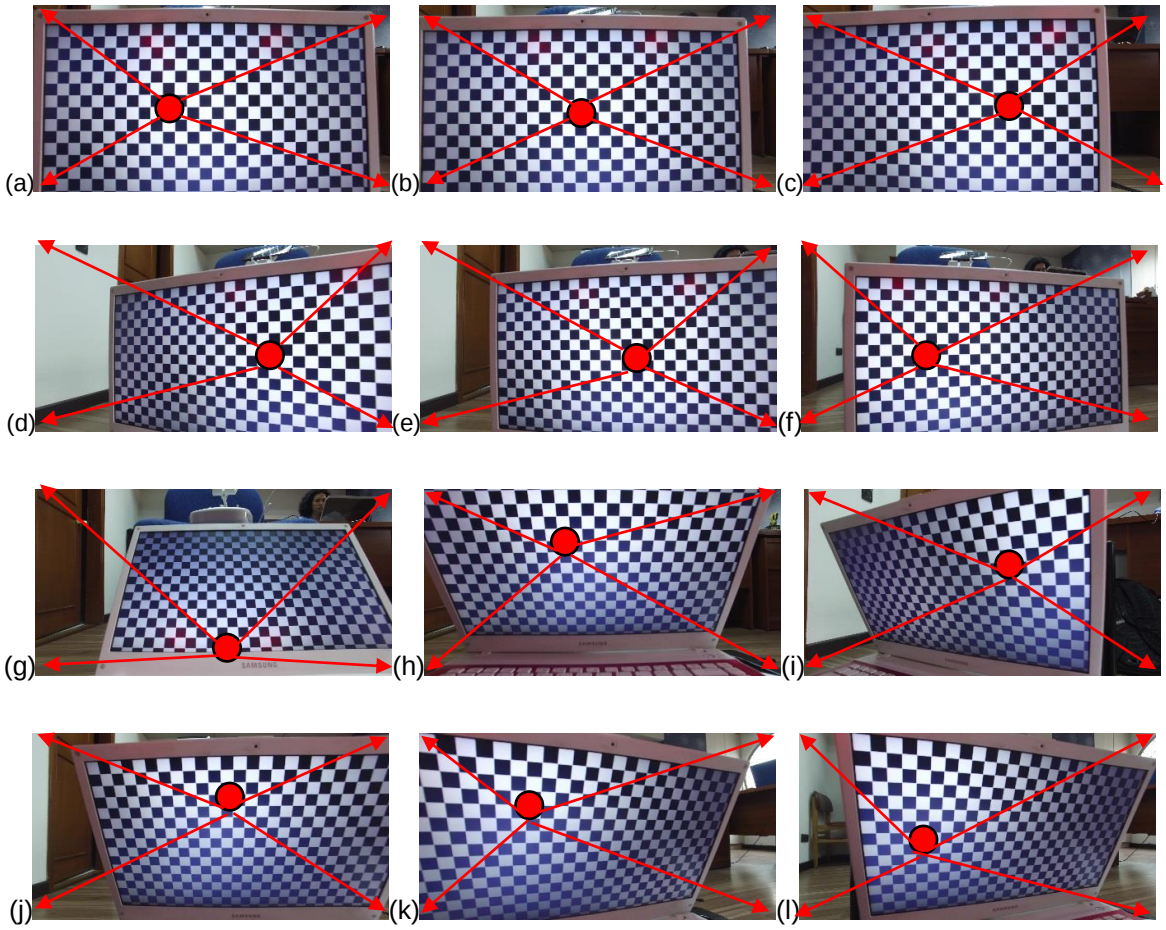


Figura 27. Secuencia grilla de calibración Agisoft

La posición del obturador oscila de izquierda a derecha y se identifica con un círculo rojo. Fuente: Propia

Los resultados obtenidos de la segunda calibración, se presentan en la tabla 8, y se pueden evidenciar en el anexo 2.

Tabla 8. Resultados calibración Agisoft

Fuente: Propia

Tamaño de la imagen (px)	Tamaño del pixel (mm)
Alto: 4096	0.00934355
Ancho: 2160	0.00934355

Parámetro	Valor
Xp (mm)	0.0495
Yp (mm)	0.1012
k1	-0.140795
k2	0.124014
k3	-0.0426059
k4	0.00926619

Nota: Debido a que es la primera calibración de video para esta cámara, se necesita realizar una pre calibración (Photomodeler Scanner) para certificar la distancia focal, y una calibración posterior para determinar los parámetros internos de la misma. Sin embargo para futuros trabajos con la misma referencia de cámara, se puede dar por hecho el mismo valor de la distancia focal de este proyecto, y si es necesario, se realiza solo un proceso de calibración para re definir los parámetros internos.

5.1.2.3. Definición del valor de GSD

El valor del GSD representa el tamaño del terreno contenido en un pixel, su valor puede comprender entre 1 – 10 cm, este valor es discutible de acuerdo a la calidad del proyecto que se desea obtener.

Para el presente proyecto se opta por un valor 3.5 cm/pixel con base en el criterio del investigador de este trabajo.

Por otra parte, es importante denotar, que cuando la altura de vuelo es un factor limitante, es posible calcularla con la ecuación 1 del marco teórico.

5.1.2.4. Altura de vuelo

La altura de vuelo se despeja de la ecuación 1, dado que no existe ninguna limitante de vuelo para el valor de GSD definido con anterioridad.

$$H = \frac{GSD * Ancho_{imagen} * f}{Ancho_{sensor}} = \frac{3.5\ \left(\frac{cm}{px}\right) * 4096(px) * 4.8(mm)}{7.81\ (mm) * 100} = 88\ m$$

Ecuación 10. Altura de vuelo proyecto

Donde, el sensor de la cámara es un Sony EXMOR 1/2.3", que de acuerdo con las especificaciones (Corporation, n.d.), el tamaño del sensor es de 7.81 mm; el tamaño del GSD seleccionado es 3.5 cm y se utiliza un factor de conversión de 100, para cambiar las unidades a metros; el ancho de la imagen es de 4096 pixeles según las características otorgadas por el fabricante, y por último el valor de la distancia focal es resultado de la calibración realizada con el software Photomodeler.

A partir del cálculo de la ecuación 10, se define una altura de vuelo de 88 metros para todo el trayecto de vuelo.

5.1.2.5. Parámetros de traslapo

De acuerdo a los rangos de traslapo expuestos por (Santamaría Peña & Sanz Méndez, 2011), el porcentaje de recubrimiento longitudinal definido para este proyecto es de 80% debido a que no existe gran variación en la pendiente del terreno; y un porcentaje de 40% en el traslapo lateral.

Tabla 9. Porcentajes de solapamiento

PORCENTAJES DE TRASLAPO	
Longitudinal	80 %
Lateral	40 %

5.1.2.6. Tamaño de la imagen en el terreno

Es el producto de las dimensiones de la imagen en pixeles y el valor definido para el GSD; de acuerdo con esto, el valor de cada imagen en el terreno está dado por:

$$Ancho_{imagen} = \frac{3.5 * 4096}{100} = 143.36\, m$$

$$Largo_{imagen} = \frac{3.5 * 2160}{100} = 75.6\, m$$

Ecuación 11. Tamaño de la imagen en el terreno del proyecto

De acuerdo con el resultado de la ecuación 11, la huella que tiene el frame en el terreno, es de 143.36 metros de ancho y 75.6 metros de largo.

5.1.2.7. Base aérea

Con la ecuación 3 del marco teórico, se calcula el valor de la distancia que existe entre la extracción de cada frame en metros.

$$b = 75.6\, m\left(1 - \frac{80}{100}\right) = 15.12\, m$$

Ecuación 12. Base aérea del proyecto

El resultado de la ecuación 12, da como resultado un valor de 15.12 metros; el cual certifica que existe un traslapo de 80% en cada frame extraído.

5.1.2.8. Separación entre líneas de vuelo

La separación entre líneas de vuelo, representa la distancia en metros que existe entre los centros de cada imagen, definidos por el trayecto del uav; para lo cual se utiliza la ecuación 6 del marco teórico.

$$a = 143.36\,m\left(1 - \frac{40}{100}\right) = 86.016\,m$$

Ecuación 13. Separación entre líneas de vuelo del proyecto

El resultado de la separación de las líneas de vuelo, es de 86.016 metros, un valor muy cercano al ancho total del área del proyecto, lo que puede ser entendido como que, no existe la necesidad de ejecutar varias líneas de vuelo; sin embargo esa proporción se evalúa en el cálculo de número de líneas de vuelo.

5.1.2.9. Intervalo de extracción

Conocer el tiempo de intervalo de cada extracción de cada frame, es importante debido a que este valor nos define el tiempo en segundos en que se debe realizar la extracción consecutiva de cada frame, para que cumpla con el traslapo definido.

$$t = \frac{15.12\,m}{5\,m/s} = 3\,segundos$$

Ecuación 14.Intervalo de extracción del proyecto

La relación que existe entre el valor de la base área (15.12 m) y la velocidad del vuelo (5m/s, definida para este proyecto), da como resultado un tiempo de 3 segundos que son equivalentes a la distancia de extracción de cada frame en metros.

5.1.2.10. Número de líneas de vuelo

El número de líneas de vuelo para este proyecto, está dado por la ecuación 7 del marco teórico:

$$NLV = \frac{120\ m}{86.016\ m} = 1$$

Ecuación 15. Número de líneas de vuelo del proyecto

El resultado de líneas de vuelo para el proyecto, es 1; lo que confirma la hipótesis presentada en el cálculo de separación entre las líneas.

5.1.2.11. Número de frames por línea de vuelo

La cantidad de frames extraídos por cada línea de vuelo, se calcula teniendo en cuenta el producto del largo del área del terreno y la base aérea, que para el proyecto es:

$$Número\ de\ frames\ por\ linea = \frac{220\ m}{15.12\ m} = 15$$

Ecuación 16. Número de frames por línea de vuelo del proyecto

De acuerdo con esto, y teniendo en cuenta que el proyecto consta de una sola línea de vuelo, el número total de frames utilizados para este proyecto es 15.

5.1.2.12. Tiempo total de vuelo

El tiempo vuelo, es el producto entre la cantidad total de frames y el tiempo de exposición de cada uno; para el proyecto el tiempo total de vuelo es de 45 segundos. A continuación, en la tabla 10, se presenta el resumen del cálculo de la planeación del vuelo, teniendo en cuenta los parámetros iniciales, las características de la cámara, del terreno, y los resultados de toda la planeación Videogramétrica.

Tabla 10. Planeación vuelo Videogramétrico del proyecto
Fuente: Propia

PLANEACIÓN VUELO VIDEOGRAMÉTRICO	
Ancho del terreno(Km)	0.12
Largo del terreno (Km)	0.22
Área total del terreno (Km2)	0.0264
Distancia focal - *f* (mm)	4.8
Ancho del video (px)	4096
Largo del video (px)	2160
GSD (cm/px)	3.5
Tamaño sensor (mm)	7.81
Altura de vuelo (m)	88
Velocidad (m/seg)	5
Ancho tamaño de la imagen (m)	143.36
Largo tamaño de la imagen (m)	75.6
S - Área cubierta x foto (km2)	0.01
Traslapo Longitudinal	0.8
Traslapo Lateral	0.4
Base aérea (m)	15.12
a (m)	86.016
Intervalo extracción frames (seg)	3
Número líneas vuelo	1

Número de frames por línea	15
Tiempo total de vuelo (seg)	45

En la figura 28, se presenta el diseño final del vuelo creado con base en los parámetros iniciales y en los resultados obtenidos de la planeación del mismo; el polígono azul, representa el área de estudio; los recuadros de color Cyan hacen alusión a las dimensiones de cada frame en el terreno, y se muestran de forma consecutiva representando el traslapo que existe en cada exposición; por último se puede visualizar la ruta de vuelo con punto de partida y punto de llegada, en una dirección oeste-este, la cual se ha definido a criterio del investigador buscando cubrir la zona de estudio con el mínimo número de líneas de vuelo (Deagostini Routin, 1971).

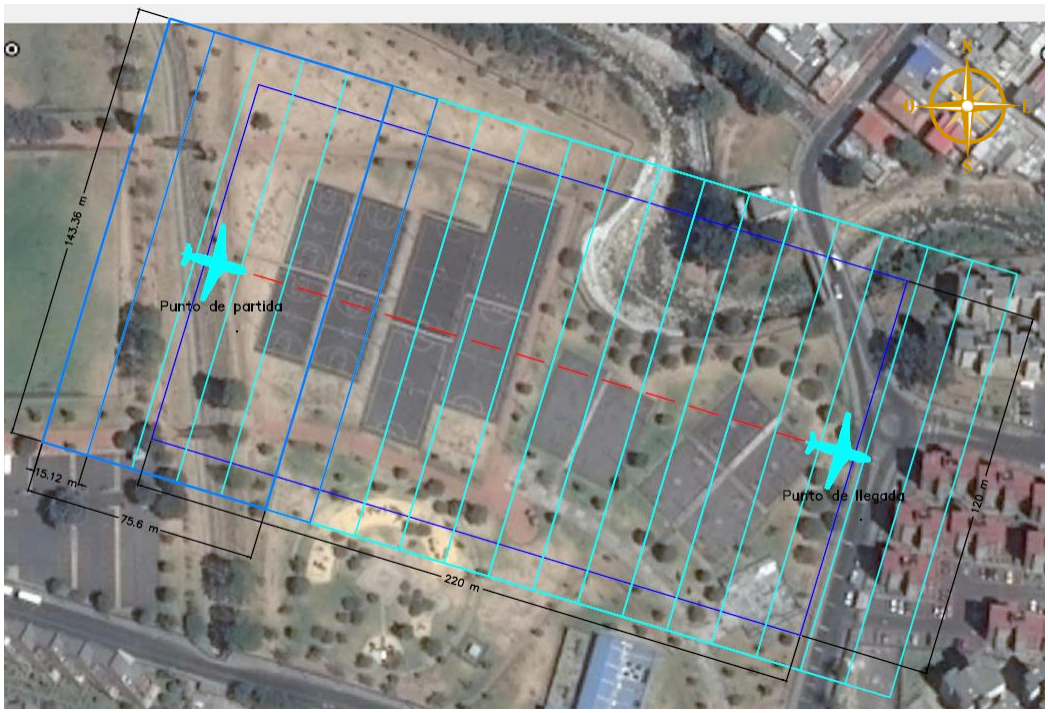


Figura 28. Diseño del vuelo, del proyecto. Fuente: Propia, Google Earth

5.1.3. Planeación y posicionamiento de los GCP y los puntos de chequeo con GPS-RTK

Para el presente proyecto, se selecciona la cantidad y la distribución de los puntos de control (GCP) con base en el criterio del investigador, debido a que a la fecha, no existe soporte teórico que determine la cantidad de controles en tierra, relacionados directamente con el tamaño del terreno, para proyectos de cartografía aérea digital con plataformas Uav (Nizam Tahar, 2016).

Se determinan 7 puntos de control (GCP), para reconocer y georreferenciar el área total del proyecto (2.64 ha), y se distribuyen uniformemente, de acuerdo con la topografía del terreno; en la figura 29, se muestra la planeación inicial de la distribución de los puntos de control (identificados con estrellas blancas), en el área de estudio (polígono verde).



Figura 29. Ubicación preliminar GCP del proyecto
Fuente: Propia, Google Earth

La identificación de los GCP, se realiza por medio de unos targets de color blanco y negro (figura 30) diseñados en cartón, con unas dimensiones de 50x50 cm; estos targets fueron ubicados en los centros de los puntos posicionados para tal fin, con estaca y puntilla o solo con puntilla (depende de las condiciones del terreno).



Figura 30. Diseño del target

Fuente: Propia

Por otra parte, se determinan 20 puntos de chequeo de precisión horizontal y vertical (utilizados para realizar el análisis de la precisión de los resultados cartográficos), distribuidos en suelo despejado (sin vegetación arbustiva o arbórea); con la finalidad de conocer las coordenadas reales de los puntos sujetos al terreno (ASPRS, 2014). En la figura 31, se hace alusión a los puntos de chequeo, planeados preliminarmente para tal fin.

El posicionamiento de los puntos de control y de chequeo, se realiza el día 28 de Junio de 2016 en horas de la tarde, con el equipo GPS System 500; la base se posiciono sobre la placa IGAC Bogotá-16, que se encuentra dentro de las instalaciones deportivas del Parque Metropolitano San Cristóbal; en la tabla 11, se presentan las coordenadas de la placa en la época 1995.4; las cuales se

convierten a la época 2016.6 (tabla 12), con el fin de calcular la velocidad y el desplazamiento que esto genera en las placas y en el terreno en general (IGAC, n.d.).



Figura 31. Ubicación preliminar de los puntos de chequeo del proyecto

Fuente: Propia, Google Earth

Tabla 11. Coordenadas Bogotá-16, época 1995.4

PLACA: Bogotá-16

Elipsoidales	**Latitud**	4° 34' 24.33925" N		
	Longitud	74° 5' 0.99319" W		
	h *(m)*	2642.706		
Geocéntricas	**X**	1744294.475	**Vx *(m/año)***	0.001
	Y	-6116751.48	**Vy *(m/año)***	0.001
	Z	505388.073	**Vz *(m/año)***	0.013

Tabla 12. Coordenadas Bogotá-16, época 2016.6

	COORDENADAS Bogotá-16 (2016.6)	
Geocéntricas	**X *(m)***	1744294.496
	Y *(m)*	-6116751.459
	Z *(m)*	505388.3486
Elipsoidales	**Latitud**	4° 34' 24,34822" N
	Longitud	74° 5' 0,99234" W
	h *(m)*	2642,713

Los datos posicionados se encuentran en el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS (época 2016.6, elipsoide WGS-84), los cuales, posteriormente se cambian nuevamente a la época 1995.4, con el fin, que el resultado del proyecto sea compatible con los parámetros de los productos cartográficos que maneja el IGAC. En la tabla 13, se presentan los datos originales resultado del posicionamiento (GCP y puntos de chequeo “CP”) en la época 2016.6, seguidos del cambio de época a 1995.4 en coordenadas geocéntricas, y sus respectivas transformaciones a coordenadas elipsoidales y coordenadas planas cartesianas, utilizando la aplicación Magna Sirgas Pro 3.

En el anexo 3, se presenta un mapa temático, con la ubicación exacta de los puntos de control y puntos de chequeo, producto de la planeación y posicionamiento RTK de este proyecto. Adicionalmente, como seguimiento de los GCP posicionados, se redactan unas fichas explicativas, que contienen la descripción del punto, las coordenadas finales y la ubicación del punto mediante registro fotográfico; todo este seguimiento, se encuentra adjunto en el anexo 4.

ID	ÉPOCA 2016.6			ÉPOCA 1995.4								
	COORDENADAS ELIPSOIDALES			COORDENADAS GEOCÉNTRICAS			COORDENADAS ELIPSOIDALES			COORDENADAS PLANAS CARTESIANAS		
	Latitud	Longitud	Altura	X	Y	Z	Latitud	Longitud	Altura	Norte	Este	Altura
GCP1	4°34'24.68993"N	74°4'57.59291"W	2645.309	1744395.773	-6116724.422	505398.745	4°34'24.68086"N	74°4'57.59355"W	2645.311	97488.309	99431.505	2645.311
GCP2	4°34'24.30607"N	74°4'58.59108"W	2644.590	1744366.233	-6116733.078	505386.929	4°34'24.29700"N	74°4'58.59174"W	2644.591	97476.510	99400.725	2644.591
GCP3	4°34'22.64655"N	74°4'58.32558"W	2647.116	1744375.912	-6116737.165	505336.296	4°34'22.63748"N	74°4'58.32624"W	2647.117	97425.515	99408.916	2647.117
GCP4	4°34'22.70013"N	74°5'0.06881"W	2643.622	1744323.226	-6116748.431	505337.657	4°34'22.69099"N	74°5'0.06946"W	2643.623	97427.154	99355.161	2643.623
GCP5	4°34'24.93277"N	74°5'0.68577"W	2642.074	1744303.007	-6116746.904	505405.924	4°34'24.92363"N	74°5'0.68641"W	2642.075	97495.760	99336.130	2642.750
GCP6	4°34'26.504"N	74°5'0.40437"W	2641.149	1744310.043	-6116739.935	505453.980	4°34'26.49486"N	74°5'0.40502"W	2641.150	97544.044	99344.803	2641.150
GCP7	4°34'23.84194"N	74°5'4.08976"W	2640.608	1744202.394	-6116776.854	505372.392	4°34'23.83280"N	74°5'4.09041"W	2640.608	97462.230	99231.166	2640.608
CP1	4°34'23.86759"N	74°5'4.11999"W	2640.596	1744201.48	-6116777.04	505373.177	4°34'23.85845"N	74°5'4.12064"W	2640.597	97463.018	99230.233	2640.597
CP2	4°34'23.67063"N	74°5'4.11336"W	2640.546	1744201.79	-6116777.4	505367.14	4°34'23.66149"N	74°5'4.11402"W	2640.546	97456.966	99230.438	2640.546
CP3	4°34'23.89792"N	74°5'3.87742"W	2640.812	1744208.71	-6116775.12	505374.123	4°34'23.88878"N	74°5'3.87808"W	2640.813	97463.951	99237.713	2640.813
CP4	4°34'26.73621"N	74°5'3.66804"W	2640.360	1744212.89	-6116766.23	505461.03	4°34'26.72707"N	74°5'3.66868"W	2640.362	97551.171	99244.163	2640.362
CP5	4°34'27.06408"N	74°5'4.02294"W	2638.691	1744201.69	-6116766.86	505470.94	4°34'27.05494"N	74°5'4.02361"W	2638.692	97561.245	99233.217	2638.692
CP6	4°34'27.14648"N	74°5'4.01776"W	2638.669	1744201.78	-6116766.6	505473.462	4°34'27.13734"N	74°5'4.01840"W	2638.670	97563.777	99233.377	2638.670
CP7	4°34'24.75031"N	74°5'1.99636"W	2641.767	1744264.18	-6116758.12	505400.31	4°34'24.74117"N	74°5'1.99702"W	2641.768	97490.150	99295.716	2641.768
CP8	4°34'24.96301"N	74°5'2.67143"W	2638.105	1744243.02	-6116759.82	505406.533	4°34'24.95387"N	74°5'2.67209"W	2638.106	97496.684	99274.899	2638.106
CP9	4°34'26.42571"N	74°5'0.55051"W	2641.315	1744305.81	-6116741.51	505451.595	4°34'26.41657"N	74°5'0.55117"W	2641.316	97541.638	99340.297	2641.316
CP10	4°34'23.29316"N	74°5'1.97935"W	2641.848	1744265.69	-6116761.49	505355.681	4°34'23.28402"N	74°5'1.98000"W	2641.849	97445.372	99296.245	2641.849
CP11	4°34'23.14038"N	74°5'1.58202"W	2642.085	1744277.64	-6116758.72	505351.02	4°34'23.13124"N	74°5'1.58267"W	2642.086	97440.679	99308.498	2642.860
CP12	4°34'24.41629"N	74°5'0.04566"W	2642.169	1744322.36	-6116742.8	505390.11	4°34'24.40715"N	74°5'0.04632"W	2642.170	97479.891	99355.870	2642.170
CP13	4°34'24.15831"N	74°4'59.5177"W	2642.291	1744338.23	-6116739.06	505382.218	4°34'24.14917"N	74°4'59.51837"W	2642.292	97471.965	99372.151	2642.292
CP14	4°34'22.9337"N	74°5'0.41392"W	2643.196	1744312.72	-6116750.39	505344.778	4°34'22.92456"N	74°5'0.41456"W	2643.198	97434.331	99344.519	2643.198
CP15	4°34'23.92051"N	74°4'58.06659"W	2645.306	1744382.24	-6116730.24	505375.176	4°34'23.91144"N	74°4'58.06724"W	2645.307	97464.663	99416.900	2645.307
CP16	4°34'24.11194"N	74°4'57.92909"W	2645.607	1744386.27	-6116728.91	505381.064	4°34'24.10287"N	74°4'57.92974"W	2645.608	97470.546	99421.139	2645.608
CP17	4°34'23.50529"N	74°4'57.64623"W	2645.423	1744395.02	-6116727.77	505362.466	4°34'23.49622"N	74°4'57.64689"W	2645.424	97451.905	99429.863	2645.424
CP18	4°34'22.20958"N	74°4'59.82854"W	2644.395	1744330.89	-6116748.3	505322.692	4°34'22.20044"N	74°4'59.82919"W	2644.396	97412.080	99362.572	2644.396
CP19	4°34'22.83546"N	74°5'1.13916"W	2642.671	1744291.13	-6116756.25	505341.726	4°34'22.82632"N	74°5'1.13982"W	2642.672	97431.310	99322.155	2642.672
CP20	4°34'23.70848"N	74°5'1.16449"W	2642.256	1744289.68	-6116754.01	505368.436	4°34'23.69934"N	74°5'1.16514"W	2642.257	97458.137	99321.371	2642.257

Tabla 13. Cambio de época Coordenadas GCP y puntos de chequeo

5.1.4. Ejecución del vuelo

La ejecución del vuelo se realiza el día 02 de Julio del 2016 aproximadamente a las 9.30 de la mañana, con el fin de garantizar que la altura del sol se encuentre aproximadamente entre 30° y 40° (Deagostini Routin, 1971) y reducir la longitud de las sombras que se puedan presentar en el terreno a la hora de vuelo; para ello, se utiliza la herramienta online http://www.sunearthtools.com/ que nos permite conocer la posición del sol en un día determinado cada 15 o 30 minutos (Figura 32).

Fecha:	02/07/2016 | GMT-5	
coordinar:	4.5734947, -74.0835893	
ubicación:	Dg. 13 Sur	
hora	Elevación	Azimut
06:49:05	-0.833°	66.86°
7:00:00	1.67°	67.07°
7:15:00	5.11°	67.29°
7:30:00	8.56°	67.42°
7:45:00	12.01°	67.46°
8:00:00	15.47°	67.4°
8:15:00	18.92°	67.26°
8:30:00	22.36°	67.01°
8:45:00	25.8°	66.65°
9:00:00	29.22°	66.17°
9:15:00	32.63°	65.56°
9:30:00	36.03°	64.79°
9:45:00	39.39°	63.83°
10:00:00	42.73°	62.67°

Figura 32. Posición del sol, día 02 de Julio
Fuente: Sun Earth tools

La captura del video, se realiza en la dirección oeste-este según la planeación del vuelo (Figura 33), a una altura de 88 metros, con una duración de grabación de 45 segundos; el resultado es satisfactorio.

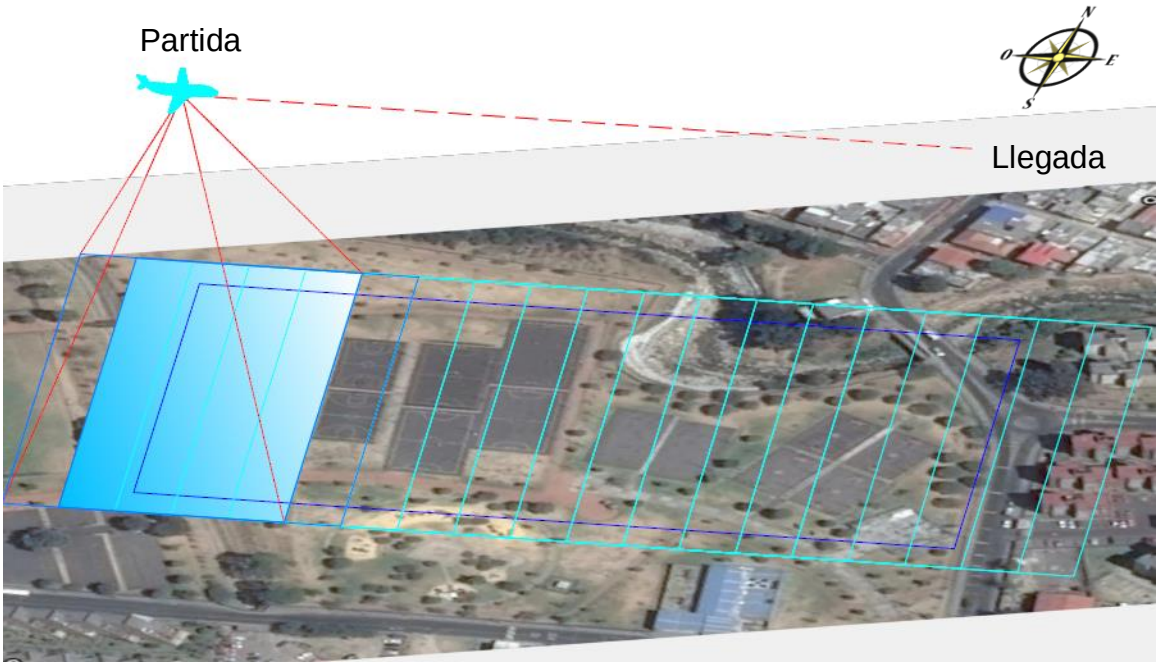


Figura 33. Desarrollo de la línea de vuelo del proyecto

Fuente: Propia

5.1.5. Procesamiento de la información

Conforme con los resultados de la ejecución del vuelo, y los parámetros del mismo es posible realizar la desfragmentación del video, para extraer los frames que cumplen con las características planificadas con antelación; y con ellos proceder a la modelación 3D del área de estudio.

5.1.5.1. Extracción de frames desde el video

La extracción de frames, se realiza por medio del software Photomodeler Scanner, con la herramienta “Video Frame Extractor”, la cual permite cargar el video y extraer frames por medio de dos métodos: el primero, es la extracción manual que da la posibilidad de pausar el video y realizar la captura de una imagen instantánea; y el segundo implica la extracción automática por medio de la cual se puede definir la cantidad de frames para extraer, o el intervalo de segundos por el cual se quiere utilizar la herramienta; el método que se utiliza en este proyecto es la extracción automática cada 3 segundos (según los resultados de la planeación), (Figura 34).

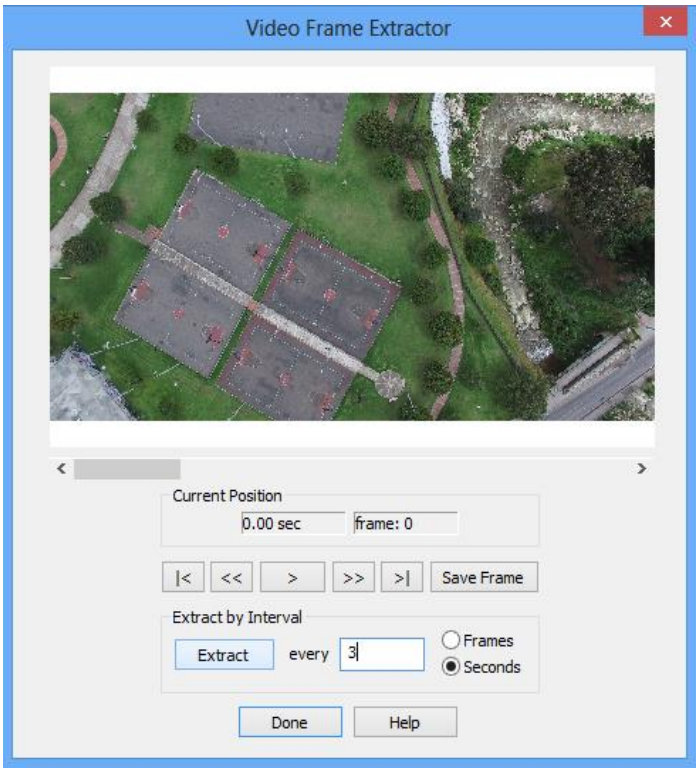


Figura 34. Herramienta " Video Frame Extractor”
Fuente: Photomodeler

Como resultado, se obtienen 15 frames, que de acuerdo con la planificación Videogramétrica, abarcan el total del área de estudio (2.64 ha), con un traslapo longitudinal del 80% entre uno y otro frame. En la figura 35, se presentan los frames de la extracción automática del video, en la secuencia y dirección del vuelo.

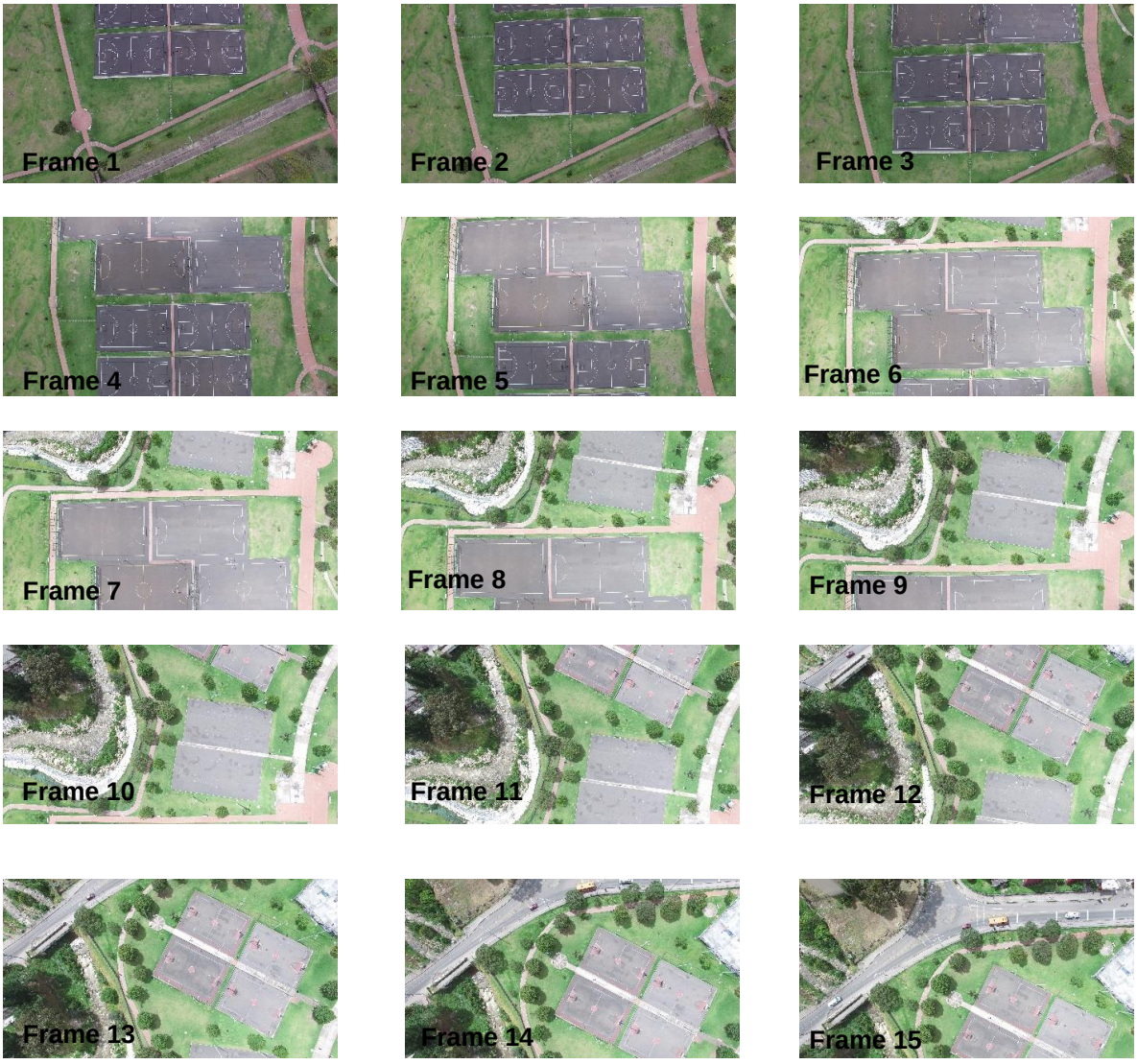


Figura 35. Secuencia frames finales del proyecto, frame 1 – frame 15

Fuente: Propia

Cabe resaltar, que las propiedades de los frames al ser extraídos del video, no cambian, eso quiere decir que la resolución de cada frame, seguirá siendo equivalente a la resolución del video original; para este caso, la resolución de todos los frames, es de 4096x2160 pixeles, que corresponden a unas dimensiones de 143.36x75.6 metros, de acuerdo a la planificación Videogramétrica de este proyecto.

5.1.5.2. Obtención de modelo 3D

Los insumos necesarios para realizar la modelación 3D de un proyecto, son los frames, la calibración de la cámara y los GCP; de ellos y de la precisión con la que fueron elaborados, depende la calidad de los resultados obtenidos en los modelos 3D. El software que se utiliza para la elaboración de este proceso, es Agisoft Photoscan, dentro del cual hay que importar primero los frames, y luego la calibración de la cámara, para proceder con el alineamiento de los mismos; en dicho proceso, el software se encarga de calcular la posición de la cámara y la orientación de cada imagen, que da como origen un modelo que contiene una nube de puntos dispersos; en la figura 36, se puede observar dicho modelo, y la ubicación de las cámaras en recuadros azules sobre el terreno (la dispersión de los puntos, se debe a la capacidad de procesamiento del software).

A partir del alineamiento de los frames, el software calcula la información de profundidad para cada cámara, lo cual se combina en una sola nube denominada: “nube de puntos densa”, que se ilustra en la figura 37; este resultado, se asimila a

una nube de puntos LIDAR, la cual puede ser editaba y clasificada de acuerdo con el entorno; esta superficie, se genera a partir de la correspondencia de los puntos homólogos de cada imagen por medio de la intersección de los rayos de luz, que dan como origen una posición 3D de cada punto sobre el modelo. El resultado de la nube de puntos densa, está compuesta por 3.045.873 puntos, y presenta un ajuste en el valor del GSD por 3.32 cm/pixel, debido a las variaciones de altura del terreno.

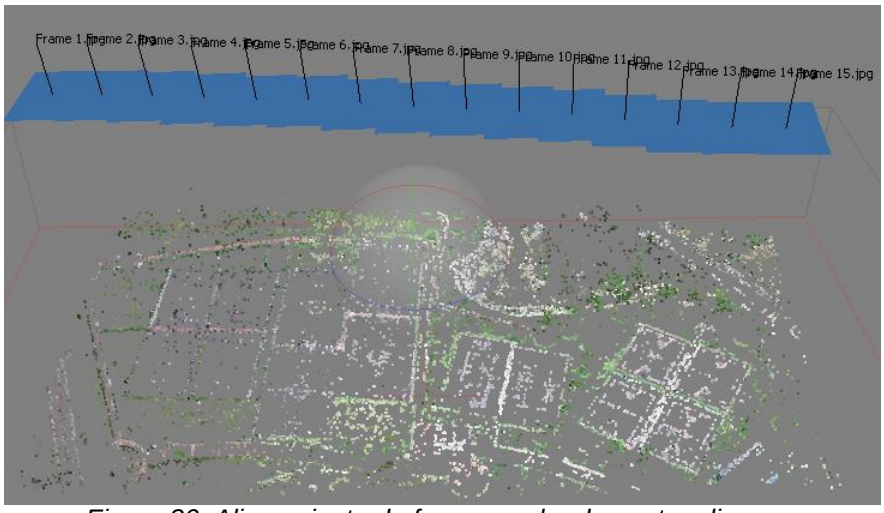


Figura 36. Alineamiento de frames, nube de puntos dispersa

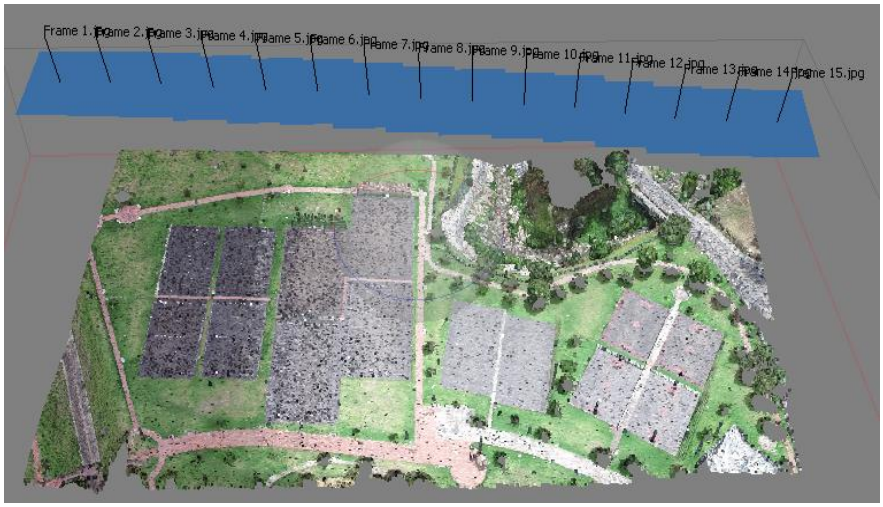


Figura 37. Nube de puntos dispersa

La georreferenciación de la nube de puntos, se realiza por medio de los targets posicionados en el terreno a la hora del vuelo (figura 38), para lo cual se efectúa la identificación de los mismos en dos frames inicialmente, luego el programa correlaciona la ubicación de dichos puntos en los frames siguientes, y aproxima una ubicación que es posicionada correctamente por el usuario; finalmente, se le ingresan a cada target las coordenadas planas cartesianas en la época 1995.4 que le corresponden (figura 39).

(a)  (b) 

Figura 38. (a) Señalización GCP7 en el terreno, (b) Georreferenciación GCP 7

Markers	Easting	Northing	Altitude
point 1	99431.505000	97488.309000	2645.311000
point 2	99400.725000	97476.510000	2644.591000
point 3	99408.916000	97425.515000	2647.117000
point 4	99355.161000	97427.154000	2643.623000
point 5	99336.130000	97495.760000	2642.750000
point 6	99344.803000	97544.044000	2641.150000
point 7	99231.166000	97462.230000	2640.608000

Figura 39. Asignación de coordenadas GCP

En la figura 40, se puede evaluar la posición exacta de todos los GCP sobre la nube de puntos densa, los cuales se georreferencian sobre los frames con el sistema de referencia Magna Colombia Bogotá.

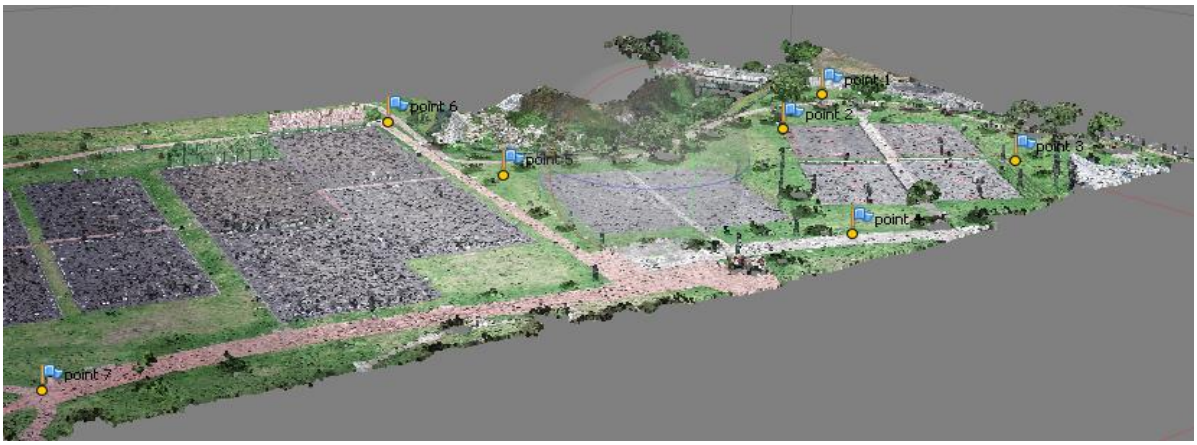
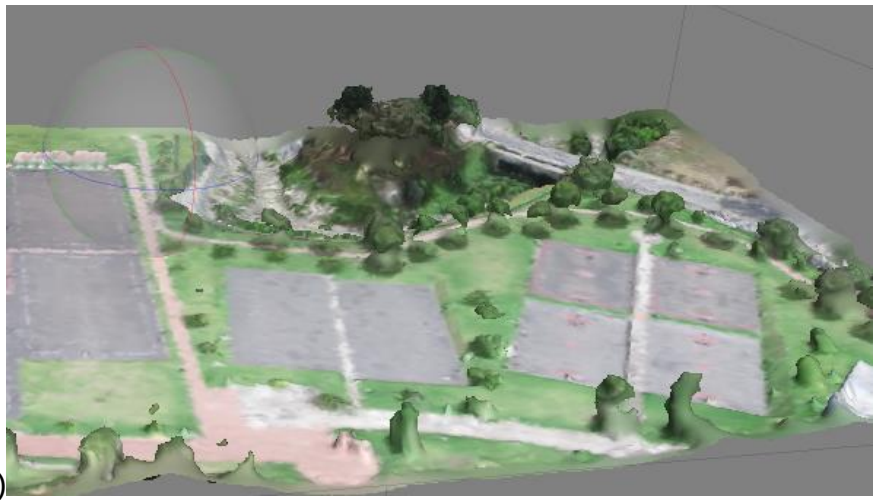


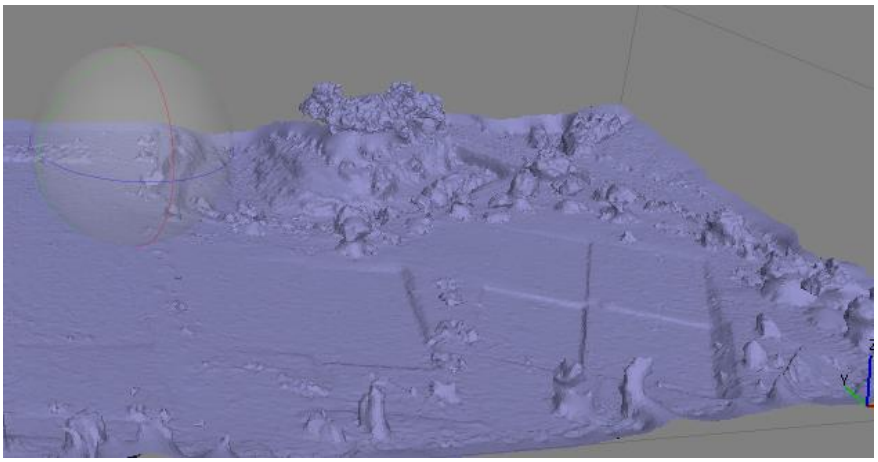
Figura 40. GCP sobre la nube de puntos densa

A partir de la georreferenciación del proyecto, se realiza la triangulación del terreno (con el fin de llenar todos los vacíos puntuales del modelo), mediante la información 2D de todos los puntos; ésta, es constituida por una malla poligonal que permite la representación de diferentes texturas (las cuales pueden ser usadas para identificar materiales, tipos de terrenos, entre otros); este proceso, da como resultado la recreación del bloque del área de estudio, en una visión 3D, utilizando la herramienta “Build mesh” (figura 41), con la creación de 146.523 caras, con 74.120 vértices. Finalmente, el DEM se genera con base en los resultados de la nube densa de puntos y la triangulación del terreno, con una resolución de 13.3 cm/pixel y una nube densa de puntos de 56.635 por m^2, el resultado se ilustra en la figura 42.

(a)



(b)



(c)

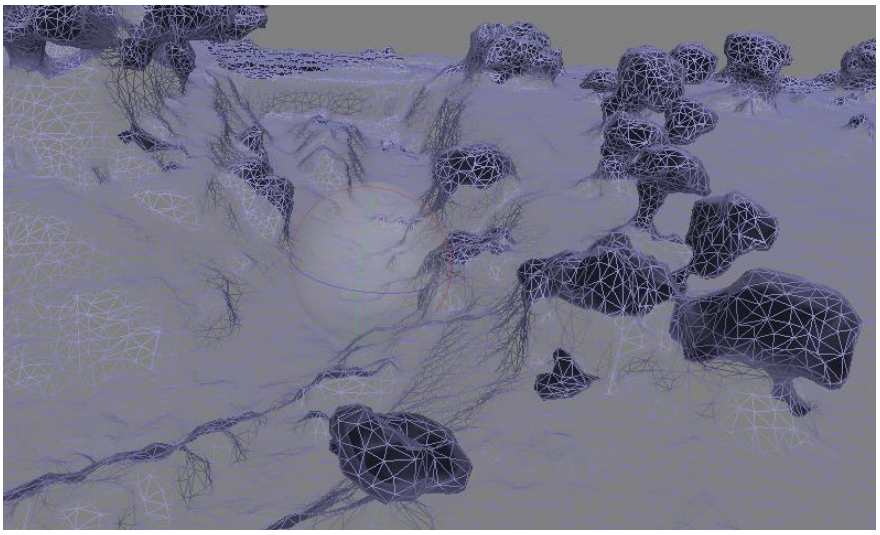


Figura 41. Modelo 3D del proyecto, (a) DSM con la textura de la imagen, (b) relieve de sombras, (c) malla creada a partir de la nube de puntos

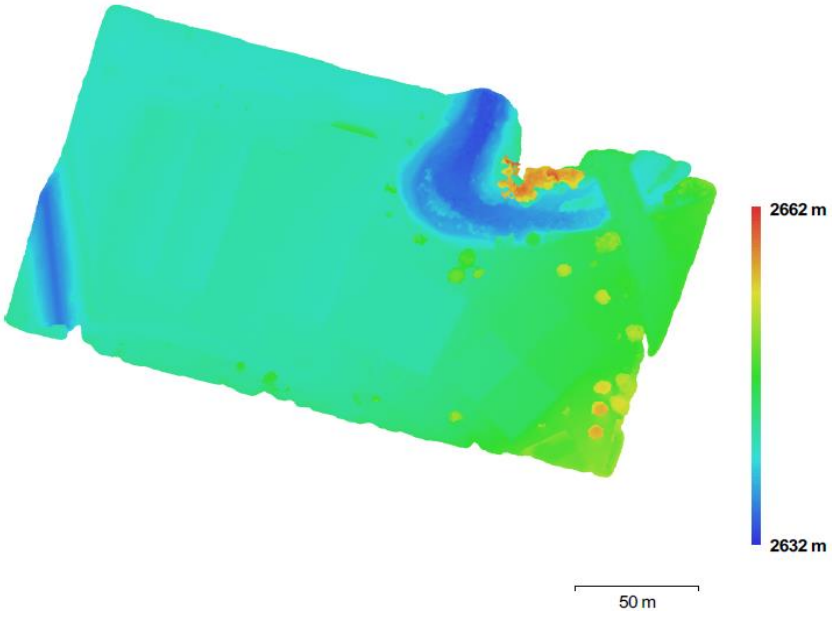


Figura 42. DEM del proyecto

5.1.6. Producción de la ortofoto

La producción de la ortofoto, se realiza mediante la herramienta "Build orthomosaico"; para su obtención se utiliza un valor de pixel de 3.32 cm, recomendado por el sistema de acuerdo a la resolución calculada por él mismo. El resultado de la ortofoto se ilustra en la figura 43, con un tamaño de 8.765x6.177 px; georreferenciado en el sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá.

La elaboración de la ortofoto sobre el área de estudio del parque metropolitano san Cristóbal, genera una imagen con pocas distorsiones que puede ser usada como plano cartográfico.

Nota: La producción de los modelos digitales y la ortofoto, se procesan en calidad Media, debido a la capacidad del equipo de cómputo.

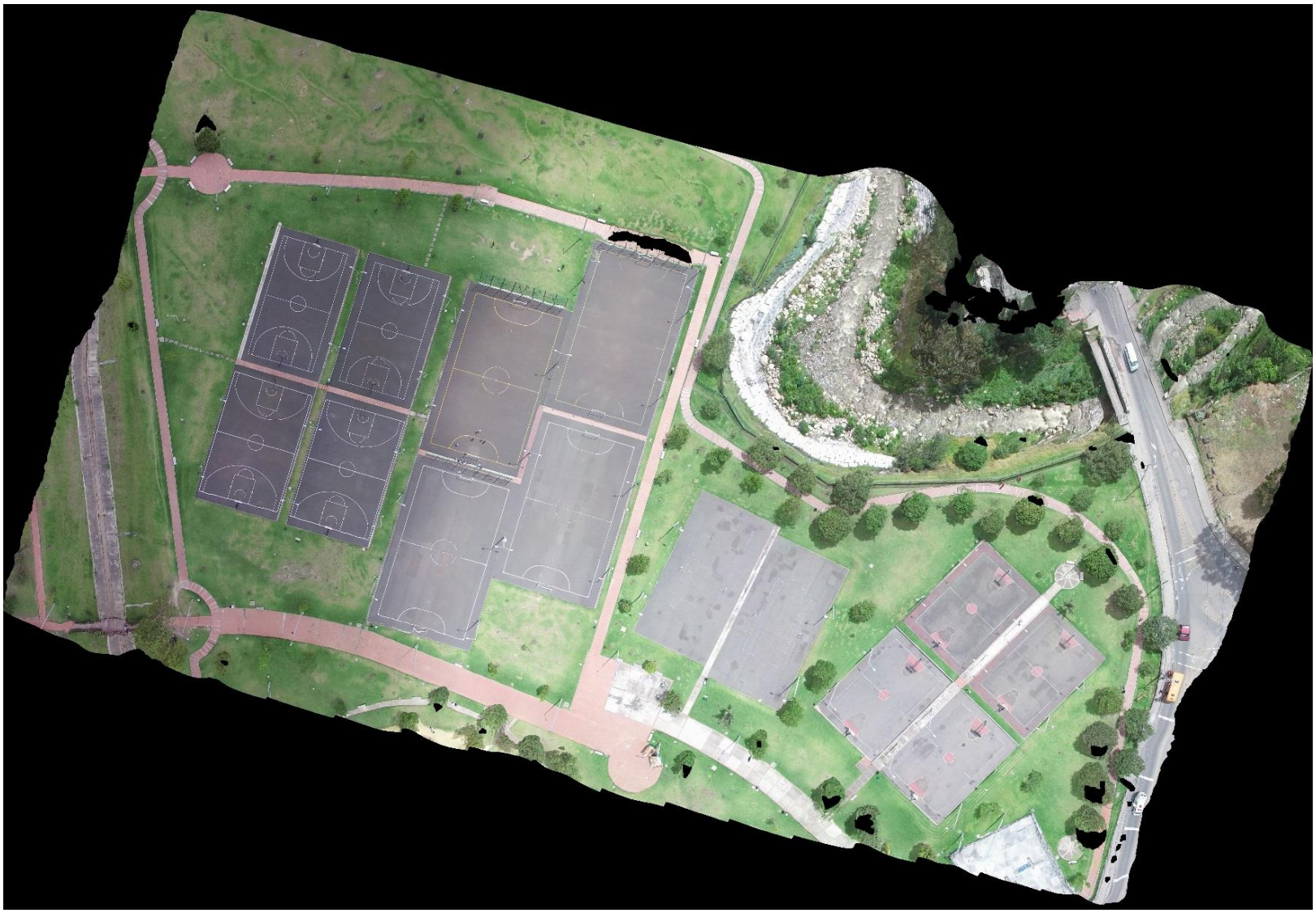


Figura 43. Ortofoto del proyecto

Capítulo 6.

ALGORITMO DE MEDICIÓN

El algoritmo de medición que se presenta en este trabajo de grado, tiene como objetivo ofrecer una nueva y útil herramienta, para calcular distancias entre dos puntos con coordenadas planas cartesianas, presentes en una ortofoto producida en un ambiente controlado de primera aproximación de un vuelo Videogramétrico. Un beneficio adicional de esta programación geomática, radica en el cálculo de la distorsión de lentes producido por la cámara, para cada punto captado antes de ejecutar el cálculo de la distancia.

6.1. PARÁMETROS

6.1.1. Distancia entre dos puntos

Se busca calcular la distancia que existe entre dos puntos en el eje horizontal; siendo ésta, la distancia más pequeña entre ellos. La noción de distancia en R^n, se puede considerar como la distancia entre dos puntos en R^2.

El cálculo de esta distancia se denomina, métrica euclidiana y se generaliza en R^n (Macho Stadler, 2007).

$$\|\bar{x} - \bar{y}\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Ecuación 17. Cálculo distancia métrica euclidiana

Donde, $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ son elementos que se encuentran en eje *x*, correspondientes a las coordenadas "*este*" del plano cartesiano, y $\bar{y} = (y_1, \dots, y_n)$ son elementos en el eje *y* del mismo, para las coordenadas "*norte*".

6.1.2. Corrección por distorsión de lentes

La distorsión de lentes, causa que la posición real del punto sea desplazada; normalmente el valor de esta distorsión, es menor a 5 µm y se corrige en trabajos de alta precisión (Wolf & Dewitt, 2000). Para su apropiada corrección se tienen en cuenta los valores de distorsión radial calculados en la calibración de la cámara.

En primer lugar, se calculan las coordenadas a una posición relativa de los puntos principales (ecuación 18); posterior a ello, se calcula la distancia radial, que existe a dichos puntos (ecuación 19); la distorsión radial de lentes se calcula a partir del polinomio basado en la teoría del diseño de lentes (ecuación 20).

$$\bar{x} = x - x_p \qquad \bar{y} = y - y_p$$

Ecuación 18. Cálculo posición relativa de los puntos

Donde,

$\bar{x}$, $\bar{y}$, son los nuevos puntos relativos

x_p, y_p, son los puntos principales

x, y, son los puntos originales tomados del modelo

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

Ecuación 19. Cálculo distancia radial

$$\Delta r = k_1 r^1 + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7$$

Ecuación 20. Polinomio de distorsión radial

Donde,

Δr, es la distorsión radial

$k_1,\ k_2,\ k_3,\ k_4$, son los parámetros de la distorsión radial

r^n, es la distancia radial calculada en la ecuación 19.

Teniendo en cuenta que el error por distorsión de lentes, es un desplazamiento de las coordenadas, se debe calcular la distancia de error que existe entre la posición real y la desplazada, en los ejes *x* y *y* (ecuación 21).

$$\delta x = \bar{x}\frac{\Delta r}{r} \qquad \delta y = \bar{y}\frac{\Delta r}{r}$$

Ecuación 21. Cálculo de la corrección de la distancia en "x" y en "y".

Donde,

δx, δy, son los componentes de corrección para el eje x y el eje y.

Finalmente, las coordenadas corregidas se obtienen por medio de la diferencia que existe entre los puntos relativos y los componentes de corrección presentados para cada eje (ecuación 22).

$$x_c = \bar{x} - \delta x \qquad y_c = \bar{y} - \delta y$$

Ecuación 22. Cálculo de las coordenadas finales corregidas

Donde,

x_c, x_c, son las coordenadas finales corregidas.

A continuación, en la figura 44, se presenta el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo de programación realizado en la plataforma Java; para el cálculo de distancias entre dos puntos con corrección por distorsión de lentes.

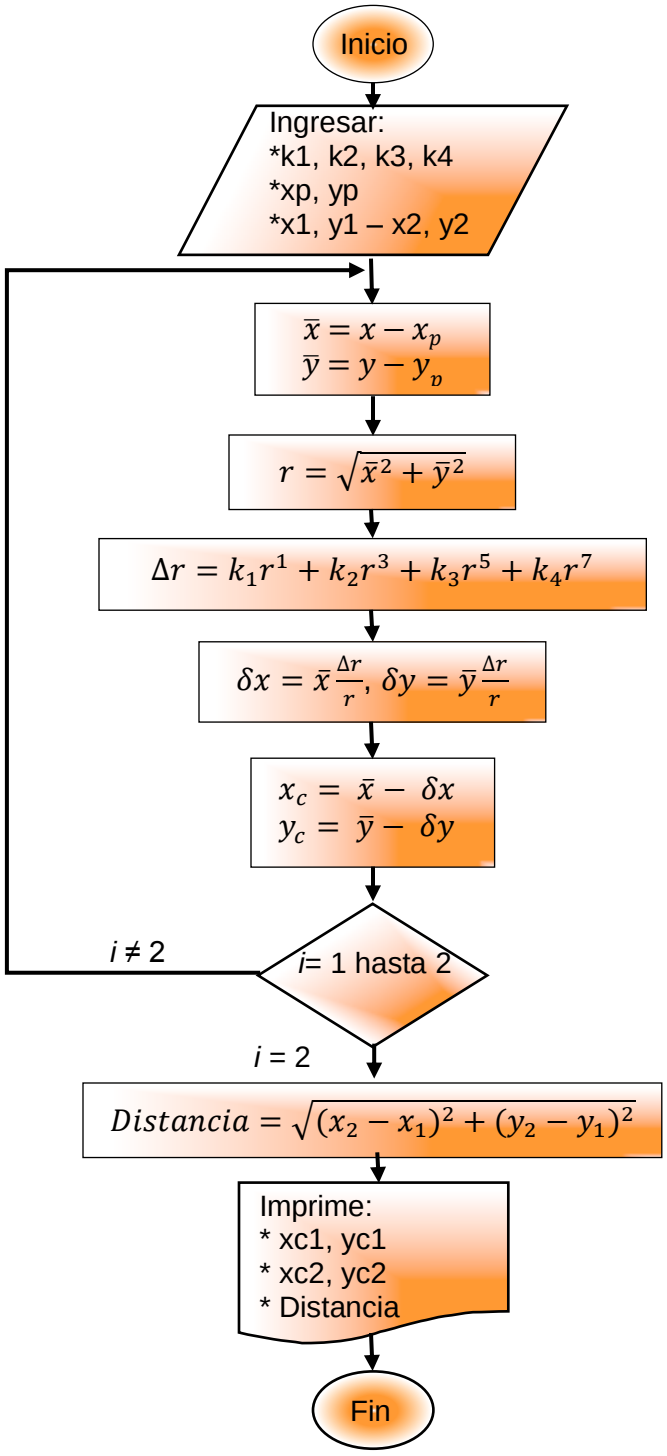


Figura 44. Diagrama de flujo, algoritmo de medición, Fuente: Propia.

Capítulo 7.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Este trabajo, realiza un contraste entre el método 1 (GPS-RTK) y el método 2 (algoritmo de medición con videogrametría), con el fin de comprobar, si el algoritmo de medición aplicado sobre una primera aproximación a la Videogrametría Uav, es capaz de calcular distancias, con la misma precisión que el método tradicional con GPS-RTK. La hipótesis nula (H_0), plantea que no existen diferencias significativas entre los métodos; mientras que la hipótesis alterna (H_A), afirma que sí existen diferencias entre la aplicación de un método y otro.

Para la aplicación y posterior análisis del algoritmo de medición, se selecciona una población de 88 puntos a criterio del investigador, la cual constituye el universo total de análisis; donde la unidad experimental, es cada punto contenido en el espacio de estudio, con unas variables *x* y *y*. Todo el conjunto de datos es seleccionado con base en un muestreo por conveniencia, buscando que cada individuo sea de fácil reconocimiento tanto en campo, como en la ortofoto.

Debido a que la población es pequeña y finita, se opta por trabajar con el tamaño total de la misma, para así acercarse más al conocimiento exacto de los individuos (Gutiérrez P. & De la vara S., 2008). En el anexo 6, se ilustra la población.

La obtención de la población con el método 1, se realiza con un posicionamiento GPS-RTK (posicionados con las mismas condiciones que los GCP y los puntos de

chequeo), para obtener las variables *x* y *y* de los 88 puntos; siendo "x", las coordenadas "*este*", y "y", las coordenadas "*norte*". La variable de respuesta (Distancia entre dos puntos) se calcula a partir de la ecuación 17, utilizando una hoja de Excel.

Se seleccionan parejas de puntos aleatoriamente, con la finalidad de medir la distancia entre ellos; las parejas se conforman a partir de dos listas aleatorias (realizadas en Excel) del número 1 al 88, con reemplazamiento de individuos entre lista y lista, para garantizar que un individuo pueda ser apareado con cualquier otro; sin embargo se maneja la excepción de un apareamiento con un mismo punto en ambas listas y se omite el reemplazamiento de más de una pareja con los mismos individuos.

Por otra parte, para obtener las variables de la población con el segundo método, se identifican los mismos 88 puntos (posicionados con el GPS-RTK), sobre la ortofoto procesada mediante técnicas Videogramétricas (figura 45); posteriormente, las coordenadas que se extraen de la ortofoto, se ingresan individualmente al algoritmo de programación para calcular la distancia con corrección de distorsión de lentes, existente entre ellos (figura 46).

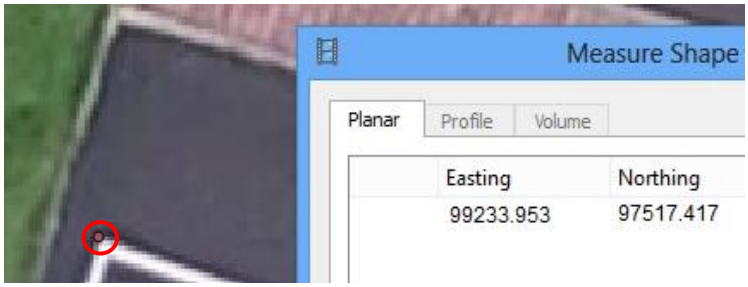


Figura 45. Toma de coordenadas en Agisoft, método 2

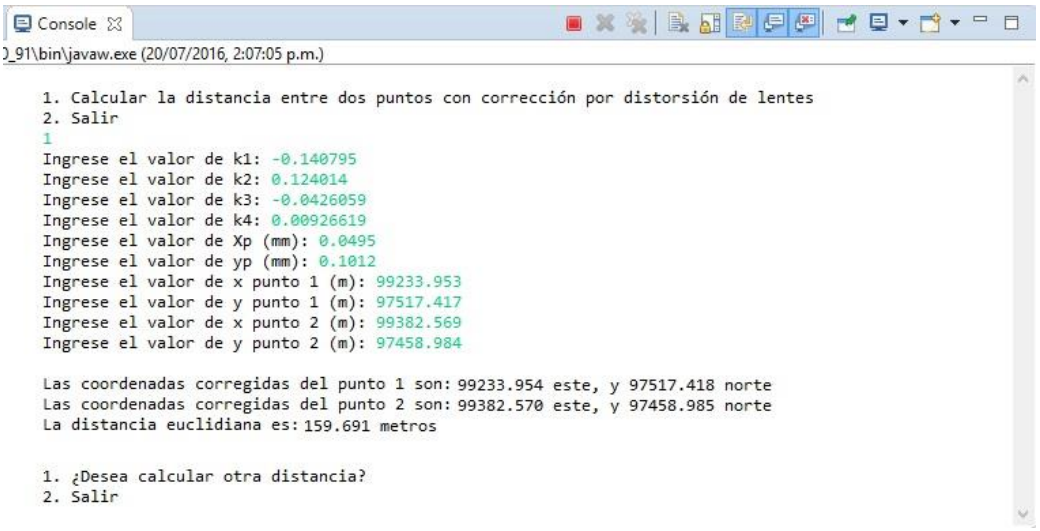


Figura 46. Aplicación del algoritmo, pareja aleatoria 6 – 73.

Capítulo 8.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, comprenden comparaciones de medidas, a partir de técnicas tradicionales, y de medidas en una ortofoto a partir de la Videogrametría Uav.

8.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO 1 Y EL MÉTODO 2

Con el fin de realizar una inferencia estadística acerca de la comparación de los dos métodos, se realiza un análisis no paramétrico; con la información correspondiente a las variables de distancia, para el método 1 (GPS-RTK), y para el método 2 (Algoritmo); con el fin de comprobar si existe una distribución normal entre los datos. Se plantea una hipótesis nula, en la cual los datos siguen una distribución normal, y una hipótesis alterna de que los datos no la cumplen; para ello se aplica la prueba de Kolmogorov – Smirnov con un 95% de probabilidad, la cual arroja como resultado un estadístico de prueba, p = 0.164 para el método 1, y un p= 0.168 para el método 2, ambos valores mayores a p=0.05; en la tabla 14 se relacionan los datos obtenidos, y en la figura 47 y 48, se presenta un histograma de las distribuciones para el primer y segundo método respectivamente, junto con la curva de distribución normal.

Tabla 14. Prueba de normalidad, Kolmogorov-Smirnov

Método	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	gl	Significancia
Método 1	0.085	88	0.164
Método 2	0.085	88	0.168

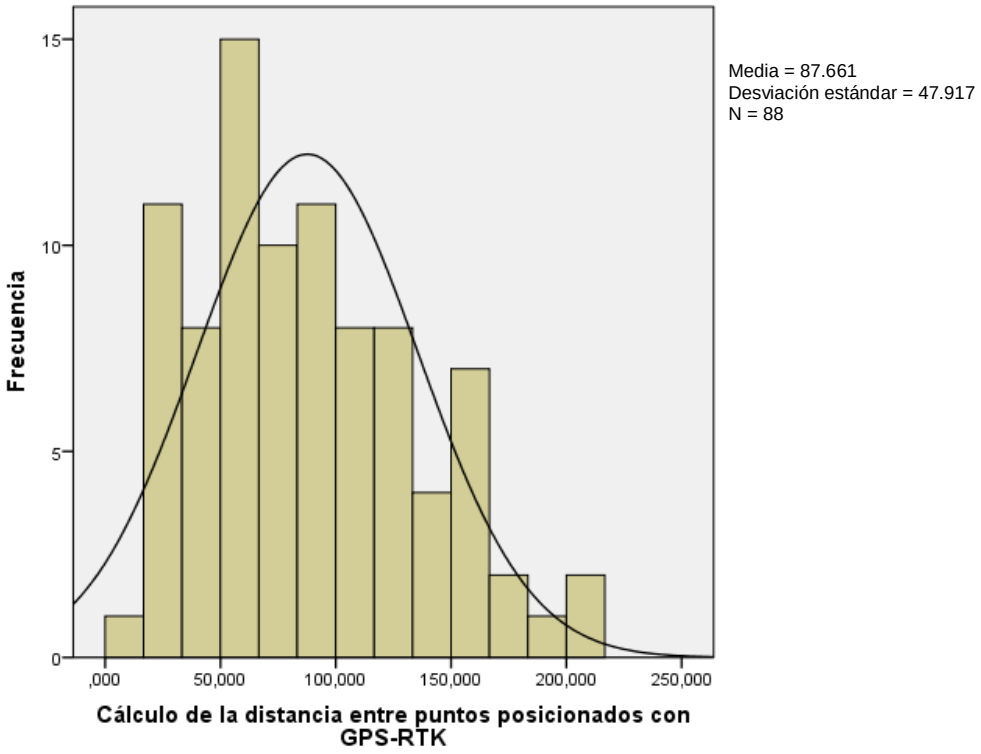


Figura 47. Histograma de distribución, método 1

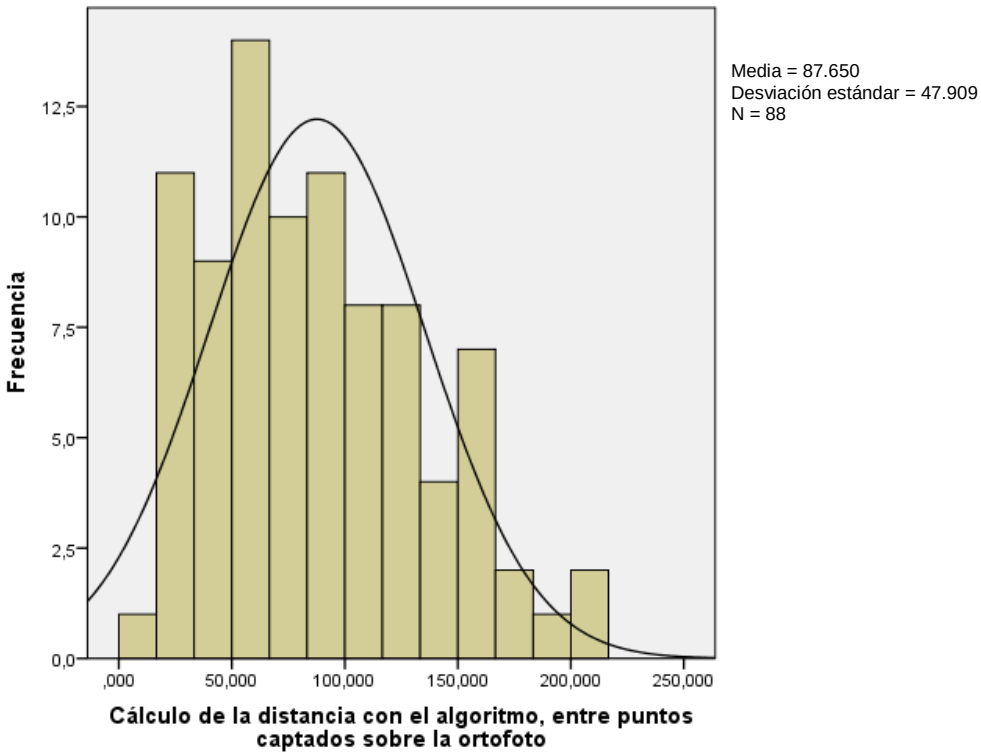


Figura 48. Histograma de distribución, método 2

De acuerdo con los resultados de la prueba, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, debido a que los valores de los estadístico son mayor a p=0.05, por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, o sea que los datos para ambos métodos se distribuyen normalmente.

Se procede a ejecutar un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, donde se realiza un contraste de hipótesis, en el cual la hipótesis nula es que todas las medias son iguales, y la hipótesis alterna es que al menos una media difiere de las demás.

Tabla 15. ANOVA

ANOVA					
Distancia entre dos puntos: Método 1 y Método 2					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.005	1	0.005	0.000	0.999
Dentro de grupos	399447.223	174	2295.674		
Total	399447.228	175			

El resultado del ANOVA, presenta un valor de significancia de p = 0.999, mayor p = 0.05; por lo cual, se acepta la hipótesis nula, debido a que los métodos no presentan diferencias significativas entre sus repeticiones (parejas aleatorias), es decir, no existen diferencia entre la aplicación del método 1 y del método 2, para el cálculo de distancias entre dos puntos.

8.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO VIDEOGRAMÉTRICO

La estadística aplicada para el análisis de la exactitud del modelo Videogramétrico, supone que los errores se aproximan a una distribución normal del error, y que el error medio, es relativamente pequeño en relación con la exactitud de destino. Los datos están orientados a satisfacer la exactitud horizontal de un $RMSE_x$ (Raíz del error medio cuadrático) y $RMSE_y$ máximo de 5 cm, y un valor de exactitud vertical de 2.5 cm; con base en los estándares nacionales para la exactitud de datos espaciales (NSSDA – National Standard for Spatial Data Accuracy), (ASPRS, 2014).

Para el análisis de la precisión, se utilizan los 20 puntos de chequeo, distribuidos dentro del área de estudio (figura 31 del capítulo de Videogrametría aérea), y posicionados con GPS-RTK; dichos puntos, se toman tanto en campo, como en el modelo digital para obtener la relación que existen entre sus coordenadas. En la tabla 16, se relacionan las coordenadas de los puntos de chequeo, el error residual entre ellas, los valores de RMSE y los resultados del cálculo de la exactitud con un nivel de confianza del 95%. Este conjunto de datos se prueba para cumplir con los estándares de exactitud posicional de datos geoespaciales digitales de la ASPRS; donde, para 5 cm de $RMSE_X$/$RMSE_Y$ de exactitud horizontal, se encuentra una precisión para la posición actual de un $RMSE_X$= 3.3 cm y un $RMSE_Y$= 2.5 cm; lo que equivale a una precisión horizontal = ± 7.1 cm con un nivel de confianza del 95%. Por otra parte, para 2.5 cm de $RMSE_z$ de exactitud vertical, se encuentra una precisión para la posición actual un $RMSE_z$= 2 cm; lo que equivale a una precisión vertical = ± 8.1 cm con un nivel de confianza del 95%.

Punto ID	Valores del GPS-RTK			Valores de la superficie del Modelo			Errores Residuales		
	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN	Δx ESTE	Δx NORTE	Δx ELEVACIÓN
	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros
CP1	97463.018	99230.233	2640.597	97463.025	99230.206	2640.584	-0.007	0.027	0.013
CP2	97456.966	99230.438	2640.546	97456.957	99230.468	2640.579	0.009	-0.030	-0.033
CP3	97463.951	99237.713	2640.813	97463.977	99237.698	2640.792	-0.026	0.015	0.021
CP4	97551.171	99244.163	2640.362	97551.189	99244.132	2640.337	-0.018	0.031	0.025
CP5	97561.245	99233.217	2638.692	97561.285	99233.252	2638.701	-0.040	-0.035	-0.009
CP6	97563.777	99233.377	2638.670	97563.782	99233.373	2638.664	-0.005	0.004	0.006
CP7	97490.150	99295.716	2641.768	97490.196	99295.764	2641.792	-0.046	-0.048	-0.024
CP8	97496.684	99274.899	2638.106	97496.726	99274.868	2638.121	-0.042	0.031	-0.015
CP9	97541.638	99340.297	2641.316	97541.614	99340.316	2641.327	0.024	-0.019	-0.011
CP10	97445.372	99296.245	2641.849	97445.335	99296.251	2641.861	0.037	-0.006	-0.012
CP11	97440.679	99308.498	2642.860	97440.659	99308.486	2642.841	0.020	0.012	0.019
CP12	97479.891	99355.870	2642.170	97479.881	99355.907	2642.192	0.010	-0.037	-0.022
CP13	97471.965	99372.151	2642.292	97472.004	99372.176	2642.281	-0.039	-0.025	0.011
CP14	97434.331	99344.519	2643.198	97434.355	99344.535	2643.187	-0.024	-0.016	0.011
CP15	97464.663	99416.900	2645.307	97464.658	99416.921	2645.318	0.005	-0.021	-0.011
CP16	97470.546	99421.139	2645.608	97470.482	99421.145	2645.655	0.064	-0.006	-0.047
CP17	97451.905	99429.863	2645.424	97451.917	99429.869	2645.434	-0.012	-0.006	-0.010
CP18	97412.080	99362.572	2644.396	97412.097	99362.590	2644.386	-0.017	-0.018	0.010
CP19	97431.310	99322.155	2642.672	97431.385	99322.120	2642.647	-0.075	0.035	0.025
CP20	97458.137	99321.371	2642.257	97458.150	99321.391	2642.240	-0.013	-0.020	0.017
Número de puntos de chequeo							20	20	20
Error medio (m)							-0.010	-0.007	-0.002
Desviación estándar (m)							0.032	0.025	0.020
RMSE (m)							0.033	0.025	0.020
RMSEr (m)							0.041	RAIZ($RMSE_x^2$ +$RMSE_y^2$)	
NSSDA exactitud horizontal$_r$ (ACCr) nivel de confianza 95%							0.071	RMSEr * 1.7308	
NSSDA exactitud Vertical$_r$ (ACCr) nivel de confianza 95%							0.081	RMSEr * 1.9600	

Tabla 16. Estadísticas de precisión con las coordenadas 3D del proyecto.

Capítulo 9.

CONCLUSIONES

A nivel teórico, este trabajo permite presentar por primera vez, una propuesta metodológica para la implementación de la Videogrametría Uav, como una técnica de no contacto, para reconstruir vistas de la superficie terrestre en toda su extensión.

El análisis estadístico de la producción de una ortofoto a partir de esta técnica, según los estándares de la ASPRS, arroja resultados positivos de los cuales se puede deducir que, el modelo se ajusta teóricamente en precisión a los requerimientos cartográficos, con unos valores de $RMSE_x$ = 0.033 m, $RMSE_y$ = 0.025 m, $RMSE_Z$ = 0.02 m. Con esto se puede afirmar que a partir de la Videogrametría Uav, y por medio de la aplicación de la metodología aquí propuesta, es posible realizar productos cartográficos de precisión.

Por otra parte, para fines prácticos, la Videogrametría Uav permite el control total de los datos al momento del post proceso, debido a que se pueden realizar reestructuraciones posteriores o incluso, la realización de varios proyectos con diferentes traslapos abarcando la misma zona, por medio de la extracción de frames; sin contar, que el video de captura le muestra al usuario, una perspectiva más real de la zona y con más detalles, lo que le permite analizar y enfocar de una manera más eficaz los productos finales.

No hay que perder de vista, que el desarrollo aquí presentado es una primera aproximación a la técnica; lo cual implica que se debe de tener más control sobre toda la metodología, sin olvidar que el trabajo con video difiere en varios aspectos del trabajo con fotografías.

Un segundo aspecto a abordar, es la aplicación del algoritmo de medición sobre ortofotos; donde, según los resultados de este proyecto, el algoritmo no presenta diferencias significativas del trabajo tradicional realizado en campo con GPS-RTK; lo que quiere decir, que esta programación del cálculo de la distancia, sumado a la corrección por distorsión de lentes, puede reemplazar el uso del levantamiento en campo para la toma de medidas sobre un modelo, lo que incurre en una reducción de tiempo y de costos. Sin embargo, cabe resaltar que el margen de error en la aplicación del algoritmo, se encuentra relacionado con la interacción del usuario y el insumo cartográfico, al momento de la obtención de coordenadas sobre la ortofoto.

Capítulo 10.

RECOMENDACIONES

La continuación de este trabajo, está precedida por la investigación de la cantidad y distribución de los puntos de control, para ajustar un modelo de acuerdo con el tamaño del área de estudio, utilizando plataformas Uav.

Se recomienda realizar otras pruebas de vuelos Videogramétricos, en los cuales existan variaciones en los valores de GSD, altura de vuelo y traslapo deseado; adicional a ello, es importante desarrollar una caracterización y definición de los frames extraídos de video, con el fin de seleccionar las imágenes con menor distorsión.

Por otra parte, se recomienda evaluar el contraste que existe entre la calibración de una cámara, con el software Photomodeler Scanner y con el Software Agisoft Photoscan.

Finalmente, se propone realizar una integración de todo el sistema Videogramétrico Uav, junto con el algoritmo de medición; con el fin de ofrecer un sistema automático o semiautomático, en donde la plataforma este directamente enfoca en el tratamiento de los videos.

REFERENCIAS

Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M., & Hauck, M. (2015). Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *81*(2), 103–107. http://doi.org/10.14358/PERS.81.2.103

Aber, J. S., Marzolff, I., & Ries, J. B. (2010). Basic principles of small-format aerial photography. In *Small-Format Aerial Photography* (pp. 15–22). http://doi.org/10.1016/B978-0-444-53260-2.10008-0

Agisoft PhotoScan Professional (Versión 1.2). (2016). St. Petersburg, Russia.

Anai, T., Sasaki, T., Otani, H., Osaragi, K., & Kochi, N. (2014). Aerial photogrammetry procedure optimized for micro UAV. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *40*(5), 41–46. http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-41-2014

ASPRS. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *81*(3), 1–26. http://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, *110*(3), 346–359. http://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014

Black, J. T., & Pappa, R. S. (2003). Videogrammetry Using Projected Circular Targets : Proof-of-Concept Test. *NASA Langley Research Center*.

Brilakis, I., Fathi, H., & Rashidi, A. (2011). Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry. *Automation in Construction*, *20*(7), 884–895. http://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.03.005

Caire Lomeli, J. (1977). *FOTOGRAMETRIA – I Fotogrametría Terrestre*. *Editorial Rodriguez*. Distrito Federal, México.

Corporation, S. (n.d.). *Characteristics sensor EXMOR R*.

Deagostini Routin, D. (1971). *FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y PLANEACIÓN DE VUELOS*. *Centro interamericano de fotointerpretación* (Vol. 1). Bogotá: Ministerio de obras públicas.

Díaz, C. A., Torres, A., Ramírez, J. I., García, L. F., & Álvarez, N. (2006). Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones, CineMED. *Revista EIA*, (5), 85–92.

DJI. (2015). *Phantom 3 Professional - Manual de usuario*.

Eisenbeiß, H. (2009). *UAV photogrammetry*. *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing*. http://doi.org/doi:10.3929/ethz-a-005939264

Fathi, H., & Brilakis, I. (2011). Automated sparse 3D point cloud generation of infrastructure using its distinctive visual features. *Advanced Engineering Informatics*, *25*(4), 760–770. http://doi.org/10.1016/j.aei.2011.06.001

Fathi, H. (2016). Correo electrónico: Question about research article "Progressive 3D reconstruction of infraestructure with videogrammetry".

Fernández-Hernández, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications. *Archaeometry*, *57*(1), 128–145. http://doi.org/10.1111/arcm.12078

Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *104*, 101–111. http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009

González Iturbe Ahumada, J. A. (2004). V. Sensores Remotos Y Manejo De Información Geográfica. In *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. México: Universidad Nacional Autónoma de México - Universidad Autónoma de Yucaton - Conacyt - Instituto Nacional de Ecología. http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

González-Jorge, H., Puente, I., Roca, D., Martínez-Sánchez, J., Conde, B., & Arias, P. (2014). UAV Photogrammetry Application to the Monitoring of Rubble Mound Breakwaters. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *6*(1), 04014194. http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000702

Graham, R., & Koh, A. (2002). *Digital Aerial Survey: Theory and Practice*. *Whittles Publishing*. http://doi.org/10.1179/003962603791482820

Gruen, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry — A review. *Human Movement Science*, *16*(2), 155–187. http://doi.org/10.1016/S0167-9457(96)00048-6

Grupo PR. (2009). Sensores y Plataformas. *Telecentro Regional En Tecnologias Espaciales*. Retrieved from http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr_semana3/index.php?id=33

Gutiérrez P., H., & De la vara S., R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. *McGraw-Hill* (Vol. 2).

Heikkila, J., & Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 415–420. http://doi.org/10.1300/J082v36n01

Hernández López, D. (2006). Introducción a la fotogrametría Digital. *Universidad de Castilla La Mancha*, 81–87. http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2

Herráez, J., Martínez-Llario, J., Coll, E., Rodríguez, J., & Martin, M. T. (2013). Design and calibration of a 3D modeling system by videogrammetry. *Measurement Science and Technology*, *24*(3), 035001. http://doi.org/10.1088/0957-0233/24/3/035001

Herráez, J. (2016). Correo electrónico: Questions about research article "Design and calibration of a 3D modeling by videogrammetry".

Hobbs, S., Seynat, C., & Matakidis, P. (2007). Videogrammetry: A practical method for measuring vegetation motion in wind demonstrated on wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, *143*(3-4), 242–251. http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.008

Hu, H., Liang, J., Xiao, Z. Z., Tang, Z. Z., Asundi, A. K., & Wang, Y. X. (2012). A four-camera videogrammetric system for 3-D motion measurement of deformable object. *Optics and Lasers in Engineering*, *50*(5), 800–811. http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.12.011

IGAC. (n.d.). *Procesamiento de información GPS considerando la variación de las coordenadas en el tiempo*.

Leica. (2002). *GPS System 500 Manual de Referencia Técnica*. *Leica Geosystems*.

Leifer, J., Weems, B. J., Kienle, S. C., & Sims, A. M. (2011). Three-Dimensional Acceleration Measurement Using Videogrammetry Tracking Data. *Experimental Mechanics*, *51*(2), 199–217. http://doi.org/10.1007/s11340-010-9352-4

Levin, N. (1999). Fundamentals of Remote Sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *48*(1), 17–27. http://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.009

Linder, W. (2003). *Digital Photogrammetry: Teory and applications*. *Springer*. http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry: a practical course*. Springer Series in Information Sciences. http://doi.org/10.4324/9780203305959

Liu, X., Tong, X., Yin, X., Gu, X., & Ye, Z. (2015). Videogrammetric technique for three-dimensional structural progressive collapse measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *63*, 87–99. http://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.023

Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *International conference on computer vision*. IEEE Conference Publications. http://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close Range Photogrammetry*. *Collision. The International Compendium for Crash Research* (Vol. 2). http://doi.org/10.1111/phor.12114

Macho Stadler, M. (Departamento de matemáticas/Factultad de ciencia y tecnologiía). (2007). *Topología de espacios métricos*.

Mengual, M. A. (n.d.). *Fotografía Aérea : Elementos y Características*.

Niño Chicho, R. (2008). *Procesamiento de fotografías aéreas*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Nizam Tahar, K. (2016). Correo electrónico: Question about research article: "Assessment on ground control point in unmanned aerial system image processing for slope mapping studies".

Oniga, E., & Diac, M. (2013). Metric and non-metric cameras calibration for the improvement of real-time monitoring process results. *Environmental Engineering and Management Journal*, *12*(4), 719–726.

Perez, D. J. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*. *Universidad de Buenos Aires* (Vol. 09).

Photomodeler Scanner (Versión 2016). (2016). Vancouver, Canadá.

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2012). Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXVIII-1/*, 25–31. http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011

Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, *73*, 619–627. http://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018

Ryan, J. C., Hubbard, A. L., Box, J. E., Todd, J., Christoffersen, P., Carr, J. R., … Snooke, N. (2015). UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *Cryosphere*, *9*(1), 1–11. http://doi.org/10.5194/tc-9-1-2015

Saadatseresht, M., Hashempour, A. H., & Hasanlou, M. (2015). Uav Photogrammetry: a Practical Solution for Challenging Mapping Projects.

ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, *XL-1-W5*, 619–623. http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-619-2015

Santamaría Peña, J., & Sanz Méndez, T. (2011). *Fundamentos de Fotogrametría*.

Suziedelyte Visockiene, J., Puziene, R., Stanionis, A., & Tumeliene, E. (2016). Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry: Analysis of Orthophoto Images over the Territory of Lithuania. *International Journal of Aerospace Engineering*, *2016*(i). http://doi.org/10.1155/2016/4141037

Tahar, K. N. (2013). AN EVALUATION ON DIFFERENT NUMBER OF GROUND CONTROL POINTS IN.pdf. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *XL-2/W2*(November), 27–29.

Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *73*, 539–543. http://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010

Vollgger, S. A., & Cruden, A. R. (2016). Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *Journal of Structural Geology*, *85*, 168–187. http://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.02.012

Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). *ELEMENTS OF PHOTOGRAMMETRY - WITH APPLICATIONS IN GIS*. *McGraw-Hill* (Vol. 3).

ANEXO 1

CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA CON PHOTOMODELER SCANNER

Status Report Tree

Project Name: Camera calibration Videogrammetry

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: Phantom 3 Pro

Focal Length

Value: 4.8 mm

Deviation Focal: 0.016 mm

Xp - principal point x

Value: 4.559618 mm

Deviation: Xp: 0.006 mm

Yp - principal point y

Value: 2.373047 mm

Fw - format width

Value: 9.004818 mm

Deviation: Fw: 0.001 mm

Fh - format height

Value: 4.746094 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 6.246e-003

Deviation: K1: 2.5e-004

K2 - radial distortion 2

Value: -1.356e-004

Deviation: K2: 1.8e-005

K3 - radial distortion 3

Value: 6.79296e-013

P1 - decentering distortion 1

Value: 3.03758e-007

P2 - decentering distortion 2

Value: 8.33368e-007

ANEXO 2

CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA CON AGISOFT PHOTOSCAN

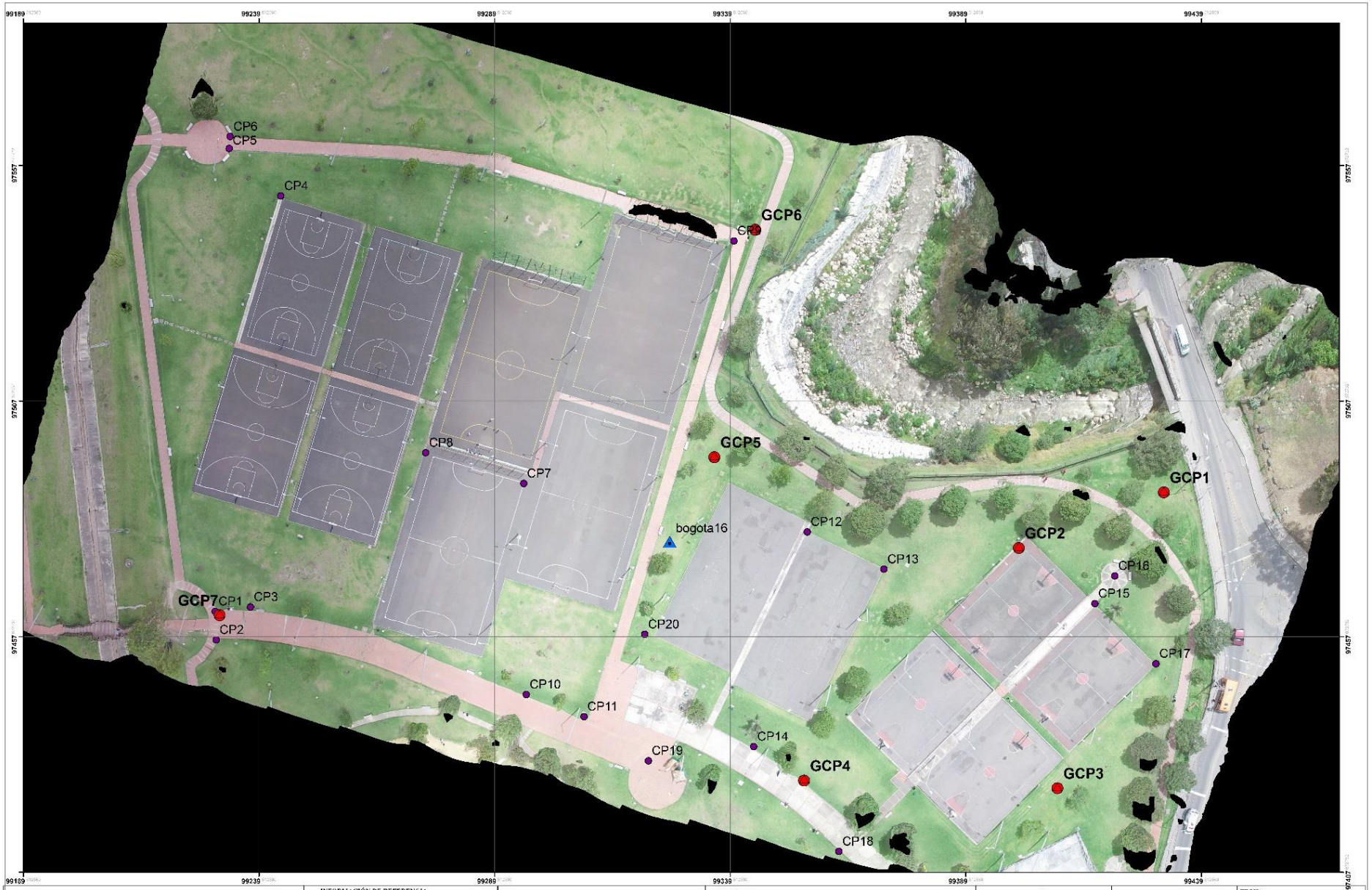
Results for Camera 1: Phantom 3 Pro

Image Size		Pixel Size (mm)
H	4096	0.00934355
V	2160	0.00934355

Camera Parameter	Final Value	Final Std. Error
XP	0.0495	1.000e-003 (mm)
YP	0.1012	1.000e-003 (mm)
K1	-1.4079e-001	1.000e-003
K2	-1.2401e-001	1.000e-003
K3	-4.2605e-002	1.000e-003
K4	-9.2661e-003	1.000e-003
P1	-3.2839e-005	1.000e-003
P2	-1.3528e-005	1.000e-003

ANEXO 3

MAPA – UBICACIÓN GCP Y PUNTOS DE CHEQUEO (CP)



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

INFORMACIÓN DE REFERENCIA

SISTEMA DE REFERENCIA	MAGNA - ESRGAS
ELIPSOIDE	WGS 84
PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA	Planas Cartesianas
Coordenadas Geográficas	04°38' 16.32" Latitud Norte 74°04' 39.16" Longitud Oeste
Coordenadas Planas	Falso Este : 1.000.000,000 m. Falso Norte: 1.000.000,000 m.

CONTIENE
PUNTOS DE CONTROL Y DE CHEQUEO ORTOFOTO-VIDEOGRAMETRÍA UAV

REALIZO
ING. PAOLA ANDREA MEJÍA ZULUAGA
CÓD. 20112032032

ESCALA
ESCALA 1 : 500
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50
Un centímetro en el mapa equivale a 5 metros en el terreno

LOCALIZACIÓN
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
PARQUE METROPOLITANO SAN CRISTÓBAL

CONVENCIONES
- PLACA BASE
- GCP
- PTOS CHEQUEO

FECHA
2016-07-22

PLANO
1 DE 2

ANEXO 4.

SEGUIMIENTO GCP

SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 1
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'24.68993"N
Longitud	74°4'57.59291"W
Altura elipsoidal	2645.309

Fotografía – GCP1



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 2
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'24.30607"N
Longitud	74°4'58.59108"W
Altura elipsoidal	2644.590

Fotografía – GCP2



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 3
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'22.64655"N
Longitud	74°4'58.32558"W
Altura elipsoidal	2647.116

Fotografía – GCP3



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 4
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'22.70013"N
Longitud	74°5'0.06881"W
Altura elipsoidal	2643.622

Fotografía – GCP4



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 5
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'24.93277"N
Longitud	74°5'0.68577"W
Altura elipsoidal	2642.074

Fotografía – GCP5



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 6
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'26.504"N
Longitud	74°5'0.40437"W
Altura elipsoidal	2641.149

Fotografía – GCP6



SEGUIMIENTO – PUNTOS DE CONTROL

INFORMACIÓN GENERAL

Código de Identificación	GCP - 7
Ciudad	Bogotá D.C.
Localidad	San Cristóbal
Barrio	San Cristóbal Sur
Lugar	Parque metropolitano
Fecha	Junio 28 de 2016

COORDENADAS

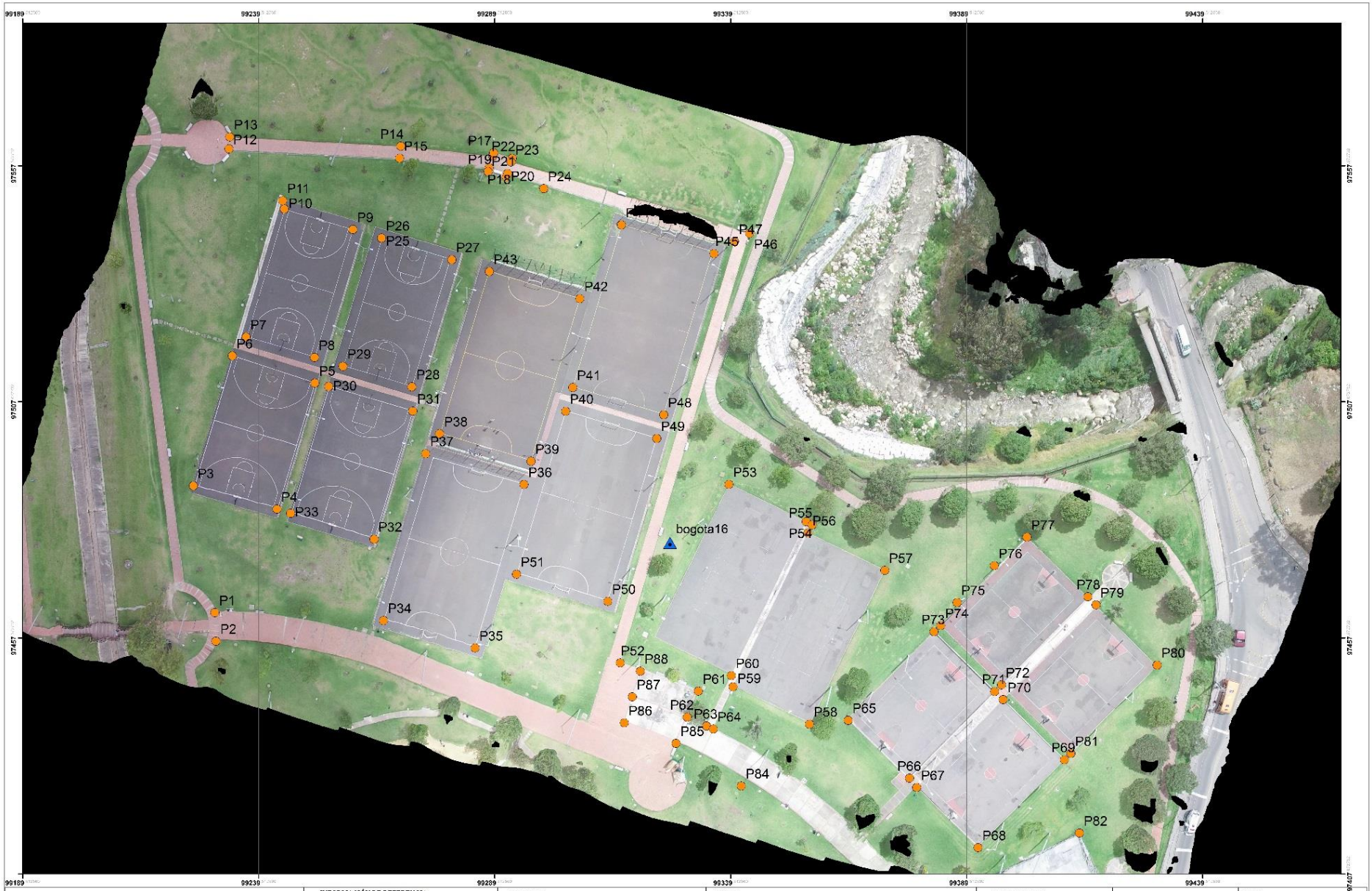
Sistema de Referencia	WGS84
Proyección	MAGNA SIRGAS
Latitud	4°34'23.84194"N
Longitud	74°5'4.08976"W
Altura elipsoidal	2640.608

Fotografía – GCP7



ANEXO 5.

MAPA DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

INFORMACIÓN DE REFERENCIA
SISTEMA DE REFERENCIA: MAGNA - SIRGAS
DATUM: WGS 84
PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA: Planas Gauss-conus
Coordenadas Geográficas: 04°38' 48.527" Latitud Norte
74°04' 59.035" Longitud Oeste
Falso Este: 2 000 000.00 m
Falso Norte: 2 000 000.00 m
Coordenadas Planas

CONTIENE
MUESTRA POBLACIONAL
ORTOFOTO-VIDEOGRAMETRÍA UAV

REALIZÓ
ING. PAOLA ANDREA MEJÍA ZULUAGA
CÓD. 20112032032

ESCALA
ESCALA 1 : 500
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50
Un centímetro en el mapa equivale a 5 metros en el terreno

LOCALIZACIÓN
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
PARQUE METROPOLITANO
SAN CRISTÓBAL

CONVENCIONES
PTOS POBLACIÓN
PLACA BASE

FECHA
2016-07-22

PLANO
2 DE 2

ANEXO 6.

ALGORITMO DE MEDICIÓN

```
import java.io.BufferedReader;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStreamReader;
import java.text.DecimalFormat;


public class correcion1 {


	public static void main(String[] args) {
		BufferedReader lin=new BufferedReader(new
		InputStreamReader(System.in));
		String cadena;
		int op,n,o,aa;
		try{
			do{
			System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t\t1.  Calcular  la
			distancia  entre  dos  puntos  con  corrección  por
			distorsión de lentes ");
			System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t\t2.
			Salir\n\t\t\t\t\t\t\t");
			cadena=lin.readLine();
			op=Integer.parseInt(cadena);
			switch(op)
			{
			case 1:
			double
			b,h,r,Dr,Sx,Sy,k1,k2,k3,k4,xp,yp,x1,y1,x2,y2,x,y,x
			c1,yc1,X,Y,R,DR,SX,SY,xc2,yc2;
			//Ingresar parámetros de calibración
			System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese  el  valor  de
			k1: ");
			cadena=lin.readLine();
```

```
k1=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de k2: ");
cadena=lin.readLine();
k2=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de k3: ");
cadena=lin.readLine();
k3=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de k4: ");
cadena=lin.readLine();
k4=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de Xp (mm): ");
cadena=lin.readLine();
xp=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de yp (mm): ");
cadena=lin.readLine();
yp=Double.parseDouble(cadena);
//Ingresar coordenadas punto 1
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de x punto 1 (m): ");
cadena=lin.readLine();
x1=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\tIngrese el valor de y punto 1 (m): ");
cadena=lin.readLine();
y1=Double.parseDouble(cadena)
//Ingresar coordenadas punto 2
```

```
System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese el valor de
x punto 2 (m): ");

cadena=lin.readLine();

x2=Double.parseDouble(cadena);

System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese el valor de
y punto 2 (m): ");

cadena=lin.readLine();

 y2=Double.parseDouble(cadena);

//Cálculo de coordenadas respecto al origen

 x=(x1-(xp/1000));

 y=(y1-(yp/1000));

//Cálculo distancia radial

 r=Math.sqrt((Math.pow(x, 2))+(Math.pow(y, 2)));

//Cálculo distorsión radial

 Dr=(k1*(r))+(k2*(Math.pow(r,
 3)))+(k3*(Math.pow(r,        5)))+(k4*(Math.pow(r,
 7)));

//Cálculo corrección en x

 Sx=x*(Dr/r);

//Cálculo corrección en y

 Sy=y*(Dr/r);

 //calcular coordenadas corregidas

 xc1=x-Sx;

 double nxc1=Math.round(xc1*1000)/1000.0;

 yc1=y-Sy;

 double nyc1=Math.round(yc1*1000)/1000.0;

 //Cálculo de coordenadas respecto al origen

 x=(x2-xp);

 y=(y2-yp);
```

```
 //Cálculo distancia radial
 r=Math.sqrt((Math.pow(x, 2))+(Math.pow(y, 2)));
 //Cálculo distorsión radial
Dr=(k1*(r))+(k2*(Math.pow(r,  3)))+(k3*(Math.pow(r,
5)))+(k4*(Math.pow(r, 7)));
//Cálculo corrección en x
 Sx=x*(Dr/r);
//Cálculo corrección en y
 Sy=y*(Dr/r);
 //calcular coordenadas corregidas
 xc2=x-Sx;
 double nxc2=Math.round(xc2*1000)/1000.0;
 yc2=y-Sy;
 double nyc2=Math.round(yc2*1000)/1000.0;
System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLas     coordenadas
corregidas  del  punto  1  son:  "+nxc1+"  este,  y
"+nyc1+" norte");
 System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLas     coordenadas
corregidas  del  punto  2  son:  "+nxc2+"  este,  y
"+nyc2+" norte");
 R=Math.sqrt((Math.pow((xc2-xc1),
 2))+(Math.pow((yc2-yc1), 2)));
 double nR=Math.round(R*1000)/1000.0;
System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLa        distancia
euclidiana es: "+nR+" metros");
     do{
System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t1. ¿Desea calcular
otra distancia? ");
System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t2.
Salir\n\t\t\t\t\t\t");
cadena=lin.readLine();
```

```
aa=Integer.parseInt(cadena);
switch(aa)
     {
     case 1:
          do{
System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t¿Desea    utilizar los mismos parámeteros de la cámara? ");
cadena=lin.readLine();
b=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese  el  valor  de x punto 1:");
cadena=lin.readLine();
x1=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese el valor de y punto 1:");
cadena=lin.readLine();
y1=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese  el  valor  de x punto 2:");
cadena=lin.readLine();
x2=Double.parseDouble(cadena);
System.out.print("\t\t\t\t\t\tIngrese  el  valor  de y punto 2:");
cadena=lin.readLine();
y2=Double.parseDouble(cadena);
x=(x1-xp);
y=(y1-yp);
r=Math.sqrt((Math.pow(x, 2))+(Math.pow(y, 2)));
Dr=(k1*(r))+(k2*(Math.pow(r,  3)))+(k3*(Math.pow(r, 5)))+(k4*(Math.pow(r, 7)));
Sx=x*(Dr/r);
```

```
Sy=y*(Dr/r);

//calcular coordenadas corregidas//

xc1=x-Sx;

double nnxc1=Math.round(xc1*1000)/1000.0;

yc1=y-Sy;

double nnyc1=Math.round(yc1*1000)/1000.0;

//cÃ¡lculo X y Y

x=(x2-xp);

y=(y2-yp);

//cÃ¡lculo r

r=Math.sqrt((Math.pow(x, 2))+(Math.pow(y, 2)));

//cÃ¡lculo Dr

Dr=(k1*(r))+(k2*(Math.pow(r,  3)))+(k3*(Math.pow(r,
5)))+(k4*(Math.pow(r, 7)));

//cÃ¡lculo Sx y Sy

Sx=x*(Dr/r);

Sy=y*(Dr/r);

//calcular coordenadas corregidas

xc2=x-Sx;

double nnxc2=Math.round(xc2*1000)/1000.0;

yc2=y-Sy;

double nnyc2=Math.round(yc2*1000)/1000.0;

System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLas     coordenadas
corregidas del punto 1 son: "+ nnxc1+" este, y
"+nnyc1+" norte");

System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLas     coordenadas
corregidas del punto 2 son: "+ nnxc2+" este, y
"+nnyc2+" norte");

R=Math.sqrt((Math.pow((xc1-xc2),
2))+(Math.pow((yc1-yc2), 2)));
```

```
                double nnR=Math.round(R*1000)/1000.0;

                System.out.print("\n\t\t\t\t\t\tLa       distancia
                euclidiana es: "+nnR +" metros");

                System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t¿Desea    calcular
                con los mismos parametros? : ");

                cadena=lin.readLine();

                b=Double.parseDouble(cadena);

                }while(b!=1);

                System.out.print("\n\t\t\t\t\t\t Por favor ingrese
                los nuevos parámetros de la cámara: ");

                }

            }while(aa!=2);

          }

     }while(op!=2);

     }

    catch(IOException W)

    {System.out.print("ERROR");}

  }

}
```