



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS

**METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE ORTOFOTOS
Y MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN DE ALTA
RESOLUCIÓN A TRAVÉS DE IMÁGENES OBTENIDAS
CON DRONES NO-FOTOGRAFAMÉTRICOS**

QUE PRESENTA

ING. ABEL NÁJERA RAMOS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA INNOVACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO, OPCIÓN TERMINAL: GEOMÁTICA**

DIRECTOR DE TESIS

DR. RENÉ VÁZQUEZ JIMÉNEZ

CO-DIRECTORA DE TESIS

DRA. ROCÍO NAYELLY RAMOS BERNAL

CHILPANCINGO, GRO., ENERO 2021

DEDICATORIA

A Dios

Porque siempre está conmigo.

A mi madre, Celia

Por todo el sacrificio que ha hecho para que mis hermanos y yo estemos bien.

A mis hermanos, Frank, Chris y Shey

Por todo su apoyo y por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque me acompaña en mi camino y porque ha cumplido todas sus promesas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el recurso otorgado durante mi estancia en el posgrado.

A la Universidad Autónoma de Guerrero y a la Facultad de Ingeniería por gestionar el equipo necesario para la conclusión de este trabajo de investigación.

Al Dr. René Vázquez Jiménez, Director de tesis, y la Dra. Rocío N. Ramos Bernal, ambos por toda su ayuda y por mostrarme su visión de compartir el conocimiento adquirido con la siguiente generación.

A mi madre Celia Ramos Sagrero, porque sin ella no hubiera llegado donde estoy; su apoyo, todo ese sacrificio que solo una verdadera madre hace por sus hijos y porque todo lo bueno que hay en mí viene de ella.

A mis hermanos Frank, Chris y Shey que no me dejaron ni a sol ni sombra, siempre atentos de lo que me faltara.

A K. Y. Serrano, por la paciencia en los momentos que el estudio y el trabajo ocuparon mi tiempo.

A Jaz B. G. porque en mi peor momento de enfermedad estuvo conmigo sin dudarlo.

A Ana Ma. L. V. mi mejor amiga, por el entretenimiento y ratos de ocio.

Al resto de mis amigos, pero no menos importantes, Meli & Meli P. M., Meza, Geo, Glo, Wend por compartir su tiempo en esas pequeñas reuniones que hacían olvidar un poco el estrés.

To my brother from another mother Prabu Surendra, you taught me many things bro.

A todos ustedes ¡GRACIAS!

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	I
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	4
ALCANCES	4
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS.....	6
1.1. ANTECEDENTES	6
1.2. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT).....	6
1.2.1. CLASIFICACIÓN DE DRONES	8
1.2.2. OPERACIÓN DE LOS DRONES	12
1.2.3. LOS DRONES Y SUS APLICACIONES	13
1.3. GEOMÁTICA.....	17
1.3.1. FOTOGRAMETRÍA.....	19
1.3.1.1. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL	20
1.3.1.2. ETAPAS DE LA FOTOGRAMETRÍA EN UN PROYECTO CONVENCIONAL.....	20
1.3.1.3. PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	22
1.3.2. TOPOGRAFÍA.....	22
1.3.2.1. LEVANTAMIENTO PLANIMÉTRICO	23
1.3.2.2. LEVANTAMIENTO ALTIMÉTRICO	24
1.3.3. ANÁLISIS Y MODELADO ESPACIAL	28
1.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	30
1.4.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON.....	30
1.4.2. HISTOGRAMA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR, PROMEDIO	32
1.5. APLICACIÓN DE DRONES EN LA TOPOGRAFÍA	34
1.6. HIPÓTESIS	35
2. METODOLOGÍA.....	36
2.1. ZONA DE ESTUDIO.....	36
2.2. MATERIALES	36
2.2.1. PLATAFORMA AÉREA	36
2.2.3. PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE (PCT) PARA GEORREFERENCIACIÓN DE MODELOS ESPACIALES	38
2.2.4. EQUIPO DE CÓMPUTO	40
2.2.5. SOFTWARE	40
2.2.5.1. DINÁMICA EGO	40
2.2.5.2. DJI GO 4.0	41
2.2.5.3. MAP PILOT.....	41
2.2.5.4. PHOTOSCAN	41
2.2.5.5. QGIS	42
2.3. ESQUEMA METODOLÓGICO GENERAL	42
2.3.1. RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	42
2.3.2. PLAN DE VUELO	45

2.3.3. OBTENCIÓN DE DATOS	47
2.3.4. GENERACIÓN DE PRODUCTOS	48
2.3.4.1. GENERACIÓN DE ORTOFOTO	50
2.3.4.2. GENERACIÓN DE MDE	51
2.4. LEVANTAMIENTOS	52
2.4.1. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	52
2.4.2. TOMA DE DATOS ALTIMÉTRICOS Y PLANIMÉTRICOS DE DRONE.....	54
2.5. ANÁLISIS.	54
2.5.1. ANÁLISIS VISUAL.	55
2.5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	56
2.5.2.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON.....	56
2.5.2.2. HISTOGRAMA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR, PROMEDIO.	57
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
3.1. RESULTADOS DE PROYECTO	58
3.2. DISCUSIÓN	60
3.2.1. ANÁLISIS VISUAL.....	61
3.2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	67
3.2.2.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON	67
3.2.2.2. HISTOGRAMA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR, PROMEDIO.	68
4. CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO 1. GUÍA PARA DESBLOQUEO DE EQUIPO A TRAVÉS DE VUELO SEGURO DE DJI	77
ANEXO 2. GUÍA PARA LA CREACIÓN Y EJECUCIÓN DE MISIÓN DE VUELO EN MAP PILOT	82
ANEXO 3. GUÍA BÁSICA “PROCESO DE IMÁGENES EN AGISOFT PHOTOSCAN”	92
ORIENTACIÓN	99
GEORREFERENCIACIÓN.....	103
NUBE DENSA DE PUNTOS.....	109
CONSTRUCCIÓN DE MALLA.....	111
CONSTRUCCIÓN DE TEXTURA DEL MODELO	113
GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	114
GENERACIÓN DE ORTOMOSAICO	116
EXPORTAR RESULTADOS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perspectiva de un artista de la paloma mecánica	2
Figura 2. Esquema de un sistema aéreo no tripulado.....	8
Figura 3. Dragon Eye Micro UAV (Arjomandi et al, 2006).....	9
Figura 4. Pointer dron en combate (Arjomandi et al, 2006)	9
Figura 5. Darkstar (Arjomandi et al, 2006)	10
Figura 6. Drone fotogramétrico de ala fija eBee de senseFly.	11
Figura 7. Drone No-fotogramétrico de cuatro hélices o quadcoptero Phantom 4 Pro.	11
Figura 8. Ejemplo de nivelación diferencial simple	25
Figura 9. Nivelación compuesta	26
Figura 10. Ejemplo de Diagrama de dispersión. (Laguna, 2011).....	30
Figura 11. Ejemplos de asociación (Laguna, 2011).....	31

Figura 12. Distribución Gaussiana.....	32
Figura 13. Skewness o sesgo de distribución de datos (Livingston, 2004).....	33
Figura 14. Kurtosis o curtosis de distribución de datos (Livingston, 2004).....	33
Figura 15. Ubicación de la zona de estudio.....	36
Figura 16. Plataforma aérea: DJI Mavic Pro.....	38
Figura 17. a) Nivel fijo Sokkia B40 b) Leica VIVA CS10 GPS/RTK.....	38
Figura 18. Ubicación y distribución de los PCTs en el área de estudio.....	39
Figura 19. Señalización de PCTs.....	40
Figura 20. Esquema metodológico para la generación de ortofotos y MDE.....	42
Figura 21. Mapa de zonas restringidas de vuelo.....	44
Figura 22. PCT en Google Earth.....	44
Figura 23. Interfaz de la aplicación DJI GO 4.0.....	46
Figura 24. Configuración de vuelo.....	47
Figura 25. Ubicación, memoria y adaptador.....	48
Figura 26. Nube de puntos dispersos y ubicación de imágenes.....	49
Figura 27. Nube Densa de Puntos.....	49
Figura 28. Generación de superficie creando una malla.....	49
Figura 29. Modelo en 3D texturizado.....	50
Figura 30. Ortofoto generada y exportada de Agisoft PhotoScan.....	51
Figura 31. MDE generada y exportada de Agisoft PhotoScan.....	52
Figura 32. Levantamiento altimétrico en la zona de prueba dentro del área de estudio.....	53
Figura 33 Orden y dirección de levantamiento topográfico.....	53
Figura 34. Modelo creado en Dinámica EGO para proceso de diferencias.....	55
Figura 35. Vista previa de los MDEs VT_z , $DRONE_z$, Md	56
Figura 36. Ortofoto generada con el drone (Izq) y ortofoto del 2006 generada con fotogrametría convencional (Der).....	56
Figura 37. Ortofoto generada a partir de imágenes obtenidas con drones no-fotogramétricos.....	58
Figura 38. MDE generado a partir de imágenes.....	59
Figura 39. MDE de verdad terreno, levantamiento topográfico.....	61
Figura 40. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del levantamiento topográfico o verdad terreno.....	62
Figura 41. MDE generado del $DRONE_z$	62
Figura 42. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del $DRONE_z$	63
Figura 43. Mapa de diferencias MDE VT y MDE generado con Drone.....	64
Figura 44. Mapa de diferencias en perspectiva 3D.....	65
Figura 45. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del Md	65
Figura 46. Ortofoto generada con drone, C.U. Sur, Facultad de Ingeniería, Edificio 1 ($DRONE_{xy}$).....	66
Figura 47. Ortofoto 2006, C.U. Sur, Facultad de Ingeniería, Edificio 1.....	66
Figura 48. Diagramas de dispersión de los datos en Z.....	67
Figura 49. Diagramas de dispersión de los datos en X (Izq) y Y (Der).....	68
Figura 50. Histograma de frecuencias de los datos del Md	69
Figura 51. Desviación Estándar de la muestra del Md	70
Figura 52. Perfiles de banco de nivel a banco de nivel de ambos levantamientos.....	70
Figura 53. Histograma de las diferencias de datos X (Izq) y Y (Der) de los levantamientos GPS_{xy} – $DRONE_{xy}$	71

Figura 54. Desviación Estándar de las diferencias de los datos X (Izq) y Y (Der) de los levantamientos GPS _{XY} - DRONE _{XY}	71
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación por peso.	9
Tabla 2. Clasificación por resistencia y rango.....	9
Tabla 3. Clasificación por altura máxima (Arjomandi et al, 2006)	10
Tabla 4. Clasificación por peso, rango, y vuelo de Zacora y Molodchik.	10
Tabla 5. Registro de campo.	27
Tabla 6. Tolerancias de nivelaciones topográficas comunes.	27
Tabla 7. Descripción y especificaciones del dron utilizado	37
Tabla 8. Clasificación de drones de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).....	37
Tabla 9. Requerimientos para operar un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (Drone)	43
Tabla 10. Orden de variables para análisis VT _Z vs DRONE _Z	57
Tabla 11. Resultados de los errores y RMSE para X,Y,y Z.....	60
Tabla 12. Correlación de variables de datos en Z.....	67
Tabla 13. Correlación de variables de datos en X (Izq) y Y (Der).....	68

INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Aéreos no Tripulados comúnmente conocidos como drones son considerados como una de las tecnologías multidimensionales de la era contemporánea (Khan et al., 2017). Esta tecnología avanza a pasos agigantados basándose en aplicaciones fotogramétricas en muchas áreas del conocimiento e industrias tales como: La prospección y exploración de recursos minerales (López Jimeno & Martín Sánchez, 2015), agricultura (Montesinos Aranda, 2015), control de obras y evaluación de impactos (Campo Molinuevo, 2015), cartografía (Saez Paredes & Beltrán Noguera, 2015), y por supuesto a una de las profesiones más antiguas del mundo *la Topografía* (El Meouche et al., 2016., Peterman & Mesarič, 2012); entre muchas más que se darán en el futuro según Hassanalian & Abdelkefi (2017).

Los estudios que se realizan dentro de la Geomática requieren de información actualizada y en muchas ocasiones de alta resolución dependiendo del fenómeno estudiado, o para obtener el mejor resultado posible. Para estudios que se realizan a nivel regional usualmente tiene un periodo de actualización de entre 10 y 15 años (Caroti, Piemonte, & Nespoli, 2017), por ejemplo, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para estudios de ocupación y uso de suelo generó 6 series cartográficas denominadas conjunto nacional; las series son: Serie I (1985), Serie II (1993), Serie III (2002), Serie IV (2007), Serie V (2011) y Serie VI (2014) a una escala de 1:250,000; siendo analizada esta información, que hasta cierto punto es insuficiente, no cuenta con información para fechas específicas y la escala que se maneja no es la adecuada para estudios a escala regional o local (Rojas-Sánchez, 2020). Esto significa que, si es necesario obtener información entre una actualización y otra, habrá que recurrir a tecnologías alternativas, tales como el Escaneo Laser Terrestre, la Topografía convencional, y la Fotogrametría aérea entre otras. En recientes años ha crecido el uso de la Fotogrametría basada en vuelos con drones y se está generalizando más como un sistema de levantamiento topográfico alternativo, versátil y de bajo costo para áreas pequeñas, medianas (Caroti, Piemonte, & Nespoli, 2017) y de difícil acceso reduciendo así también el riesgo al personal.

Según Valavanis, (2007)., esta tecnología surge en la primera guerra mundial en 1917, pero la idea de una “maquina voladora” se originó desde hace 2,500 años. Se ha documentado que la contribución de un mecanismo autónomo ocurrió durante la era de Pitágoras. El gran descubrimiento se le atribuye a Arquitas de Tarento quien fue el inventor del “1” y el primer ingeniero; aplicando una serie de nociones geométricas, observaciones, el estudio de estructuras, enlaces y articulaciones el creó la Mecánica.

Para el año 425 B.C. Arquitas creó el primer drone de todos los tiempos construyendo una paloma mecánica que podía volar agitando sus alas y que obtenía energía a través de un mecanismo en el estomago. Presuntamente el mecanismo voló

alrededor de 200 m con agua y vapor antes de que cayera una vez agotada la energía. El mecanismo no podía volar más a menos que este se reiniciara. Se cree que fue la primer maquina voladora artificial autopropulsada (Figura1).



Figura 1. Perspectiva de un artista de la paloma mecánica
Fuente: Valavanis, (2007)

En otra parte del mundo, los chinos en el año 400 B.C. fueron los primeros en documentar la idea de una aeronave de vuelo vertical. La primera version consistía de una pequeña trozo largo de madera con plumas en un extremo, el cual hacian girar en sus manos creando suficiente energía para que este pudiera volar.

Pasado el tiempo nombres como Leonardo Da Vinci en 1508, Mikhail Lomosov en 1754, Launoy y Bienvenue en 1783, Horatio Phillips en 1840, George Cayley en 1843, Ponton d' Amecourt en 1860, Thomas Alva Edison en 1880, Paul Cornu en 1907, entre otros, salen a relucir por su aportación a esta tecnología que ya en la era moderna avanza incrementando la distancia que pueden recorrer, el peso que pueden cargar, y reducen el tiempo en el cual pueden realizar una misión ya que la mayor desventaja de sus contra partes pilotadas son la fatiga de los pilotos.

La historia de la obtención de información aérea se remonta al tiempo en que los datos eran obtenidos con globos aerostáticos, cometas (papalotes), entre otros. Fue el coronel del cuerpo de ingenieros de la armada francesa quien en 1845 sugirió que las fotografías aéreas pudieran tener un valor para la realización de mapas (Barber, 2011). El termino de *Fotogrametría* es introducido por el arquitecto Albrecht Meydenbauer en 1893 y el primer fotoplano basado en fotografías aéreas es producido por el capitán Cesare Tardivo en Libia en 1913 (Jauregui, 2008).

A mediados del siglo XX la toma de fotografías aéreas se realizaba con cámaras análogas montadas en aeronaves que sobrevolaban a una gran altura el área de interés para obtener fotografías, las cuales eran posteriormente procesadas para con ello poder realizar levantamientos topográficos.

A principios de siglo XXI con el avance de la tecnología, los drones son cada vez más accesibles y ahora con cámaras incluidas que son ultraligeras y ofrecen alta resolución para trabajos de baja altitud, además los avances presentados en software que utilizan algoritmos fotogramétricos como Structure from Motion que sin duda ha mejorado la producción fotogramétrica (El Meouche et al, 2016., Caroti, Piemonte, & Nespoli, 2017).

La ventaja del uso de los drones No-fotogramétricos es por mucho significativa comparada con los fotogramétricos cuando se refiere a costos. Los primeros cuestan entre el 2% y el 8% del costo de un dron fotogramétrico. Para tener clara la diferencia de un tipo de dron y otro, este trabajo considera No-fotogramétrico aquel que vuela de manera manual y requiere de una aplicación de terceros para realizar un vuelo automático, los drones fotogramétricos incluso realizan vuelos autónomos según afirman los propios fabricantes. Además, los No-fotogramétricos solamente tienen integrado un sistema GPS para su navegación y la precisión en promedio llega a ser de 1 m de manera que no son utilizados para medición como lo serían los drones fotogramétricos que utilizan el sistema GPS/RTK con una precisión de 5 mm y no requieren de puntos de control terrestre (PCT), a diferencia de los No-fotogramétricos que si requieren de PCTs para corregir la precisión.

Los productos finales de los vuelos con drones y el proceso fotogramétrico son la ortofoto y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE); los cuales son modelos espaciales georreferenciados que permiten la obtención de datos reales sobre estos. La combinación de drones No-fotogramétricos, software y equipo GPS/RTK nos permite obtener con el proceso de imágenes aéreas, ortofotos y MDE georreferenciados de alta resolución que cada vez están más en demanda, especialmente para el desarrollo de estudios a escala local.

El presente trabajo tiene como objetivo describir el proceso metodológico completo, desde el análisis y determinación de la zona de estudio, desarrollo del plan de vuelo, procesamiento de las imágenes hasta culminar con la generación de una ortofoto (del cual se extraerán datos X y Y para evaluación, $DRONE_{XY}$) y el MDE (del cual se extraerán datos de elevaciones para evaluación, $DRONE_z$), a partir de la aplicación de un vuelo con un dron No-fotogramétrico. Para la evaluación de los productos obtenidos, se pretende realizar levantamientos topográficos como: Nivelación diferencial (Considerada la verdad terreno para los datos en Z, VT_z) y con equipo GPS/RTK (Considerada la verdad terreno para los datos X y Y, GPS_{xy} ; y elevaciones GPS_z) para desarrollar un análisis comparativo. Con este último levantamiento se medirán también los PCTs que servirán para la georreferenciación de los modelos espaciales y se aplicara la metodología de distribución de Martínez-Carricondo et al., (2018).

Según Martínez-Carricondo et al., (2018), los modelos espaciales son un material básico para realizar y ejecutar proyectos y estudios, la Fotogrametría con drones permite obtener MDEs y ortofotos de manera práctica y económica. Sin embargo, es necesario que la precisión de dichos productos esté dentro de límites admisibles. Existen muchos factores que afectan la precisión de los productos resultantes de la fotogrametría con drones, como la cantidad y ubicación de los PCT en el área de estudio.

En su estudio Martínez-Carricondo, (2018), realizó distintas distribuciones de PCT realizadas para optimizar la precisión del proyecto, la que mejor resultados mostro fue la distribución de bordes y la distribución estratificada, esto quiere decir que es necesario ubicar PCT alrededor del polígono del área de estudio para minimizar errores planimétricos y de manera estratificada dentro del área de estudio con una densidad de alrededor de $0.5 - 1 \text{ PCT} \times \text{ha}^{-1}$ para minimizar errores altimétricos. La combinación de estas dos distribuciones minimiza el error total obtenido.

JUSTIFICACIÓN

La generación de MDE y ortofotos de alta resolución, a menudo exige datos altamente precisos (Bhandari et al, 2015). Entre la gama de métodos terrestres y aéreos disponibles como escaneos LiDAR, imágenes satelitales e imágenes obtenidas con vuelos convencionales para producir dicho conjunto de datos, requieren recursos en ocasiones escasos y tiempo de planeación y ejecución.

La comunidad científica utiliza imágenes satelitales para estudios de la superficie terrestre aplicado a cartografía, estudios del clima, océanos, vegetación entre otros. Sin embargo, estos estudios se dan de manera regional ya que las imágenes que se pueden adquirir de forma gratuita o a bajo costo es de mediana a baja resolución espacial y la resolución temporal es de días. Ejemplo de esto son las imágenes satelitales que se pueden obtener de manera gratuita de los sensores Landsat con resoluciones espaciales de 30 m y resoluciones temporales de 16 días (Rojas-Sánchez, 2020).

ALCANCES

Desarrollar paso a paso una metodología para la generación e integración de información de alta resolución generada a partir de drones No-fotogramétricos orientada a fines topográficos. Así mismo se propone evaluar los resultados con los generados a partir de métodos topográficos convencionales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Establecer una metodología para la aplicación y uso de imágenes obtenidas por Vehículos Aéreos no Tripulados No-fotogramétricos para generar modelos espaciales con resolución alta para estudios territoriales.

Objetivos Específicos

- Desarrollar vuelos controlados (automatizados).
- Generar ortofotos de alta resolución.
- Generar modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución.
- Evaluar datos obtenidos de levantamientos: DRONE vs. Topografía convencional para datos de elevación y DRONE vs GPS/RTK para los datos planimétricos.

1. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

1.1. Antecedentes

La adquisición de datos espaciales comprende el uso de diferentes técnicas o métodos, como la Percepción Remota con el uso de imágenes satelitales, la Geodesia, la Topografía y la Fotogrametría clásica, entre otras. Cada una de estas técnicas son aplicadas de acuerdo con las necesidades y requerimientos a distintos tipos de estudio dadas las desventajas de cada una. La fotogrametría digital aérea ahora realizada con drones viene a complementar dichas técnicas para eliminar limitaciones dadas por algunos equipos utilizados para la adquisición de datos espaciales.

Gracias al desarrollo de nuevas plataformas y sensores (más efectivos y seguros) y la mejora de dispositivos de adquisición de datos, así como sistemas automáticos para planificar y controlar los vuelos; las exploraciones aéreas realizadas por drones están actualmente en rápida expansión. La mayor facilidad de uso como consecuencia amplía la aplicación de dichos vehículos para detección proximal tanto para propósitos métricos como de interpretación y las capacidades de estos sistemas son ampliamente exploradas y estudiadas según diferentes requisitos (Gini et al., 2013).

Por lo anterior, la necesidad del uso de drones crece para aplicaciones civiles y existe mucho interés en desarrollar drones que puedan realizar misiones automatizadas debido a los diferentes entornos y ubicaciones. En los últimos años el espectro de aplicaciones de los drones se ha ampliado y ha recibido tanta atención que se han desarrollado sistemas de distinto peso y tamaño (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

Por ejemplo, en la gestión territorial se requiere siempre de apoyo cartográfico actualizado para sus estudios. La cartografía a escala regional usualmente tiene un ciclo de actualización de entre 10 y 15 años, para los tiempos entre ciclo y ciclo las autoridades competentes deben proporcionar actualizaciones. Diversas tecnologías se pueden explotar para obtener lo requerido, tales como: GPS Terrestre, Escaneo Laser Terrestre (TLS por sus siglas en inglés), Topografía tradicional, o en el caso de áreas grandes, la Fotogrametría aérea o Escaneo Laser. En recientes años ha crecido la Fotogrametría basada en Vehículos Aéreos no Tripulados y se está generalizando más como un sistema de levantamiento topográfico versátil y de bajo costo para áreas pequeñas y medianas (Caroti, Piemonte, & Nespoli, 2017).

1.2. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV, VANT) o drones como comúnmente se les conoce, son sistemas aéreos no tripulados que incluye

a vehículos que pueden volar miles de kilómetros y otros que pueden volar en espacios confinados (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

Estos drones son un sistema completo que incluye el equipo necesario, una red de comunicaciones y el personal para su control, aunque este último no es piloto dentro de la nave, éste la pilota de manera remota en tierra (Gupta et al., 2013); de todos los componentes que integran estos sistemas la sección que realiza el vuelo es la parte del equipo más llamativo del sistema, pero este es inservible e inoperable sin el dispositivo de soporte que le controla (Champion, 2009).

Un dron consiste en las siguientes partes (Figura 2):

La estructura de la aeronave:

- El fuselaje: la estructura mecánica que permite el vuelo (alas, fuselaje, cola, aletas, etc.) y proporciona espacio para las otras partes en el aire (cámara, sensores espectrales). Las armaduras de los drones toman muchas formas, que a veces son diferentes a las que consideramos un avión "regular". Esto es posible porque no necesitan tener en cuenta la presencia de un piloto humano.
- La aviónica: el sistema electromecánico que controla la aeronave. Esto incluye servos para desviar partes móviles (timón, aletas), sensores que proporcionan información sobre el entorno (presión, temperatura) y el comportamiento de la aeronave dentro de ese entorno (ángulo de ataque). También se requiere un piloto automático, posicionamiento GPS, sistema de medición inercial y altímetro (basado en presión). En muchos casos, se incluyen cámaras (de baja resolución) con vista hacia adelante y hacia el nadir que son utilizadas para ayudar al piloto en tierra.
- Se requiere un sistema de propulsión y potencia para mantener el vuelo. Los motores de combustible convencionales requieren tanques de combustible, los motores eléctricos requieren baterías o celdas de combustible. Las células solares también se utilizan para la generación de energía.
- Telecomunicación: se utiliza para ordenar y controlar el dron (a través de la aviónica), para enlazar los datos de telemetría (sobre el estado de los sistemas aerotransportados) y potencialmente también para los datos de los instrumentos.

El segmento en tierra

- Control de la aeronave: el piloto controla la aeronave basándose en la telemetría del dron y los requisitos de la misión. Incluso cuando el dron está en modo autónomo, se requiere que un piloto esté presente.

- Telecomunicaciones: se usa para ordenar y controlar el dron (a través de la aviónica), para recibir datos de telemetría (sobre el estado de los sistemas aerotransportados) y posiblemente también para controlar el instrumento (Champion, 2009).

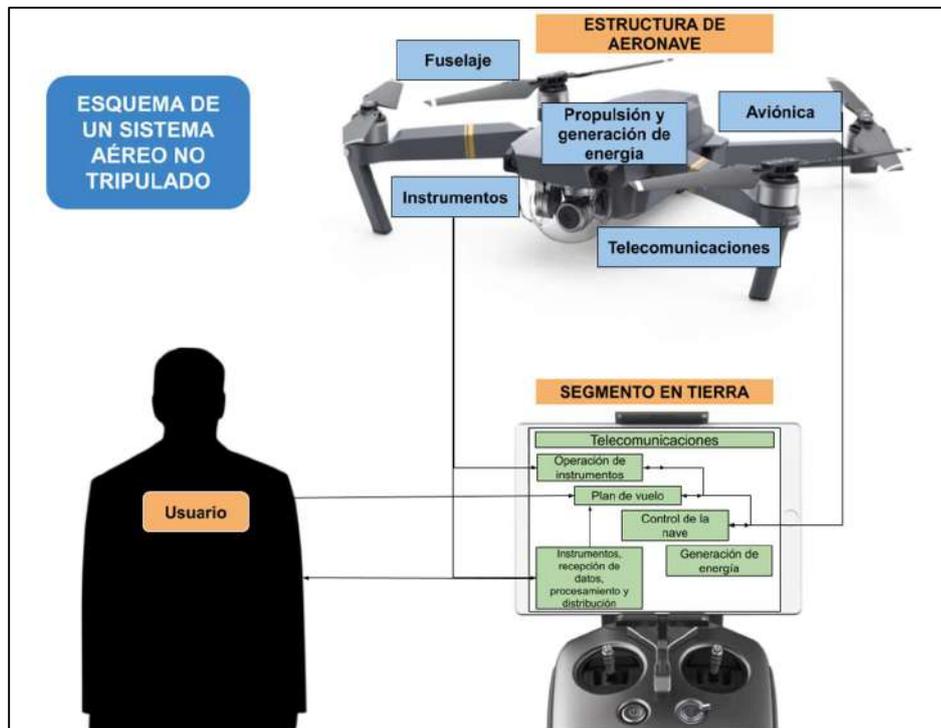


Figura 2. Esquema de un sistema aéreo no tripulado

1.2.1. Clasificación de drones

Los principales aspectos que distinguen unos drones de otros incluyen el propósito operativo del vehículo, los materiales utilizados en su fabricación, la complejidad y el costo del sistema de control. Los drones varían ampliamente en tamaño y configuración (Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

Arjomandi (2006) en su reporte "Classification of Unmanned Aerial Vehicles" clasifica a los drones por importancia de características de desempeño, tales como:

- Peso (Tabla 1): Desde drones de algunas libras hasta aquellos de hasta 11 toneladas, y aunque son pocos los que exceden más de 2 toneladas y la mayoría son de peso ligero deben considerarse por su desempeño.

Tabla 1. Clasificación por peso.

Designación	Rango de peso	Ejemplo
Super pesado	>2000 kg	Global Hawk
Pesado	200 – 2000 kg	A-160
Medium	50 – 200 kg	Raven
Ligero	5 – 50 kg	RPO Midget
Micro	<5 kg	Dragon Eye (Figura 3)

Fuente: Arjomandi et al., 2006



Figura 3. Dragon Eye Micro UAV (Arjomandi et al, 2006)

- Resistencia y rango (Tabla 2): Esta clasificación toma en cuenta estos parámetros ya que mientras más tiempo está en el aire más distancia puede recorrer. Para los diseñadores esto es importante porque pueden determinar el tipo de vehículo que se requiere para cumplir los objetivos de una misión y de que sitio será lanzado.

Tabla 2. Clasificación por resistencia y rango.

Categoría	Resistencia	Rango	Ejemplo
Alto	>24 horas	>1500 km	Predator B
Mediano	5 – 24 horas	100 – 400 km	Silver Fox
Bajo	<5 horas	<100 km	Pointer (Figura 4)

Fuente: Arjomandi et al., 2006



Figura 4. Pointer dron en combate (Arjomandi et al, 2006)

- Altitud máxima (Tabla 3): La altitud máxima de operación es otra medida de desempeño que sirve para clasificar a los drones dado que clientes buscan no ser detectados por enemigos en campo de batalla a una menor altitud o se requiere imágenes de reconocimiento o imágenes que muestren la mayor cantidad de terreno, para esto el drone tendría que volar a una mayor altura.

Tabla 3. Clasificación por altura máxima (Arjomandi et al, 2006)

Categoría	Altitud Max	Ejemplo
Baja	<1000 m	Pointer
Media	1000 – 10000 m	Finder
Alta	>10000 m	Darkstar (Figura 5)

Fuente: Arjomandi et al., 2006



Figura 5. Darkstar (Arjomandi et al, 2006)

Una propuesta de categorización de drones más generalizada es la que presenta Hassanalian & Abdelkefi (2017) de Zakora y Molodchik basado en su peso y rango de vuelo (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación por peso, rango, y vuelo de Zakora y Molodchik.

Designación	Rango de peso	Rango de vuelo
Micro y mini UAV rango cercano	$W \leq 5 \text{ kg}$	$25 \text{ km} \leq R \leq 40 \text{ km}$
Peso ligero UAV rango corto	$5 \text{ kg} < W \leq 50 \text{ kg}$	$10 \text{ km} \leq R \leq 70 \text{ km}$
Peso ligero UAV rango medio	$50 \text{ kg} < W \leq 100 \text{ kg}$	$70 \text{ km} \leq R \leq 250 \text{ km}$
UAV promedio	$100 \text{ kg} < W \leq 300 \text{ kg}$	$150 \text{ km} \leq R \leq 1000 \text{ km}$
Pesado mediano UAV	$300 \text{ kg} < W \leq 500 \text{ kg}$	$70 \text{ km} \leq R \leq 300 \text{ km}$
Pesado rango medio UAV	$500 \text{ kg} \leq W$	$70 \text{ km} \leq R \leq 300 \text{ km}$
UAV pesado larga resistencia	$1500 \text{ kg} \leq W$	$R \leq 1500 \text{ km}$
Aeronave de combate no tripulada	$500 \text{ kg} < W$	$R \leq 1500 \text{ km}$

Fuente: Hassanalian et al., 2017

Otra categorización de los drones se da con el sistema de propulsión y despegue, dentro de estos existen los:

- *HTOL o Horizontal take-off and landing (Despegue y aterrizaje horizontal)* que son aquellos con ala fija que necesitan pista para despegar o aterrizar. Este tipo de drones usualmente dependen de rotores a los costados, montados en las alas o al frente o atrás del fuselaje (Hassanalian & Abdelkefi, 2017) como lo muestra la figura 6. La ventaja de este tipo de drones es que generalmente pueden volar a más alta velocidad y tienen mayor resistencia (Gupta et al., 2013).



Figura 6. Drone fotogramétrico de ala fija eBee de senseFly.
Fuente: <https://www.sensefly.com/drone/ebec-mapping-drone/>

- *VTOL o Vertical take-off and landing (Despegue y aterrizaje vertical)* en despegue y aterrizaje similar a los helicópteros, con rotores sobre el equipo en una configuración de alas cruzadas permitiendo el despegue vertical (Hassanalian & Abdelkefi, 2017), ver figura 7. Las ventajas de estos drones es la capacidad de vuelo estacionario y su alta maniobrabilidad (Gupta et al., 2013).



Figura 7. Drone No-fotogramétrico de cuatro hélices o quadcoptero Phantom 4 Pro.
Fuente: <https://www.dji.com/es/phantom-4-pro>

Dentro de estas dos últimas categorías, los drones de despegue vertical son los más usados y los que más desarrollo han tenido debido a sus ventajas en el ámbito civil (Oñate de Mora, 2015). En este trabajo de investigación se han llamado *fotogramétricos* a los drones de ala fija, aquellos en la categoría HTOL; y *No-fotogramétricos* a los drones

en la categoría VTOL (ambos en categorías de hasta 2kg de peso) dadas las ventajas que ejercen los HTOLs en cuanto a cobertura, velocidad, y por ser más convenientes para actividades de cartografía y de percepción remota como lo expresa Oñate de Mora, (2015). Estas ventajas son:

- Más eficientes que los multirotores (VTOLs) lo que les permite, a igualdad de tamaño, una mayor autonomía.
- Pueden volar a mayor velocidad, lo que combinado con lo anterior significa que pueden cubrir una distancia o un área mucho mayor.
- Tienen una huella sonora sensiblemente menor, por lo que resultan más indicados para operaciones de vigilancia.
- Tienen un mayor rango climático en términos de temperatura, viento y lluvia.

1.2.2. Operación de los drones

Los drones para poder realizar las misiones para lo que han sido programados, deben poseer ciertas características que les servirán para trasladarse de un punto A a un punto B a una altura C. Automáticos, autónomos, semi autónomo, pilotado de manera remota o una mezcla de estas capacidades deben incluir un sistema de sensores y procesador a bordo para controlar la actitud del vehículo (Gupta et al., 2013). Esencialmente existen cuatro modos de operación según Oñate de Mora, (2015):

- Manual. En este modo, el piloto remoto actúa sobre las superficies de control y la potencia del motor o motores, a través de una emisora de radio control.
- Asistido. Es similar al modo manual, pero el piloto remoto no actúa directamente sobre las superficies de control o motores, sino que indica sus intenciones (Girar a la derecha, subir, etc.) en su puesto de radio control y actúa un autopiloto que las transforma en actuaciones sobre las superficies de control o los motores que consigan ese propósito.
- Automático. El piloto remoto establece un plan de vuelo, es decir, un cierto número de puntos de paso (waypoints) de forma previa al inicio del vuelo. La aeronave cuenta con un autopiloto que ejecuta el plan previsto, realizando de forma automática las acciones requeridas en cada momento. Sin embargo, el piloto mantiene el control en todo momento, pudiendo modificar los puntos de paso durante el vuelo, ejecutar maniobras determinadas (como por ejemplo la “vuelta a casa” en caso de alerta) o incluso control directamente, bien sea de forma manual o asistida.
- Autónomo. Generalmente es similar al modo anterior, en cuanto que se establece un plan de vuelo predeterminado, pero una vez iniciado el vuelo la aeronave ejecuta el plan de forma totalmente autónoma, sin requerir la intervención del piloto incluso en caso de producirse situaciones de emergencia. En el futuro es posible que incluso se elimine la necesidad de introducir plan de vuelo alguno, sino que la aeronave realice la misión completa, como puede ser seguir una infraestructura lineal mediante reconocimiento óptico, o dirigirse a un cierto punto evitando posibles obstáculos en el camino, etc.

Otras características de la operación de los drones son:

- **Navegación:** La navegación, la guía y el control de los drones típicamente se realiza por tres métodos o técnicas las cuales incluye el piloto automático, por video-base, y radio control, este último es el más común y opera a través de transmisores y receptores (Hassanalian & Abdelkefi, 2017). Además, para realizar el vuelo debe saber su ubicación en la tierra y para esto también el uso del GPS es indispensable.
- **Orientación y control de vuelo:** El drone dentro de su configuración debe generar sus propios comandos para conducirse, controlar el vuelo, y así continuar con la trayectoria programada.
- **Sense and avoid (sistema de sensores para evitar objetos):** Una de las grandes limitaciones de los sistemas aéreos no tripulados es el de detección y evasión (Sense and avoid en inglés). En los sistemas tripulados el mecanismo para evadir obstáculos es el de observar para evitar colisiones. Esta tecnología debe continuar la búsqueda de mejores métodos o técnicas para evitar este problema, y aunque existe el radar este requiere muchos recursos para poder emplearse, obviamente impráctico dado el tamaño y peso de este.
- **Monitoreo de fallas:** Para evitar fallas que resulten en accidentes catastróficos los vehículos aéreos no tripulados deben mantener un constante monitoreo de los sistemas de vuelo. Esto impedirá daños a la estructura del drone y cualquier tipo de riesgo a personal en tierra (Gupta et al., 2013).
- **Plan de vuelo:** Para un sistema automatizado como el que se utilizó para este trabajo de investigación se requiere de una aplicación que pueda esclavizar el drone para que siga una ruta predefinida y cubra la distancia y superficie en su totalidad cumpliendo un conjunto de órdenes que darán un resultado anunciado.

1.2.3. Los drones y sus aplicaciones

Las aplicaciones de los drones cubren un sin número de actividades, un rango amplio en área civil y militar. No solo en misiones en exterior sino en interiores también, impidiendo así el riesgo que llevare consigo el personal cumpliendo la misión. En el área militar drones equipados con cámaras y otros sensores pueden llevar a cabo misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento. Dependiendo del drone viene la actividad en la que se puede aplicar, cada tipo de drone puede utilizarse en más de doscientas aplicaciones (Hassanalian & Abdelkefi, 2017), tales como:

- **Control de calidad de aire:** El control de calidad del aire mediante el uso de drones se lleva a cabo instalándole ciertos instrumentos que dan medida a la

contaminación atmosférica que sean requeridos para la observación (Ezcurra Talegón & Díaz De Apodaca, 2015).

- **Cartografía:** La cartografía es una ciencia, arte, o técnica que analiza y representa gráficamente todo cuanto hay en la superficie de la tierra. Desde la antigüedad se han realizado mapas para conocer el entorno del ser humano y los elementos que en él se encuentran. En la edad moderna se ha disparado la demanda de datos espaciales que se requieren en menor tiempo y espacio para obtenerlos. La nueva tecnología de vehículos aéreos no tripulados son una herramienta muy eficiente que reduce costos y tiempo para la obtención de datos espaciales que son la base de los procesos realizados para elaborar cartografía (Saez Paredes & Beltrán Noguera, 2015).
- **Prospección y explotación de recursos minerales:** La explotación de los recursos mineros y de hidrocarburos empieza con la búsqueda y localización de yacimientos de productos que puedan ser comercializados, la tarea de localizar estos recursos suele ser difícil y en ocasiones de alto riesgo para el personal, toman tiempo por la cantidad de superficie que se debe cubrir, y puede provocar ciertos daños medio ambientales. Las ventajas que ofrecen los drones vienen desde la cantidad de datos en menor tiempo que estos pueden obtener más la ventaja de cubrir grandes extensiones de suelo y los bajos costos por la obtención de dichos datos, además que se cubren áreas remotas o de difícil acceso (López Jimeno & Martín Sánchez, 2015).
- **Aplicaciones hidrológicas:** Con sistemas compuestos por drones más otros sensores como el IR o multiespectral, pueden aplicarse a estudios de contaminación en salidas de aguas residuales a cauces de ríos para estudiar el impacto medio ambiental y la vigilancia a ciertas industrias para que cumplan con obligaciones de tratamiento de agua residuales (Ramos Castro & Montes Navarro, 2015).
- **Agricultura:** El aporte de los drones a la agricultura se encuentra en la facilidad de dar a los agricultores una perspectiva aérea de sus cultivos. Mediante el uso de sensores multiespectrales pueden detectar si el cultivo es sano o si está siendo dañado por alguna plaga o si éste requiere fertilizante en alguna zona específica haciendo más eficiente los recursos del agricultor (Montesinos Aranda, 2015).
- **Seguimiento fitosanitario de masas forestales:** En los estudios forestales la información utilizada proviene de plataformas satelitales que abarcan grandes extensiones de tierra y se utiliza en proyectos regionales, una herramienta tecnológica para mejorar la resolución espacial a escala local son los drones. Equipados con sensores multiespectrales, los drones son una alternativa para

recolección de datos cuando se requiere información de un área local específica de la zona de estudio regional (Checa Alonso et al, 2015).

- Control de obras y evaluación de impactos: Por las características propias de los drones, estos permiten obtener cantidades grandes de datos de una obra y se puede utilizar tanto para topografía convencional como para fotogrametría. Los drones pueden ser utilizados como apoyo para mostrar avances de obra, que sería el control visual geométrico de la obra a través de imágenes son carácter métrico u ortofotos (Campo Molinuevo, 2015).
- Gestión del patrimonio y herencia cultural: Aunque el mantenimiento del patrimonio cultural de un pueblo no es del todo remunerante de manera económica, ésta da fe de sus orígenes e identidad. La pérdida de algún elemento único que no puede ser reemplazado puede llegar a ser grave (Domínguez, 2015). Los drones a través de estudios fotogramétricos pueden lograr registros temporales que ayuden al mantenimiento tal patrimonio.
- Seguridad al control de fronteras: Debido a la presión en las fronteras que ejercen la inmigración irregular, las bandas organizadas y el narcotráfico países como España han optado por crear programas de vigilancia que reduzcan estas actividades en su territorio marítimo y fronteras. Dentro de estos programas han considerado la ampliación y fortalecimiento de la tecnología utilizada dentro de la cual los sistemas remotamente pilotados o drones tienen protagonismo (Borjas Astorga & López Ramos, 2015).
- Mantenimiento de líneas eléctricas: Para el mantenimiento de líneas y de subestaciones eléctricas se requieren vehículos aéreos como helicópteros dada la ubicación de las instalaciones. La ubicación de dichas instalaciones se da alejada de las personas por seguridad y muchas veces se encuentran en áreas de difícil acceso. La integración de los vehículos aéreos no tripulados se da como alternativa para las inspecciones de la red e instalaciones eléctricas y la generación de cartografía de líneas y subestaciones (Reinoso Delgado, 2015).
- Auditorías energéticas con termografía aérea: El análisis de termografía infrarroja sirve para realizar inspecciones de edificaciones que pudieran presentar deficiencias en el aislamiento térmico, humedades y otras patologías propias de las edificaciones. Puede ayudar a localizar puntos calientes, fallas de algunos elementos, evita que la producción constructiva se detenga y en el peor de los casos que se dé un incendio. Debido a que las inspecciones se realizan por áreas accesibles al personal "a pie", algunos puntos quedan sin ser inspeccionados ya que pudieran encontrarse en zonas de riesgo como en la parte exterior de edificaciones de varios niveles; además los equipos portátiles utilizados tienen

cierto límite en el alcance de la inspección. Los vehículos aéreos no tripulados le darán continuidad a la inspección incluso dando información adicional útil, la que proporciona la altura y el ángulo con la que se toman las imágenes de las edificaciones (Melgosa Revillas, 2015).

- Periodismo: La aportación de los vehículos aéreos no tripulados es muy amplia en este ámbito. Los eventos que se podrían cubrir dentro del periodismo con los drones por mencionar algunos son (Saura Sánchez & González Carril, 2015):
 - Manifestaciones: Pudiendo constatar la cantidad de personas asistentes más el seguimiento y evolución de este, elementos como las autoridades además de personas ajenas al evento.
 - Eventos deportivos
 - Zonas de conflicto y peligro: El uso de los drones evita, principalmente, el riesgo directo hacia el individuo, en zonas donde el acceso es restringido, y no por las autoridades sino por los personajes envueltos en el conflicto.
 - Catástrofes naturales: erupción de un volcán, deslizamientos.
 - Eventos culturales y científicos.
 - Accidentes de gran magnitud y comprometido acceso.
- Búsqueda y rescate: Sabiendo que el tiempo de respuesta es esencial para la supervivencia de una víctima, los drones están cambiando la manera en que se hace la búsqueda y rescate reduciendo aún más este tiempo. Los drones son capaces de operar en zonas que han sido abatidas por un fenómeno natural y eliminan el riesgo directo al personal en tierra, los drones pueden despegar en tierra desde una roca, desde el aire siendo lanzado por el piloto, de un bote en el mar. Puede llevar a cabo la ubicación de alguna persona extraviada en un bosque, de una persona desorientada debido a enfermedad, medicada o con capacidades reducidas, y hasta llevar un salvavidas y medicamento a algún individuo en la costa (Díaz Marcos, 2015).
- Aplicaciones urbanísticas: Los beneficios de los drones en esta área se produce en la gestión y diseño urbano, asistiendo en gran manera a la actualización cartográfica ya que por métodos tradicionales los costos incrementarían (Mesas Carrascosa & García-Ferrer Porras, 2015).
- Aplicaciones en la Topografía: Un producto importante y esencial en la topografía es el MDE que sirven para obtener volumen en obras de movimiento de tierra, la obtención de los niveles en una obra de edificación entre otras. Métodos tradicionales para crear dicho producto consume mucho tiempo y puede ser costosos. Profesionales experimentados en el área de la topografía pueden llegar a medir hasta tres puntos por minuto mientras que la fotogrametría hecha a baja

altura con drones puede proveer millones de puntos en menos de una hora. Además, estas mediciones hechas de manera remota reducen el riesgo en áreas que son de difícil acceso (Peterman & Mesarič, 2012) (Uysal et al, 2015).

1.3. Geomática

La Geomática es la ciencia, la ingeniería y/o el arte que abarca la recopilación y gestión de información georreferenciada. La información geográfica juega un papel importante en actividades como el monitoreo ambiental, la gestión de los recursos terrestres y marinos y operaciones inmobiliarias (Pinto R., 2013). Es un neologismo que se extiende cada vez más. Incluye varias disciplinas y técnicas para el estudio de la superficie terrestre y sus entornos y la informática desempeña un papel decisivo.

Desde la geografía clásica, las actividades científicas en observación de la tierra han experimentado una rápida expansión y cada vez más sectores económicos tienden a emplear datos territoriales adquiridos por levantamientos topográficos, sistemas de posicionamiento global por satélite, fotogrametría tradicional y digital y sensores remotos multiespectrales e hiperespectrales desde aviones y satélite, con imágenes tanto pasivas ópticas como activas en microondas (radar) a diferentes resoluciones geométricas, espectrales, radiométricas y temporales, aunque todavía hay un conocimiento limitado de cómo utilizar correctamente todo el potencial disponible. Los datos y la información resultantes están representados en capas digitales y numéricas gestionadas en sistemas de información y sistemas de apoyo a la decisión, a menudo basados en el desarrollo de sistemas expertos (Gomasasca M. A., 2010).

La Geomática se define como:

...un enfoque sistémico, multidisciplinario e integrado para seleccionar los instrumentos y las técnicas apropiadas para recopilar, almacenar, integrar, modelar, analizar, recuperar, transformar, visualizar y distribuir datos espacialmente georreferenciados de diferentes fuentes con características de precisión definidas, continuidad y en formato digital (Gomasasca M. A., 2009).

De acuerdo con Gomasasca (2009) las disciplinas que constituyen a la geomática son, entre otras:

- *Ciencias Computacionales:* Para representar y procesar información aplicable a través del desarrollo de instrumentos tecnológicos (hardware) y de métodos, modelos y sistemas (software).
- *Geodesia:* Para determinar el tamaño y forma de la Tierra; define por un lado la superficie de referencia en su forma completa, el geoide, así como en su forma

simplificada, el elipsoide, y por otro lado la fuerza gravitacional externa como una función del tiempo.

- **Topografía:** Comenzó en parte y como elemento de geodesia, esta es la combinación de procedimientos directos para la medición de tierra. La topografía es una combinación de métodos e instrumentos para medir y representar de manera comprensiva los detalles de la superficie de la Tierra.
 - **Planimetría:** Sirve para determinar la posición relativa de la representación de puntos sobre la superficie terrestre con respecto a la misma superficie de referencia;
 - **Altimetría:** Sirve para determinar la altura de los puntos sobre la superficie terrestre con respecto a la superficie del geoide;
 - **Taquimetría:** Para la medición planimétrica y altimétrica de las zonas de la superficie de la tierra.
 - **Agrimensura:** Para medir áreas, mover y rectificar fronteras, y nivelar zonas de la superficie física de la tierra.

- **Cartografía:** Sirve para facilitar una posible descripción de la forma y dimensión de la Tierra y sus detalles naturales y artificiales, a través de representaciones gráficas y numéricas de áreas más o menos amplias, siguiendo normas establecidas.

- **Fotogrametría:** Determina la posición y figuras de objetos midiéndoles a través de imágenes fotográficas.

- **Precepción Remota:** Adquiere de manera remota datos territoriales y de medio ambiente para combinar métodos y técnicas en procesos e interpretaciones subsecuentes.

- **Sistemas de Posicionamiento Global (GPS):** Proporciona la posición tridimensional (3D) de objetos fijos o en movimiento, en espacio y tiempo, sobre toda la superficie de la Tierra, bajo cualquier condición meteorológica y en tiempo real.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Ayuda para hacer uso de la combinación de instrumentos capaces de recibir, grabar, recordar, transformar, representar y procesar, datos espaciales georreferenciados.

- **Sistema de apoyo a la decisión (DSS):** para implementar sistemas complejos de información geográfica, destinados a crear posibles escenarios mediante el modelado de la verdad básica y ofrecer un conjunto de soluciones al tomador de decisiones.

- *Sistema experto (ES)*: para considerar instrumentos capaces de imitar los procesos cognitivos de los expertos y su capacidad para gestionar la complejidad de la realidad mediante procesos interdependientes de abstracción, generalización y aproximación.
- *WebGIS*: para distribuir datos geográficos almacenados de forma remota en máquinas dedicadas para bases de datos, de acuerdo con complejas arquitecturas de red.
- *Ontología*: para especificar una conceptualidad, es decir, la descripción de conceptos y relaciones existentes para un elemento o entre varios elementos de un grupo, entidad o clase; La conceptualización es una visión abstracta simplificada del mundo que debe representarse para una aplicación determinada.

1.3.1. Fotogrametría

La Fotogrametría es una herramienta estándar que se usa a menudo para aplicaciones de mapeo a gran escala y ha visto un aumento en el uso de los drones para la cartografía a menor escala. La fotografía aérea tiene una larga historia y una amplia gama de aplicaciones y estas pueden utilizarse para minimizar el trabajo en tierra (Murtiyoso et al, 2017).

La Fotogrametría se define como el proceso de derivar información métrica de un objeto a través de mediciones del objeto hechas en fotografías, dejando la fotointerpretación (por análisis visual humano) la tarea de obtener información cualitativa.

Con la introducción de tecnologías para la adquisición de datos de imagen del espacio en una región amplia del espectro electromagnético, el significado de la Fotogrametría y la Fotointerpretación ha sido extendida hasta abarcar la Percepción Remota, moviéndose de la clásica fotointerpretación y aplicando técnicas de análisis de cómputo a imágenes de fotografías.

La Fotogrametría tradicional y digital están basadas en los mismos principios fundamentales. La tendencia a usar la fotogrametría con datos satelitales de alta resolución nos invita a considerar el enfoque tradicional de la perspectiva central, mientras se mueven los formalismos hacia geometrías proyectivas más complejas que están más conectadas con la metodología de adquisición de imágenes satelitales y las nuevas cámaras digitales aerofotogramétricas. La rigurosa reconstrucción de la correspondencia geométrica entre imagen y objeto al momento de la adquisición sigue siendo el alcance principal de la Fotogrametría (Gomarasca M. A., 2009).

1.3.1.1. Fotogrametría digital

La Fotogrametría digital parte de la toma de imágenes aéreas, ya sean de satélites o de otras plataformas y hace un escaneo o barrido con un escáner fotogramétrico llegando a un proceso de digitalización en formato ráster. La Fotogrametría digital permite fácil acceso a la información radiométrica de las imágenes y a que sean visualizadas en pantalla (Pinto R., 2013). Un ejemplo de la Fotogrametría digital es el proceso que se le da a las imágenes tomadas por drones y se someten a procesos para obtener datos de objetos como en las actividades realizadas en mantenimiento y registro histórico de monumentos, la generación de MDEs para proyectos de construcción, el modelado de zonas arqueológicas, entre otros.

1.3.1.2. Etapas de la fotogrametría en un proyecto convencional

1. Planeación del vuelo: Se realiza con base a cartografía existente y consiste en determinar el recorrido, altura de vuelo y número de fotografías que se realizarán.
2. Toma de fotografías: Es el momento exacto cuando el avión sobrevuela la zona previamente determinada y efectúa la toma de la fotografía, depende de condiciones climáticas.
3. Condiciones técnicas de toma: Para la salida final escala 1:10,000 se producen fotografías con una escala 1:20,000 y para la salida final escala 1:2,000 se producen fotografías a escala aproximada 1:10,000. Para escalas más grandes se realizan vuelos más bajos.
4. Revelado y escaneo de las imágenes: Se realiza el revelado del rollo y posteriormente se adquiere la imagen a través de un escáner de alta resolución. Para fotografías escala 1:20,000 se realiza un escaneo a 21.16 micrones y para fotografías escala 1:10,000 se realiza un escaneo a 15 micrones o en su defecto se adquiere la imagen digital.
5. Fotocontrol:
 - a) Distribución previa de puntos de control sobre copias de contacto.
 - b) Desplazamiento a campo y captura de información georreferenciada con equipos de GPS o Sistema de posicionamiento global de alta tecnología y precisión.
 - c) Post proceso de la información.
 - d) Obtención de coordenadas geográficas y cartesianas de los puntos que servirán de base para el proceso de la aerotriangulación (X, Y, Z).

- e) Materialización de puntos de fotocontrol.
6. Aerotriangulación: Densificación de puntos de control a través de procesos matemáticos y fotogramétricos. Precisiones según estándares de Institutos Geográficos, para salidas gráficas escalas 1:10,000 y 1:20,000. Determinación de puntos de paso, entre fajas y Fotocontrol. Ajustes con software especial para detectar y eliminar estadísticamente errores gruesos. Consecución de parámetros de cada imagen (X, Y, Z, Omega, Phi, Kappa). Generación de estéreo modelo.
7. Restitución:
- a) Modelo de datos a trabajar.
 - b) Reglas topológicas.
 - c) Estaciones 3D.
 - d) Generación de modelos digitales.
 - e) Generación de curvas a través de interpolación con modelo digital de terreno.
8. Edición:
- a) Mejoras de los elementos línea, punto y polígono.
 - b) Creación de la lista de niveles.
 - c) Cambio de color, estilo de línea y fuentes.
 - d) Realización de impresión en gran formato (Ploteo).
9. Etapa del desarrollo del proyecto, la ortofoto como producto final:

Ortofotografía: Composición de varias fotografías perfectamente referenciadas donde cualquier punto sobre el terreno tiene una proyección ortogonal, lo cual permite realizar medidas reales sobre la fotografía (Pinto R., 2013).

1.3.1.3. Productos fotogramétricos

La Fotogrametría genera varios productos finales, gráficos, fotográficos y digitales con múltiples aplicaciones. Algunos de estos productos son: el mapa de líneas, fotomosaicos, ortofotos, ortofoto estereoscópica, ortofotomapas, Modelos Digitales de Terreno (MDT), entre otros (Jauregui, 2008).

Pérez Álvarez, (2001), describe los MDTs como un tipo de modelos simbólicos en los que se intenta representar mediante un conjunto de datos numéricos la distribución espacial de una característica del territorio. El MDT constituye una representación numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Esta variable por lo general representa las características topográficas de éste y expresadas mediante coordenadas X, Y y Z de los puntos que las definen. Codificadas en forma y función y almacenadas en un soporte estable tal que, en procesos posteriores, permita, hasta en su caso más general, conocer su configuración, cuantificando y cualificando cada elemento, puntual, lineal, superficial y volumétrico, en cualquier orden o estructura geométrica, y que además aporte la adecuada metodología para actuar sobre él.

Esta definición general comprende tanto los detalles planimétricos (naturales y artificiales del terreno), como sus alturas o elevaciones. Ahora bien, la diferente problemática, tanto en la captura como en la explotación de estos elementos (planimétricos y altimétricos) ha dado lugar a denominaciones más específicas y de entre las más difundidas son: el DEM y el Digital Height Model (DHM, Modelo Digital de Alturas). Estos son generalmente modelos altimétricos digitales, referenciados a mallas regulares y en cuyos vértices se asigna el valor de la coordenada altimétrica Z.

Los modelos antes descritos se generan a través de procedimientos fotogramétricos como el descrito en este trabajo. Un MDE es un MDT, y se utiliza el termino MDE ya que la variable representada de manera general es la elevación o altura. Además, se genera el DEM ya que el programa fotogramétrico utilizado describe la exportación de DEM.

1.3.2. Topografía

García Márquez (1981) define Topografía de la siguiente manera: del griego *topos*, “lugar” y *graphien*, “describir”, como la ciencia que trata de los principios y métodos empleados para determinar las posiciones relativas de los puntos de la superficie terrestre, por medio de medidas, y usando los tres elementos del espacio. Estos elementos pueden ser: dos distancias y una elevación, o una distancia, una dirección y una elevación.

Para distancias y elevaciones se emplean unidades de longitud (en sistema métrico decimal), y para direcciones se emplean unidades de arco (grados sexagesimales). El conjunto de operaciones necesarias para determinar las posiciones de puntos y posteriormente su representación en un plano es lo que se llama comúnmente “Levantamiento”.

La mayor parte de los levantamientos, tienen por objeto el cálculo de superficies y volúmenes y la representación de las medidas tomadas en el campo mediante perfiles y planos, por lo cual estos trabajos también se consideran dentro de la topografía.

Hay dos clases de levantamientos, estos pueden ser Topográficos o Geodésicos. Los topográficos son aquellos que por abarcar superficies reducidas pueden hacerse depreciando la curvatura de la tierra, sin error apreciable y son los más comunes. Los geodésicos sin embargo toman en cuenta dicha curvatura por que son levantamientos en grandes extensiones de tierra y son motivo de estudio especial al cual se dedica la Geodésia.

Dentro de los tipos de levantamientos topográficos se encuentran, entre otros, los siguientes abajo mencionados:

- Levantamiento de terreno en general: Tienen por objeto marcar linderos o localizarlos, medir y dividir superficies, ubicar terrenos en planos generales ligando, con levantamientos anteriores ó proyectar obras y contrucciones.
- Topografía de vías de comunicación: En terminos generales se entiende por vía de comunicación el medio que sirve para el transporte de personas, mercancías, agua, fluidos, corriente eléctrica, etc. de un lugar a otro. Desde el punto de vista topográfico las vías de comunicación terrestre se estudian en forma semejante y su principal diferencia es la pendiente que se les puede dar para salvar los accidentes topográficos.
- Levantamientos topográficos para obras de ingeniería sanitaria: En la elaboración del proyecto para un sistema de abastecimiento de agua potable o para una red de alcantarillado, los levantamientos topográficos constituyen uno de los trabajos básicos y por tanto, debe consedérseles la atención debida para asegurar su correcta ejecución. Por consiguiente en los estudios para el suministro de agua potable y saneamiento de una localidad, los trabajos topográficos deben realizarse con la exactitud requerida de acuerdo con su categoría.

1.3.2.1. Levantamiento planimétrico

García Márquez (1981) describe la planimetría como:

“El conjunto de los trabajos efectuados para tomar en el campo los datos geométricos necesarios que permitan construir una figura semejante a la del terreno, proyectada sobre un plano horizontal”.

Para el levantamiento planimétrico existen varios métodos los cuales también utilizan diferente equipo (Royo-Pérez, 2014).

1.3.2.2. Levantamiento altimétrico

La Nivelación es un término genérico que se aplica a cualquiera de los diversos procedimientos a través de los cuales se determinan elevaciones o diferencias entre las mismas. Es una operación fundamental para tener los datos necesarios para la elaboración de mapas o planos de configuración y en proyectos de ingeniería y de construcción (Wolf & Brinker, 1997).

Para determinar las diferencias de elevación existen varios métodos tradicionales directos empleando cintas, por nivelación diferencial, por nivelación barométrica, y también indirectos, por nivelación trigonométrica.

Según el US Army Corps of Engineers (2007), la nivelación barométrica usa las diferencias en presión atmosférica con un barómetro o altímetro que determina las diferencias en elevación entre dos puntos. Este método es el menos preciso para determinar elevaciones, por esto, debido a las menores precisiones alcanzables, este método solo debe usarse cuando otros métodos no son factibles o implicarían un gran gasto.

La nivelación trigonométrica es un método que aplica los fundamentos de la trigonometría para determinar las diferencias de elevación entre dos puntos al observar una distancia horizontal y los ángulos verticales por encima o por debajo del plano horizontal. La nivelación trigonométrica se usa generalmente para un posicionamiento vertical de precisión de orden inferior, sin embargo, es lo suficientemente precisa para la topografía radial como cuando una Estación Total corta las elevaciones de las características del terreno. La nivelación trigonométrica es especialmente efectiva para establecer el control de líneas de perfil y en áreas donde el paisaje es muy inclinado. Con las operaciones de nivelación trigonométrica, es necesario medir la altura del instrumento (HI) y el estadal por encima de los monumentos o puntos establecidos con mojoneras, la distancia de la pendiente (s), el ángulo vertical (α) y la intersección del estadal. A partir de estos datos, la diferencia vertical en elevación (DE) se puede calcular utilizando el seno del ángulo vertical y aplicando la diferencia del estadal.

La nivelación diferencial, es medida con respecto a una línea de visión horizontal establecida por un instrumento de nivelación. Una vez que el instrumento es nivelado, la línea de visión se encuentra en un plano horizontal. La nivelación diferencial determina la diferencia de altura entre una elevación conocida y el instrumento y la diferencia de altura entre el instrumento y un punto desconocido midiendo la distancia vertical con un estadal.

García Márquez (1981) por otro lado, llama a la nivelación diferencial a la nivelación que tiene por objeto determinar la diferencia de elevación entre dos o más puntos del terreno sin tomar en cuenta las distancias y tanto puede ser nivelación simple o compuesta y las describe de la siguiente manera:

- *Nivelación Simple*. La nivelación diferencial es simple cuando el desnivel entre dos puntos puede obtenerse haciendo solamente una estación con el instrumento. Este caso se presenta cuando los puntos cuyo desnivel se

desea conocer no están separados por una distancia mayor a 200 metros y el desnivel entre los mismos no es mayor que la longitud del estadal.

Un ejemplo de nivelación simple se muestra en la figura 8, donde para determinar el desnivel entre los puntos *A* y *B*, se estaciona el instrumento a igual distancia de ambos puntos, para eliminar los errores por curvatura de la Tierra y refracción atmosférica, y se toman las lecturas de estadal en *A* y *B*.

El desnivel se obtiene por la diferencia de las lecturas de estadal hechas en *A* y *B*.

L_A = lectura de estadal en el punto *A*

L_B = lectura de estadal en el punto *B*

h = desnivel entre *A* y *B*

\propto = altura de instrumento

El desnivel entre *A* y *B*, en este ejemplo, es:

$$h = L_A - L_B = 2.108 - 1.583 = +0.525 \text{ m}$$

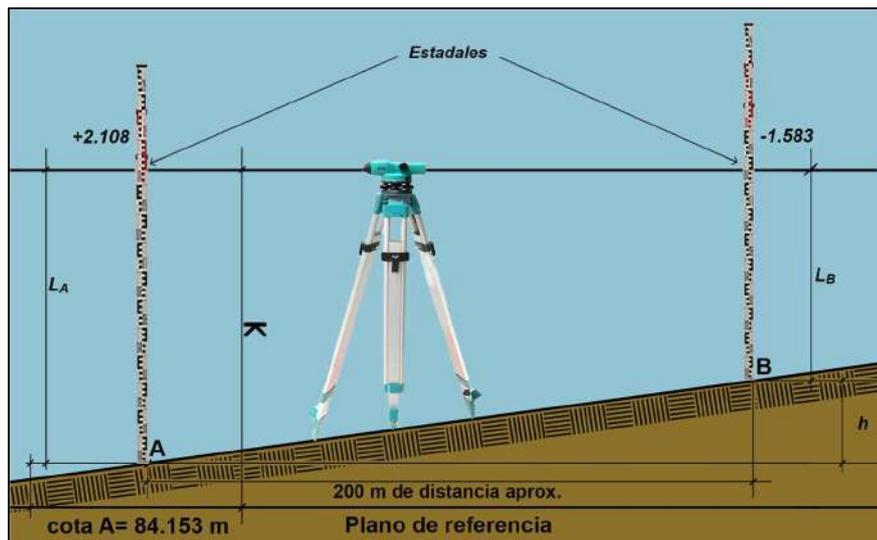


Figura 8. Ejemplo de nivelación diferencial simple

- **Nivelación Compuesta.** Cuando no puedan las condiciones señaladas para la nivelación simple porque los puntos extremos de la línea cuyo desnivel se desea conocer estén muy lejanos uno de otro, o hay obstáculos intermedios, entonces el desnivel se obtiene por medio de una nivelación compuesta, que consiste en repetir la operación indicada para la nivelación simple, tantas veces como sea necesario, estableciendo puntos intermedios denominados Puntos de Liga (PL) donde se hacen dos lecturas en el estadal, una adelante y otra atrás.

Los PL deben ser puntos definidos y se establecerán empleando objetos naturales o artificiales como rocas, troncos de árboles, estacas con clavos o grapas y marcas de pintura o labradas con cincel.

La nivelación diferencial compuesta requiere una serie de cambios de instrumento a lo largo de la ruta general y, para cada cambio, una lectura atrás en el estadal colocado sobre un punto de elevación conocida y otra lectura adelante al punto de elevación desconocida.

El trabajo y el registro se llevan a cabo como se indica en el ejemplo siguiente (Figura 9 y Tabla 5):

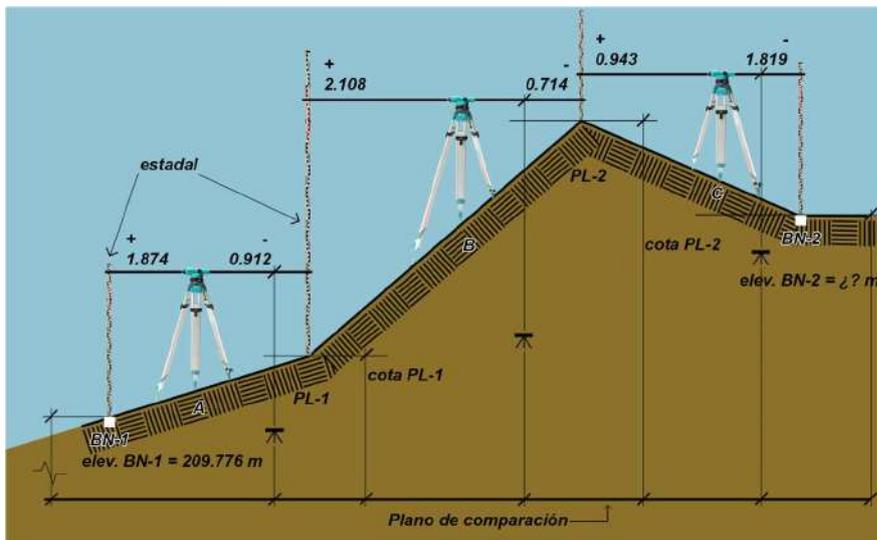


Figura 9. Nivelación compuesta

BN-1 representa un banco de nivel con elevación conocida y BN-2 un banco a establecer y se desea determinar su elevación.

Un estadal se coloca sobre BN-1; el instrumento se estaciona en un lugar conveniente, como A, a lo largo de la ruta general, pero no necesariamente en línea directa que une BN-1 a BN-2. El nivelador hace la lectura atrás en el estadal colocado en el BN-1, anotandola en el registro de campo.

Luego, el estadalero se dirige hacia adelante y, según las indicaciones del nivelador, marca un punto de liga (PL-1), sobre el cual coloca el estadal para que el nivelador haga ahora la lectura adelante y la anote también en el registro.

En seguida, el nivelador instala el instrumento en otro punto, como B, y toma una lectura hacia atrás en el estadal colocado sobre el PL-1, después el estadalero va a establecer un segundo punto de liga PL-2, y el nivelador hace la lectura hacia adelante en el estadal colocado sobre PL-2; y así se va repitiendo el procedimiento, hasta llegar a BN-2.

En la Figura 8 se observa que si se suman la lectura atrás y la elevación del punto en que se tomó, se obtiene la altura del instrumento; y que si se resta a la altura del instrumento la lectura adelante, se determina la elevación del punto sobre el cual se tomó la lectura.

Además, la diferencia entre la lectura atrás, tomada en un punto de elevación conocida, y la lectura adelante, tomada en el punto siguiente, es igual al desnivel entre los dos puntos. De eso se infiere que la diferencia entre la suma de todas las lecturas atrás y la suma de todas las lecturas adelante, da el desnivel entre los bancos de nivel BN-1 y BN-2.

Tabla 5. Registro de campo.

Nivelación diferencial					Lugar: México, D.F. Fecha: 24-Abr-72 Niveló: Alejandro García L.
EST.	+	\nearrow	-	Cotas	Notas
BN-1	1.874			209.776	Monumento de concreto, a 25.50 m A la izq. de EST. 7+280 del Camino Sola de Vega-Juquila.
PL-1	2.108		0.912		
PL-2	0.943		0.714		
BN-2			1.819		
	4.925		3.445		

Fuente: García Márquez, 1981.

Para comprobar que el trabajo de campo está dentro de tolerancia, el levantamiento realizado debe cumplir con cualquiera de los requerimientos que indica la tabla 6.

Tabla 6. Tolerancias de nivelaciones topográficas comunes.

Nivelaciones	Tolerancias, en metros
DE IDA Y REGRESO	$T = \pm 0.01 \sqrt{P}$ P = Suma de las distancias recorridas en una y otra dirección, en km
POR DOBLE PUNTO DE LIGA	$T = \pm 0.015 \sqrt{P}$ P = Doble de la distancia recorrida, en km
POR DOBLE ALTURA DE APARATO	$T = \pm 0.02 \sqrt{P}$ P = Doble de la distancia recorrida, en km
ENTRE DOS PUNTOS DE COTAS CONOCIDAS, para nivelar bancos intermedios	$T = \pm 0.02 \sqrt{P}$ P = Distancia recorrida de un banco al otro, en km

Fuente: García Márquez, 1981.

Para el levantamiento altimétrico que se realizará en este trabajo se ha seleccionado la nivelación diferencial para obtener los datos necesarios para el análisis

estadístico con el cual se compararán el levantamiento topográfico convencional de nivelación y el realizado con el dron.

1.3.3. Análisis y Modelado Espacial

Como parte de las funciones integradoras en la Geomática, se encuentra el Análisis Espacial, que es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a los datos distribuidos sobre el espacio geográfico; se encarga de procesar, clasificar y presentar criterios cartográficos de un estudio cuantitativo y cualitativo de fenómenos que se manifiestan en el espacio. Estas herramientas en su mayoría se integran en un Sistema de Información Geográfica (SIG), lo que permite describir, inferir o predecir cuantitativamente estos fenómenos (Royo-Pérez, 2014).

A través del intercambio del análisis espacial con las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG's), se visualizan los procesos ocurridos en el espacio a través del tiempo; y la visualización espacial de variables que pueden ser de distinta índole como poblaciones individuales, la calidad de vida o los índices de ventas de las compañías en una región; siempre que estas puedan tener una expresión espacial mediante el uso de mapas (Mazo, 2010).

Según Mazo (2010), el análisis espacial es una serie de conjuntos de métodos genéricos de análisis exploratorio y la visualización de datos a través de mapas. Entre los procedimientos iniciales del análisis espacial incluyen tres grandes grupos:

- Variación continua: considera procesos estocásticos cuyos valores pueden ser conocidos en todos los puntos del área de estudio.
- Variación discreta: Se refieren a la distribución de eventos cuya localización se asocia a las zonas delimitadas por polígonos. Objetivo: modelar el patrón de distribución espacial de los fenómenos geográficos.
- Procesos puntuales: Conjunto de puntos distribuidos en un terreno, cuya ubicación fue generada por un mecanismo estocástico. Objetivo: comprensión del mecanismo generador de dicha localización.

Una de las herramientas de la Geomática que conjuga a su vez el Análisis Espacial es el Modelado Espacial, el cual consiste en un conjunto de técnicas diseñadas para auxiliar la visualización espacial de datos. Se entiende por modelo a la representación abstracta de la realidad y es utilizada para comprender las características más complejas (Vázquez-Jiménez, 2011). Los modelos espaciales pretenden generar estructuras esquemáticas de la realidad de manera inexacta, selectiva y subjetiva de la realidad, pero enfatizan el fenómeno estudiado de forma precisa.

El Modelado Espacial necesita de información que permita identificar los aspectos básicos para su representación, como el análisis de imágenes, encuestas o censos o unidades morfológicas o administrativas. Cuando los objetivos se han identificado se procede a medir los cambios que puedan dar sentido al modelo y que también se adecúen en la escala espacial. En casos donde el modelo es complejo se implementan varios modelos (Vázquez-Jiménez, 2011):

- Modelos cartográficos (realizados a través de un SIG) que represente la distribución y relación espacial.
- Un modelo estadístico que represente las relaciones entre las variables del objetivo.
- Modelos matemáticos que afronte la evolución global del estado de un cierto número de variables.
- Modelo multi-agente que explique los efectos de la integración de varios agentes.

Cuando se concluye esta etapa, el fenómeno modelado puede brindar de manera explícita la información de la organización espacial, la localización de elementos de interés, la creación de nuevos elementos o fenómenos derivados de este y sobre todo previsualizar el futuro en lugares determinados (Vázquez-Jiménez, 2011).

Goodchild et al., (1992) identifica los siguientes argumentos del Análisis Espacial en estudios bajo un enfoque territorial:

1. El espacio ofrece un esquema de indexación simple pero muy útil a través de la representación de la posición de elementos espaciales en mapas y sistemas de referencias y coordenadas.
2. Un enfoque espacial permite identificar el efecto de eventos u objetos a otros elementos espaciales con base a las posiciones relativas y su proximidad, siendo a menudo la distancia entre fenómenos u objetos espaciales, un factor importante de interacción.
3. El análisis espacial permite que eventos y/o elementos de distintos tipos se vinculen entre sí o con otros de distintos tipos, a través de su integración en Sistemas de Información Geográfica.

Como parte de los marcos teóricos de la Geomática, existen herramientas orientadas al análisis y modelado espacial. El uso del álgebra de mapas y su relación directa con la Percepción Remota, suponen la superación inicial de una serie de procesos de manipulación y consulta básica de datos que las plataformas de los Sistemas de Información Geográfica permiten, para ahora modelar la información presentada en formato ráster (imágenes), que permiten y facilitan el desarrollo de tareas dinámicas complejas de análisis y simulación de fenómenos espacio-temporales que cada vez son más requeridos (Sarría, 2006., Soares-Filho et al., 2009).

1.4. Análisis Estadístico

1.4.1. Coeficiente de correlación lineal de Pearson

La correlación de Pearson mide la existencia (dada por un valor de p) y la fuerza (dada por la Coeficiente r entre -1 y $+1$) de una relación lineal entre dos variables. Solo debe usarse cuando se cumplen sus supuestos subyacentes. Si el resultado es significativo, concluimos que *existe una correlación* (Samuels et al., 2014).

Según Laguna, (2011), el propósito de la correlación es examinar la dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas. Para conocer la intensidad de la relación entre ellas y si, al aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor y de la otra variable. Para valorar la asociación entre dos variables, la primera aproximación suele hacerse mediante un diagrama de dispersión (Figura 10).

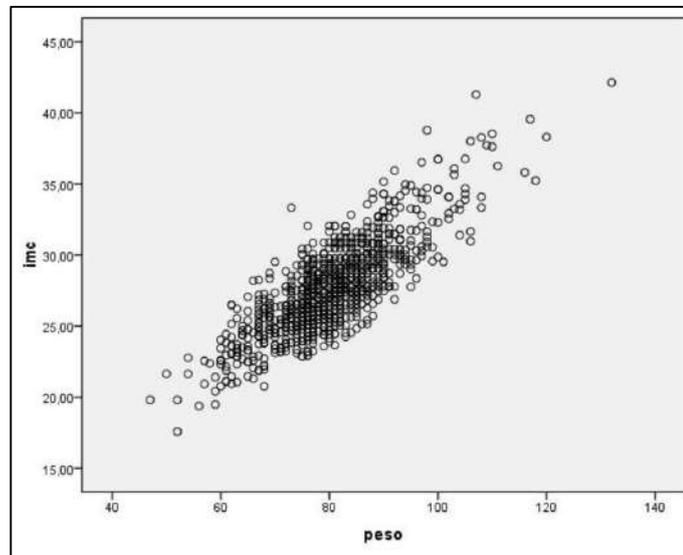


Figura 10. Ejemplo de Diagrama de dispersión. (Laguna, 2011)

Con la nube de puntos podemos apreciar si existe o no una tendencia entre las dos variables, pero si queremos cuantificar esta asociación debemos calcular un coeficiente de correlación.

Hay dos coeficientes de correlación que se usan frecuentemente: el de Pearson (paramétrico) y el de Spearman (no paramétrico, se utiliza en aquellos casos donde las variables examinadas no cumplen criterios de normalidad o cuando las variables son ordinales). El coeficiente de correlación de Pearson evalúa específicamente la adecuación a la recta lineal que defina la relación entre dos variables cuantitativas. El coeficiente no paramétrico de Spearman mide cualquier tipo de asociación, no necesariamente lineal.

El estimador muestral más utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables X e Y es el coeficiente de correlación de Pearson (r). Se trata de un índice que

mide si los puntos tienen tendencia a disponerse en una línea recta. Puede tomar valores entre -1 y +1.

La expresión matemática para el coeficiente de correlación de Pearson parece compleja, pero esconde un planteamiento que, en el fondo, es sencillo: “r” estará próximo a 1 (en valor absoluto) cuando las dos variables X e Y estén intensamente relacionadas, es decir, al aumentar una aumenta otra y viceversa. A este concepto de variación al unísono se le llama covarianza.

El numerador del coeficiente de correlación es la covarianza muestral S_{XY} entre X e Y, que nos indica si la posible relación entre dos variables es directa o inversa. Es una medida que nos habla de la variabilidad conjunta de dos variables cuantitativas.

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Así, si valores altos (o bajos) de X tienden a asociarse con valores altos (o bajos) de Y, el producto de las desviaciones tenderá a ser positivo y la covarianza será positiva. Por el contrario, si valores altos de una variable se relacionan con valores bajos de la otra variable, el producto de las desviaciones tenderá a ser negativo y la covarianza será negativa.

Para entender mejor se presentan las siguientes gráficas.

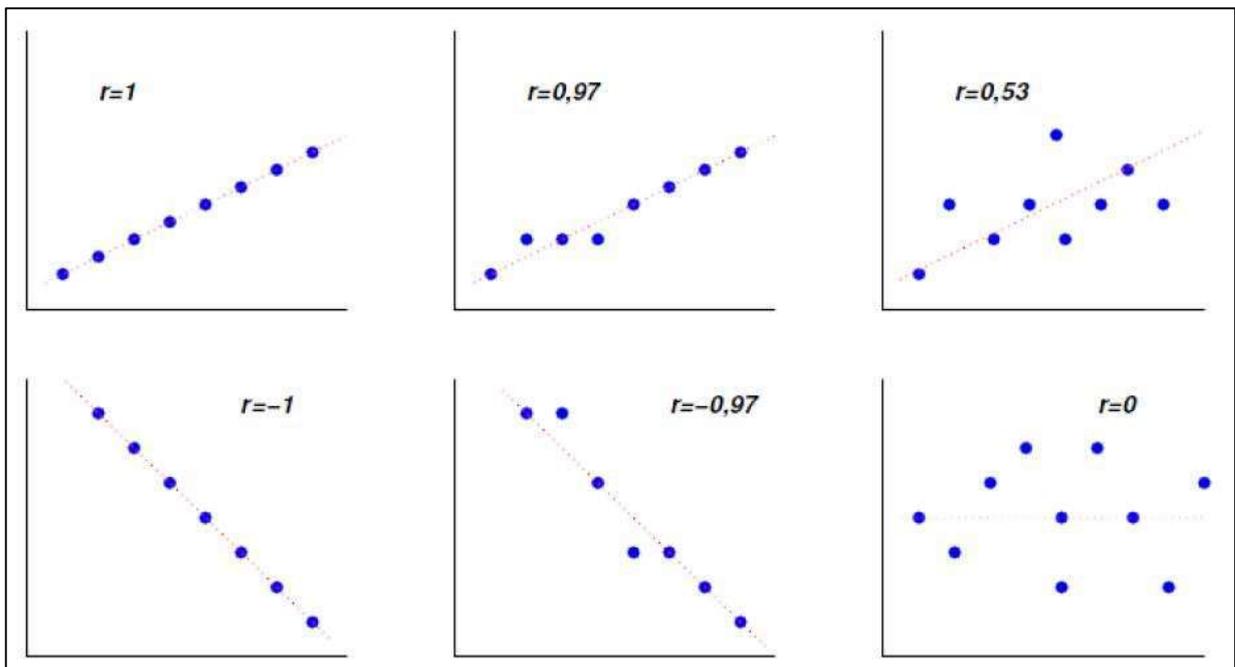


Figura 11. Ejemplos de asociación (Laguna, 2011)

En la Figura 11, según Laguna, (2011) vemos que $r = \pm 1$ es lo mismo que decir que las observaciones de ambas variables están perfectamente alineadas. El signo r, es el mismo que S_{xy}, por tanto, nos indica el crecimiento o decrecimiento de la recta. La relación lineal es tanto más perfecta cuanto r está cercano a ± 1 .

1.4.2. Histograma, Desviación Estándar, Promedio

La Desviación Estándar y el promedio, son conceptos estadísticos que miden la tendencia central de los datos a diferencia de la distribución Gaussiana que mide su dispersión. Estos conceptos de tendencia central y distribución se aplicaron para el análisis de la información obtenida de los MDEs.

Una manera fácil de obtener el valor absoluto de la distancia entre la media y cada observación experimental es elevar al cuadrado la diferencia restada. Todos los valores al cuadrado son números positivos y su suma representa la suma total de distancias. Este número se conoce como la diferencia media cuadrática. Si se divide la diferencia media cuadrática por el número de observaciones se obtiene la desviación media, un número que es más fácil de trabajar que la diferencia media cuadrática de datos crudos. Dividiendo la diferencia media cuadrática por $n - 1$ proporciona la varianza de los datos y la raíz cuadrada de este valor es la Desviación Estándar (DesvEst). El uso de la DesvEst tiene que ver con la importancia y atención que le da la estadística a una muestra de datos más que al conjunto de datos del que la muestra se deriva; un pequeño fragmento del conjunto de datos no compartiría las mismas características a diferencia del conjunto completo ya que mostraría la apariencia de ser todo similar (Livingston, 2004).

El promedio o media aritmética (\bar{x}) de un conjunto de mediciones es una medida de centro muy común y útil. Es frecuente que esta medida se conozca como media aritmética o simplemente media, de un conjunto de mediciones. En sí, el promedio o media de un conjunto de n mediciones es igual a la suma de las mediciones dividida entre n (Mendenhall et al, 2010).

Según Livingston (2004), muchas pruebas de análisis estadístico se basan en la suposición de que los datos siendo analizados parten de una distribución normal (Gaussiana). La distribución Gaussiana es la curva en una gráfica que simula a una campana (Figura 12).

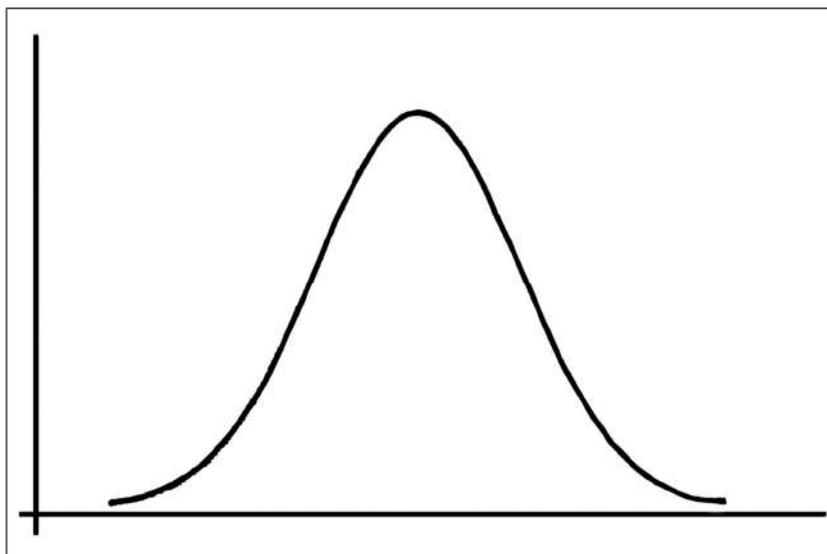


Figura 12. Distribución Gaussiana.

La figura familiar de la curva Gaussiana representa la probabilidad de un evento ocurrido relativo a algún tipo de medición. De manera idónea la gráfica debe ser de forma acampanada, sin embargo, en la práctica esta se desvía. Para diversos análisis es importante medir que tan lejano se desvía un set de datos experimentales de la normalidad. Estas desviaciones son conocidas como Skewness (Sesgo, Figura 13) y Kurtosis (Curtosis, Figura 14).

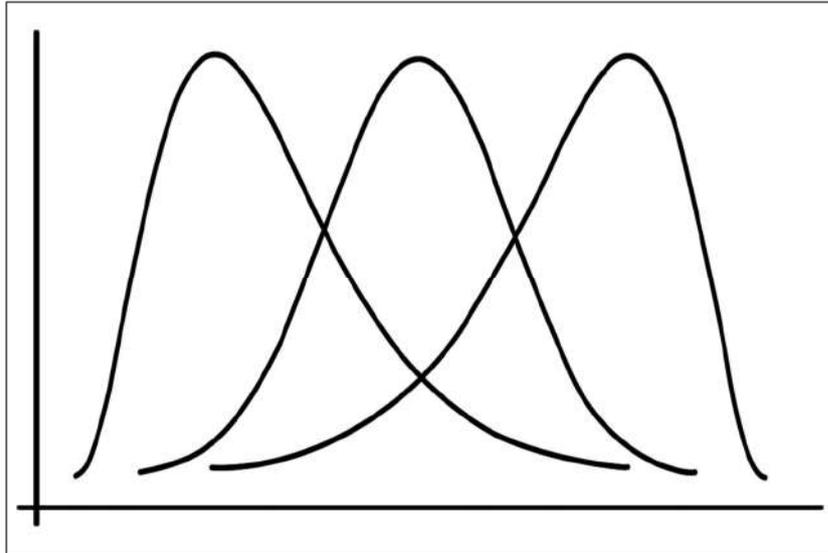


Figura 13. Skewness o sesgo de distribución de datos (Livingston, 2004).

La imagen anterior muestra el sesgo de distribución de datos. La cresta central muestra típicamente una distribución de datos normal, mientras que la cresta izquierda con una curva pronunciada y una cola estrecha alargada a la derecha representa la distribución de datos positiva y es la que más comúnmente observada en la práctica real. La cresta derecha con la curva pronunciada y una cola estrecha alargada a la izquierda representa la distribución de datos negativa.

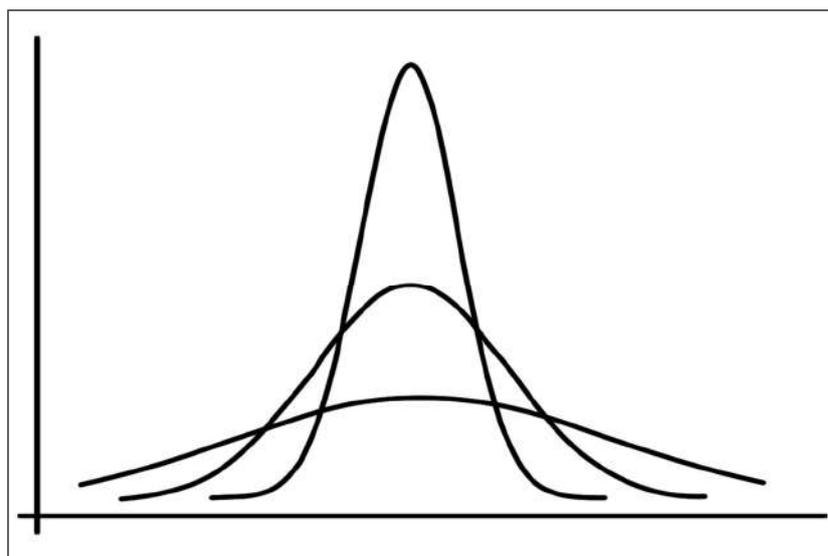


Figura 14. Kurtosis o curtosis de distribución de datos (Livingston, 2004).

Por otro lado, la curtosis se presenta cuando la distribución de datos muestra una curva central y se mantiene al centro, arriba o abajo. La curva central muestra la distribución de datos normal, cuando dicha curva es pronunciada al centro con colas estrechas a ambos extremos la distribución de datos es positiva y si la cresta de la curva es plana y las colas anchas entonces la distribución de datos es negativa.

1.5. Aplicación de drones en la topografía

Con el uso y aplicación de los drones no-fotogramétricos a levantamientos topográficos es posible obtener la precisión muy parecida a la que se obtiene con equipo GPS/RTK según Uysal et al. (2015), obteniendo ventajas en costos bajos, tiempo y esfuerzo en trabajo de campo (Polat & Uysal, 2017). Uysal et al. (2015), concluye indicando que los drones son una tecnología alterna de adquisición de datos en áreas pequeñas generando MDEs, además de la alta resolución espacial y temporal que no solo es importante para la Geomática sino también para muchas otras disciplinas.

Dubbini et al., (2016), presenta una metodología que permite la creación de un Modelo Digital de Superficie para la interpretación arqueológica de anomalías del terreno a partir de un flujo de trabajo, de bajo costo, fácil de usar, automatizado y preciso. El enfoque de Structure from Motion utiliza fotografías adquiridas por un Vehículo Aéreo no Tripulado para crear, con otros elementos, un modelo 3D del área de estudio. La habilidad de exportar modelos espaciales como ortofotos y modelos digitales de elevación son las ventajas de esta propuesta que permite a arqueólogos el análisis del entorno del área de estudio.

Agüera-Vega et al. (2018), propone una metodología que genera ortofotos y nube de puntos para áreas con topografía extrema como la que se presenta en su estudio, un talud de corte de camino casi vertical de difícil acceso al personal. Tres proyectos fotogramétricos con drones se llevaron a cabo, el primero se realizó tomando imágenes horizontales del terreno, el segundo obtuvo imágenes con la cámara inclinada a 45° y el tercero utilizando ambos conjuntos de imágenes obtenidas de los primeros dos proyectos. Este último obtuvo los mejores resultados en cuanto a precisión con error medio cuadrático igual a 0.053 m, 0.070 m, y 0.061 m en X, Y, y Z respectivamente, resultados similares reportados en otros estudios.

Para los proyectos mencionados anteriormente el autor utiliza un traslape en las imágenes de 90% en dirección transversal y 60% en dirección longitudinal, realizando seis pases con el drone a alturas de 20 m, 50 m, 80 m, y 110 m y las coordenadas de 26 puntos esparcidos medidos con Estación Total (ET) sin reflector pero dada la elevación del talud de hasta 70 m en la parte más alta solo se midieron puntos hasta 35 m de altura ya que desde el nivel del camino el ángulo del telescopio de la ET fue muy alto e impidió seguir midiendo a través de él. Conjuntamente se midieron ocho puntos esparcidos en el camino utilizando ET y equipo GNSS/RTK.

Agüera-Vega et al. (2018), expone en la conclusión de su estudio la necesidad de mejora en el efecto del número y distribución de los puntos de control terrestre, la resolución de las imágenes o la visualización de la geometría sobre la precisión de los productos cartográficos resultantes.

Martínez-Carricondo et al., (2018), estudió diferentes distribuciones de PCT para tratar de optimizar los productos obtenidos de los UAV y saber la precisión de los datos y que estén dentro de un rango admisible. De todas las distribuciones probadas en su estudio los mejores resultados se obtuvieron cuando los PCT se distribuyen en el perímetro en conjunto con una distribución estratificada del área de estudio, esto significa que es necesaria la colocación de los PCT alrededor del margen del polígono del área de estudio para minimizar los errores planimétricos y la distribución de PCT dentro del polígono de manera estratificada con una densidad de alrededor de 0.5-1 PCT x ha⁻¹ para minimizar los errores altimétricos, la combinación de estas dos distribuciones minimiza el error total obtenido.

Del Río-Santana et al. (2019), realizó un trabajo comparativo entre tres métodos para ejecutar un levantamiento topográfico, i) medición con cinta, ii) Estación Total y iii) drones. Los resultados que se obtuvieron concluyeron que la medición hecha con el drone obtuvo menor error que aquel levantamiento hecho por la Estación Total y menor aún que la realizada con cinta. Este estudio realiza un análisis comparativo poniendo énfasis en el beneficio costo/tiempo del uso de los drones, aunque, concluye el autor, la inversión inicial para adquirir este tipo de tecnología es una de las grandes desventajas.

1.6. Hipótesis

De acuerdo con la información presentada, se plantea la siguiente hipótesis:

Desarrollar una propuesta metodológica que permita obtener modelos espaciales como: ortofotos, modelos digitales de elevación, para estudios de Geomática de alta resolución y calidad a menor costo y tiempo aplicando vuelos planificados con drones No-fotogramétricos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

En la implementación de la propuesta se pretende desarrollar un levantamiento topográfico altimétrico con métodos convencionales de alta precisión de un área prueba; más un levantamiento fotogramétrico aéreo con el drone. Esto para hacer un análisis comparativo y evaluar la calidad de los productos resultantes.

La zona de estudio (Figura 15) está ubicada en el sureste de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, México. Aproximadamente entre las latitudes $17^{\circ}32'07.20''$ N a $17^{\circ}32'17.85''$ N, longitudes $99^{\circ}29'50.50''$ W a $99^{\circ}29'35.20''$ W, y elevación aproximada de 1235 m SNMM, cubre un área aproximada de 7 ha. Además, está en una zona urbanizada y con fácil acceso. Fue seleccionada dada la pendiente controlada del terreno ya que no tiene accidentes que pudieran mostrar errores muy grandes, la diferencia de elevaciones en centímetros, pero notable para la resolución de los productos resultantes, la inexistente vegetación a ras de suelo, las edificaciones cercanas no fueron ningún obstáculo para la realización del vuelo con el drone. Esto resultó muy conveniente para el levantamiento topográfico convencional y el levantamiento fotogramétrico con drone.

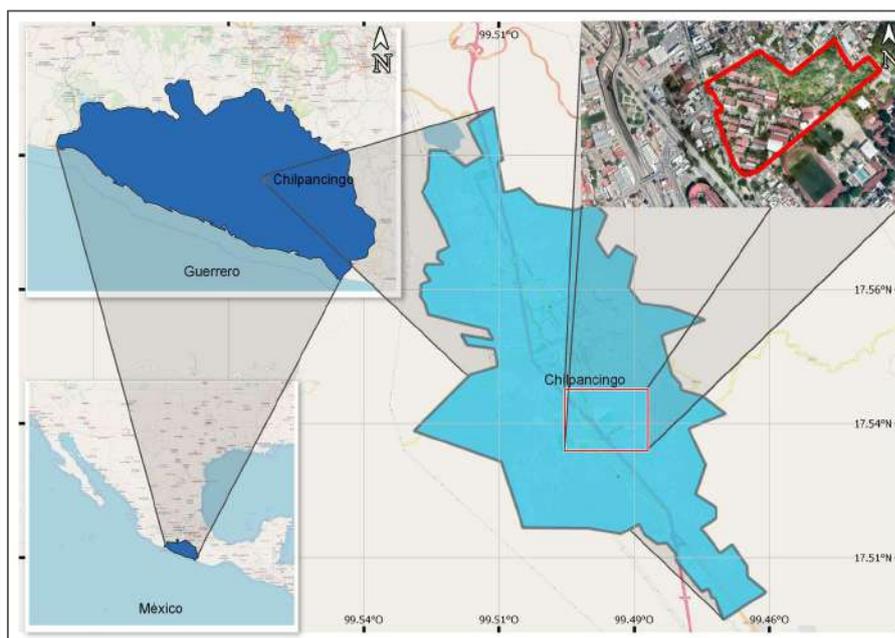


Figura 15. Ubicación de la zona de estudio

2.2. Materiales

2.2.1. Plataforma aérea

En la Tabla 7 y Figura 16 se describe y se muestra el equipo utilizado para la realización de este trabajo. Cabe mencionar que se pueden obtener los mismos resultados con cualquier otro drone con las mismas características y clasificado como

“RPAS Micro con un peso de 2 kg o menos” según la Dirección General de Aeronáutica Civil, SCT, México (2017) Tabla 8.

Tabla 7. Descripción y especificaciones del dron utilizado

DJI Mavic Pro	
Aeronave	
Peso	734 g
Dimensiones	83 x 83 x 198 mm (plegado)
Longitud diagonal (hélices excluidas)	335 mm
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s en modo deportivo
Velocidad máxima de descenso	3 m/s
Velocidad máxima	65 km/hr en modo deportivo sin viento
Techo máximo de servicio sobre el nivel del mar	5000 m
Tiempo máximo de vuelo	27 min (0 viento a velocidad consistente de 25 km/hr)
Tiempo de vuelo promedio	21 min (vuelo general, 15% de batería restante)
Distancia máxima de vuelo	Mavic Pro: 13 km
Sistemas de posición satelital	GPS/GLONASS
Gimbal (Cardán)	
Rango de control	Cabeceo: -90° a +30°, Ruede: 0° a 90° (horizontal y vertical)
Cámara	
Sensor	1/2.3" CMOS Pixeles efectivos: 12.35 Megapixeles (Pixeles totales: 12.71 M)
Objetivo	78.8° FOV, 28 mm (35 formato equivalente) f/2.2 Distorsión <1.5% Enfoque desde 0.5 m a ∞
Tamaño máximo de imagen	4000x3000 pixeles
Rango ISO	100 – 1600 (foto)
Velocidad de disparador electrónico	8 s a 1/8000 s
Sistema de archivo compatible	FAT32 (< 32 GB), exFAT (> 32 GB)
Foto	JPEG, DNG
Control Remoto	
Frecuencia de operación	2.400 GHz a 2.4835 GHz
Distancia máxima de transmisión	FCC: 7 km, CE: 4 km; SRRC: 4 km sin obstrucciones y libre de interferencia
Rango de temperatura de funcionamiento	De 0° a 40°C

Fuente: DJI, 2018

Tabla 8. Clasificación de drones de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).

CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA		
Peso máximo de despegue	Categoría	Uso
2.000 kg o menos	RPAS Micro	Privado recreativo
		Privado no comercial
		Comercial
2.001 kg hasta 25 kg	RPAS Pequeño	Privado recreativo
		Privado no comercial
		Comercial
25.001 kg o más	RPAS Grande	Privado recreativo
		Privado no comercial
		Comercial

Fuente: (Dirección General de Aeronáutica Civil, SCT, México, 2017)



Figura 16. Plataforma aérea: DJI Mavic Pro.

2.2.2. Equipo para levantamiento topográfico

Para el levantamiento altimétrico se utilizó un nivel fijo de la marca Sokkia modelo B40. Un equipo receptor Leica Viva modelo CS10 GPS/RTK fue el seleccionado para la medición de los Puntos de Control Terrestre (PCT) y los vértices del polígono de apoyo (Figura 17).

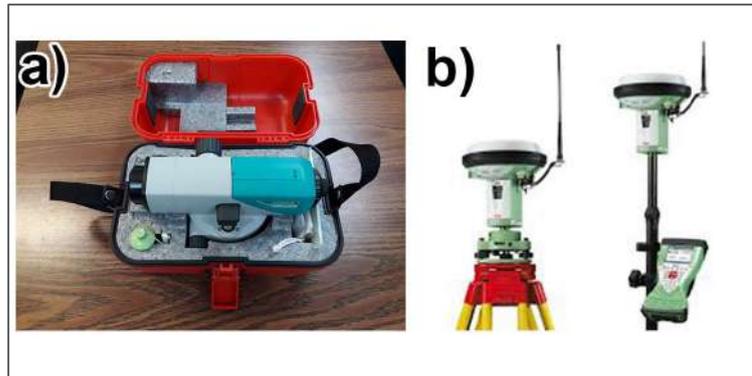


Figura 17. a) Nivel fijo Sokkia B40 b) Leica Viva CS10 GPS/RTK

2.2.3. Puntos de Control Terrestre (PCT) para georreferenciación de modelos espaciales

En este estudio se aplica el método de distribución de PCT de Martínez-Carricondo et al., (2018) dado que toma en cuenta la morfología del terreno e incluye un rango variado de elevaciones similar al área de estudio de este proyecto.

En la Figura 18 se muestra la ubicación y distribución de los PCTs en el proyecto. Las coordenadas tridimensionales de los puntos fueron medidas por el receptor Leica VIVA modelo CS10 GPS/RTK con el punto base ligado a la Red Geodésica Nacional por el Departamento de Topografía de la Facultad de Ingeniería.



Figura 18. Ubicación y distribución de los PCTs en el área de estudio.

Como se observa en la Figura 18, los PCTs fueron distribuidos en el borde del área de estudio para obtener el menor error posible en X y Y. Para obtener el menor error posible en Z se distribuyeron PCTs dentro del polígono del área de estudio de manera estratificada tomando como referencia los cambios de nivel en el terreno. En la zona con vegetación al Noreste del área de estudio no hubo un espacio apto para la ubicación de PCTs dado que no había un lugar abierto al cielo.

Se colocaron 22 PCT distribuidos en el área de estudio con el propósito de georreferenciar y evaluar la precisión del MDE y ortofoto. La señalización consistió en figuras geométricas circulares hechas de policloruro de vinilo (comúnmente conocido como lona PVC para impresión) de 80 cm de diámetro dividida en cuatro con cuadrantes opuestos en blanco y negro (Figura 19). Para ubicar el centro de cada punto de manera permanente se colocaron una combinación de clavos para concreto o tornillos con taquetes. Además, se colocaron en cada esquina de la muestra del área de estudio que se midió para realizar el análisis comparativo entre el levantamiento topográfico y el realizado con el dron.

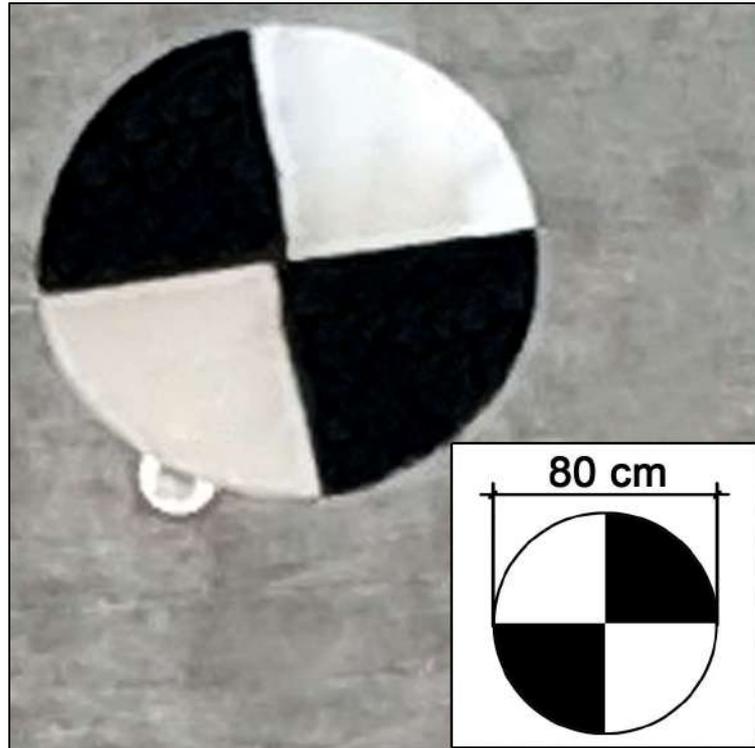


Figura 19. Señalización de PCTs.

2.2.4. Equipo de cómputo

Una computadora PC de media gama con Sistema Operativo Windows 10, 16 Gb de RAM, procesador i5, y una tarjeta de video Intel® HD Graphics 530.

2.2.5. Software

2.2.5.1. Dinámica EGO

Dinámica EGO es una plataforma de modelado ambiental, que, a diferencia de otras plataformas con parámetros fijos para procesamiento y que solo se modifican si los valores de sus coeficientes cambian, está presenta una gran posibilidad abierta para el diseño de modelos simples y complejos.

La interfaz gráfica de Dinámica EGO permite el diseño de un modelo simplemente arrastrando y conectando operadores que realizan cálculos sobre varios tipos de datos como: constantes, matrices, tablas, y mapas ráster (Centro de Sensoriamento Remoto / Universidade Federal de Minas Gerais, 2020). Por esto último es que se utiliza este programa para crear un proceso de diferencia entre el MDE generado con el levantamiento topográfico y el generado con el drone, resultando en imágenes ráster y tablas con datos con los que se pueden crear gráficas para análisis visual.

2.2.5.2. DJI GO 4.0

DJI Go 4.0 es la aplicación del fabricante de los drones DJI, los cuales fueron considerados para la implementación de esta metodología. Este es el sistema operativo del dron usado para obtener las imágenes aéreas y se utiliza para revisar que elementos como la conexión del control remoto y el vehículo aéreo, la brújula, la batería, la conexión con los satélites y la señal de video trabajen de manera correcta.

Además, a través de esta aplicación se harán los desbloques para poder volar en caso de que la ubicación de nuestra área de estudio se encuentre en una zona restringida.

2.2.5.3. Map Pilot

Map Pilot es una aplicación comercial, de bajo costo de la plataforma Maps Made Easy que ayuda al usuario a recolectar información a través de los drones. A pesar de que hay muchos diferentes elementos que el usuario debe tomar en consideración para ejecutar un vuelo automatizado, Map Pilot intenta hacer la mayor parte del trabajo mientras el piloto atiende la actitud del dron (Maps Made Easy, 2018).

Creando misiones, el usuario planea el vuelo de la zona de estudio. La aplicación es amigable y fácil de entender. Después de configurar el tipo de dron que se estará utilizando, éste reconoce el tipo de batería inteligente y sus características obteniendo el tiempo de duración de vuelo.

2.2.5.4. PhotoScan

El proceso fotogramétrico de las imágenes colectadas del dron se llevó a cabo con el programa de Agisoft PhotoScan. Un software que implementa algoritmos fotogramétricos SfM (Structure from Motion) y MVS (Multi-view Stereo). Este software es un programa fotogramétrico independiente para la generación de nubes de puntos, modelos poligonales texturizados, ortomosaicos georreferenciados y modelos digitales de superficie y terreno a partir de imágenes fijas.

Además de su proceso rápido, provee resultados de alta resolución. Es capaz de procesar miles de imágenes de manera local ya que no se requiere que el usuario transmita su información fuera de su cuidado (eg. cargar datos a plataforma en línea) para su proceso en caso de existir datos sensibles (Agisoft PhotoScan, 2018).

Este trabajo de investigación ha tomado en cuenta otras plataformas, pero ha enfocado el proceso de imágenes a través de este software por ser el más ideal con el equipo (hardware) utilizado por qué se han obtenido resultados similares en otros trabajos y ha superado otras plataformas en términos de precisión (Martínez-Carricondo et al, 2018).

2.2.5.5. QGIS

QGIS es un software Open Source que trabaja con información espacial en una computadora. GIS significa Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica) y un GIS consiste en: i) Datos digitales, ii) el hardware, iii) el software, siendo este último el programa que ejecuta los componentes de la computadora y permite el trabajo con los datos digitales.

2.3. Esquema metodológico general

En la Figura 20 se muestra el diagrama metodológico general del trabajo de investigación que comprende i) la metodología propuesta que ha sido separada en cuatro fases y que se describe de manera inmediata y ii) el levantamiento topográfico para el análisis comparativo de ambos modelos espaciales obtenidos.

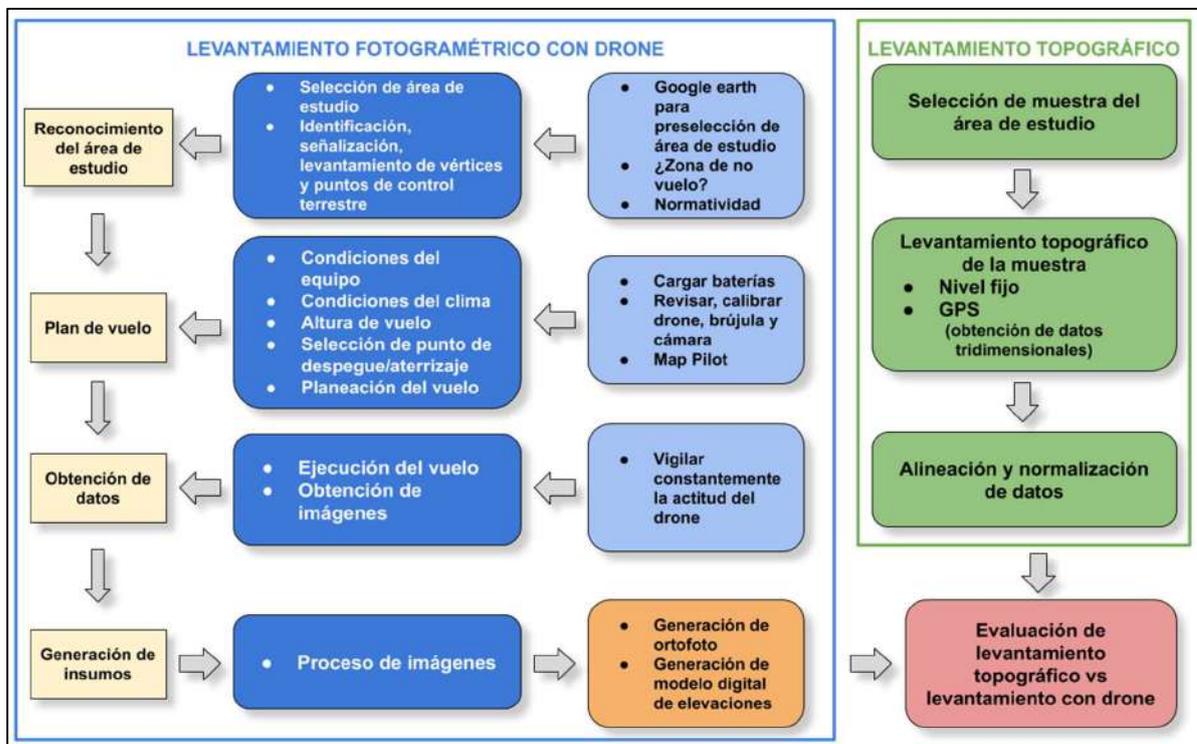


Figura 20. Esquema metodológico para la generación de ortofotos y MDE.

2.3.1. Reconocimiento del área de estudio

Este primer paso es muy importante dado que en esta etapa se identifican las zonas de no vuelo, estrictamente prohibidas para el uso de cualquier tipo de dron a menos que sea autorizado. Deben observarse los requerimientos y normas que establece la Dirección General de Aeronáutica Civil para un vuelo seguro dentro del espacio aéreo mexicano. En la Tabla 9 se presentan algunas normas que se deben seguir para la planeación correcta de la misión de vuelo, pero se recomienda familiarizarse con toda la normatividad para evitar alguna eventualidad.

Tabla 9. Requerimientos para operar un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (Drone)

Requerimientos y limitaciones generales	
a)	El drone debe ser operado a línea de vista, el piloto debe ser capaz de ver el drone en todo momento para saber su localización, actitud, altitud, dirección, otras aeronaves.
b)	El piloto no debe operar el drone en lugares abiertos o cerrados donde se reúnan más de 12 personas.
c)	El piloto es el responsable de la operación, uso y en caso de un incidente o accidente, de los daños y/o lesiones causados.
d)	El piloto es responsable del mal uso que se dé a la información obtenida por el uso del drone.
e)	El piloto es responsable de respetar todas las leyes y normas establecidas de índole federal y local relacionadas con seguridad nacional, seguridad pública, entre otras.
f)	El piloto no debe operar el drone de una manera negligente o temeraria que ponga en peligro la vida y propiedad de terceros.
g)	Los drones deben ser operados durante horas oficiales entre salida y puesta del sol.
h)	Ninguna persona debe actuar como piloto u observador del drone en estado de ebriedad o bajo los efectos de drogas.
i)	El piloto no debe operar más de un drone al mismo tiempo.
Requerimientos y limitaciones del RPAS micro	
a)	El drone debe ser pilotado a una altura máxima de 122 m (400 ft), excepto a la requerida en el inciso f).
b)	No debe operarse más allá de la línea visual del piloto. El drone no debe alejarse más de 457 m (1500 ft) de distancia horizontal del piloto.
c)	Debe operarse a una distancia de 9.2 km (5 NM – millas náuticas) de cualquier aeródromo.
d)	El piloto debe operar el drone a una altura máxima de 100 m (328 ft) en el área existente entre el círculo de 5 NM y el círculo de 10 NM alrededor de aeródromos.
e)	Debe operarse a una distancia de separación de al menos 0.9 km (0.5 NM) de cualquier helipuerto.

Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil, SCT, México, 2017.

DJI tiene en su página web una herramienta que el piloto debe consultar. Esta herramienta es un mapa con las zonas prohibidas para realizar vuelos y pueden ser revisadas con anterioridad para continuar con la siguiente fase de este proceso. Si la zona de estudio se encuentra en un área prohibida, como lo muestra la Figura 21, deberán solicitarse con las autoridades competentes los permisos y autorizaciones correspondientes. DJI por su parte, por seguridad bloquea automáticamente sus drones para volar en zonas restringidas, entonces el piloto deberá solicitar un desbloqueo en la página web como se muestra en el Anexo 1 “*Guía Vuelo Seguro de DJI para desbloqueo de equipo*”.

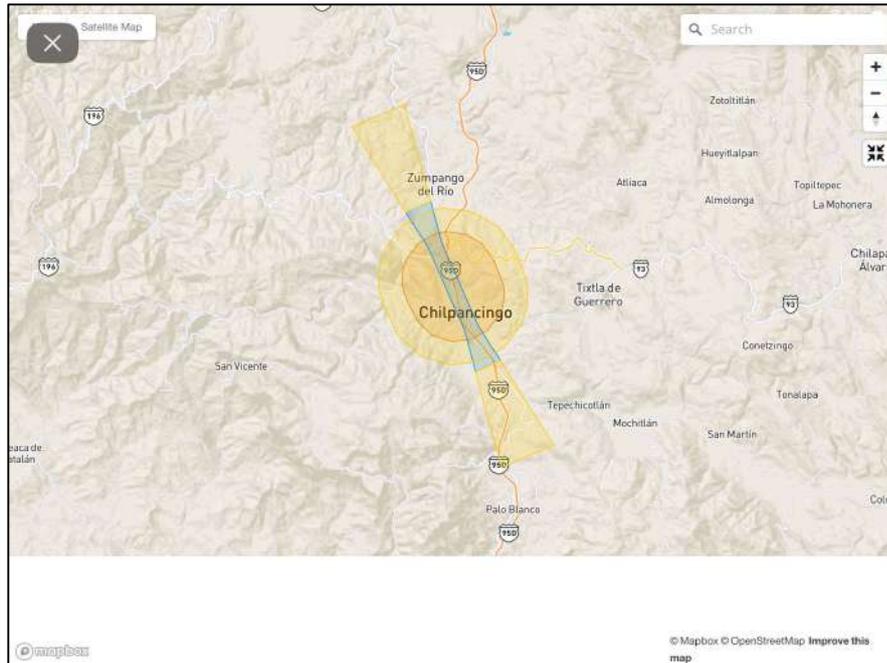


Figura 21. Mapa de zonas restringidas de vuelo.
 Fuente: <https://www.dji.com/mx/flysafe/geo-map>

Google Earth es una herramienta que se utilizó dentro de esta propuesta, creando en éste un polígono temporal de apoyo visual para crear la misión en Map Pilot y establecer los PCT en el área de estudio (Figura 22).

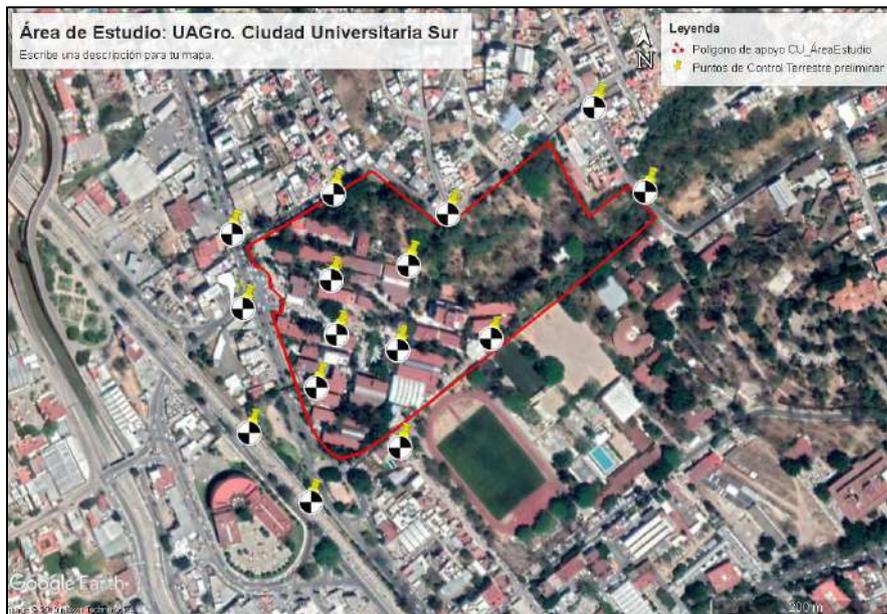


Figura 22. PCT en Google Earth

Se realizó un reconocimiento físico del área de estudio para identificar todos aquellos elementos que pudieran representar un obstáculo en la realización del vuelo, ejemplo de estos elementos pueden ser torres de telecomunicaciones, torres eléctricas, edificaciones altas, etc. Es muy importante y se hace énfasis en el conocimiento y la

familiarización de la zona de estudio para evitar cualquier tipo de percance, esto incluye daños al dron, al personal de apoyo o daños a terceros.

Posteriormente se procedió con la identificación, señalamiento y medición de los PCT. Es necesario que estos puntos estén ubicados en áreas abiertas y expuestas al cielo de manera que cuando el dron los sobrevuele puedan ser plenamente identificados en las imágenes obtenidas ya que estas marcas servirán para la georreferenciación del modelo durante el proceso. Los PCT deben ser distribuidos de acuerdo con el apartado 2.2.3.

2.3.2. Plan de vuelo

Para evitar demoras durante el plan de vuelo se revisaron una serie de elementos, entre ellos está la inspección del equipo como las baterías del dron, la batería del Controlador Remoto (CR), la batería del dispositivo móvil. También fue necesaria una conexión de internet al momento de crear la misión en Map Pilot por la necesidad de descargar imágenes satelitales para ubicar la zona de estudio. Otro elemento muy importante fue verificar que el estado del clima para el día seleccionado para realizar el vuelo fuera adecuado. Es recomendable bajo esta metodología realizar el vuelo cuando el sol este sobre el meridiano del área de estudio para evitar en lo posible las sombras de elementos como edificaciones, esto evitará huecos o anomalías en el proceso.

La aplicación DJI GO 4.0 se requiere para revisar que el dron esté funcionando de manera correcta, se calibró la brújula, se verifica que la conexión con los satélites sea óptima para la navegación del equipo (mínimo debe haber conexión con 9 satélites antes de empezar el vuelo), y la conexión entre el controlador y el dron sea excelente para el buen funcionamiento del equipo durante el vuelo (Figura 23), además de importar y desbloquear el equipo como se indica en el Anexo 1 *“Guía para desbloqueo de equipo a través de Vuelo Seguro de DJI”*.



Figura 23. Interfaz de la aplicación DJI GO 4.0

Con el software Map Pilot se creó una misión colocando una serie de puntos en los vértices del polígono a volar más el punto de despegue. En la configuración del vuelo (Figura 24) se estableció i) el traslape de las imágenes de 75% en horizontal y 75% en vertical, queda establecido que la fotogrametría convencional dicta un traslape horizontal mínimo de 60% y 30% vertical e incrementarlo dependiendo el tipo de terreno y los elementos en el mismo, tales como: vegetación, edificaciones, cuerpos de agua, entre otros, la razón de incrementar el traslape en este caso es que mientras más información se obtenga del área de estudio las probabilidades de regresar a ejecutar un segundo vuelo será menor llevando a un ahorro de tiempo. Debido a lo anterior, se aplica el porcentaje establecido dada la cantidad de elementos que existen en el área de estudio. La altura de vuelo se elige a 100 m para ampliar la cobertura del terreno por imagen haciendo más eficiente la toma de datos. La velocidad máxima de 10 m/s establecida de manera automática, y un máximo de tiempo de vuelo de 17 minutos. Esto último se eligió así para que después de agotados esos 17 min el dron tuviera suficiente energía en la batería para regresar al punto de despegue.

sencilla y se trata solo de tomar la memoria del drone que viene incluida junto con un adaptador (Figura 25), seleccionar las imágenes y copiarlas a la computadora del usuario.



Figura 25. Ubicación, memoria y adaptador.

2.3.4. Generación de productos

El proceso de las imágenes para la generación de los productos inicia con el software fotogramétrico que utiliza algoritmos SFM y MVS. Para este estudio PhotoScan de Agisoft fue el software que se utilizó para el proceso de las imágenes obtenidas.

PhotoScan es un software fotogramétrico con el cual se pueden crear y exportar datos como nube de puntos, ortofotos, modelos en 3D, modelos digitales de elevación por mencionar algunos. Está basado en el pareo de imágenes y algoritmos de autocorrelación. Incluye también los metadatos de la cámara, su ubicación (X, Y, y Z) en un sistema de referencia de coordenadas, los ángulos de navegación (roll, tilt, y yaw) de la cámara para todas y cada una de las imágenes y permite también que el modelo sea referenciado con puntos de control (El Meouche et al., 2016).

Generalmente el objetivo del procesamiento de imágenes con PhotoScan es construir la superficie en 3D, el ortomosaico y MDEs. Este programa fotogramétrico es el más usado y ha presentado resultados óptimos en estudios realizados utilizando imágenes obtenidas con drones.

Como se describe en el manual de Agisoft PhotoScan (2018), el proceso de imágenes en PhotoScan envuelve cuatro fases principales. El mismo proceso mostrado puede realizarse independientemente de la cantidad de imágenes obtenidas del sistema aéreo y el tipo de cámara utilizado.

1. La primera fase es la Alineación de las Imágenes, donde el programa busca por puntos comunes en las imágenes, busca la posición en la que fue tomada cada una de ellas y afina los parámetros de la calibración de la cámara resultando en una nube de puntos dispersos y la ubicación de las imágenes con respecto al objeto de interés como se muestra en la Figura 26.

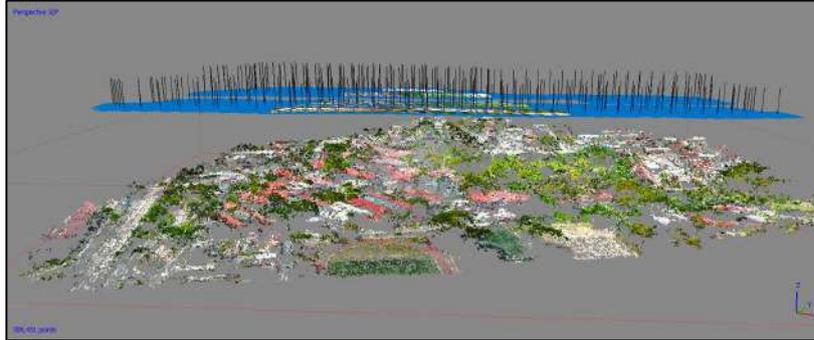


Figura 26. Nube de puntos dispersos y ubicación de imágenes.

2. La fase dos es la generación de la Nube Densa de Puntos (Figura 27), que es construida por el programa PhotoScan en función de las posiciones estimadas de la cámara y las imágenes.



Figura 27. Nube Densa de Puntos.

3. La Generación de Superficie es la fase tres, la creación de una Malla o MDE. Una malla (Figura 28) poligonal en 3D representa la superficie basada en la nube de puntos densa o dispersa, no siempre se requiere la creación de una malla, este paso se puede omitir, todo dependerá de las intenciones del usuario. El MDE se puede construir en proyección Geográfica, Planimétrica o Cilíndrica de acuerdo con las necesidades del usuario. Si la nube de puntos densa fue clasificada anteriormente es posible entonces generar un MDE de una clasificación específica de puntos, por ejemplo: puntos del suelo, esto generara un modelo digital de superficie.

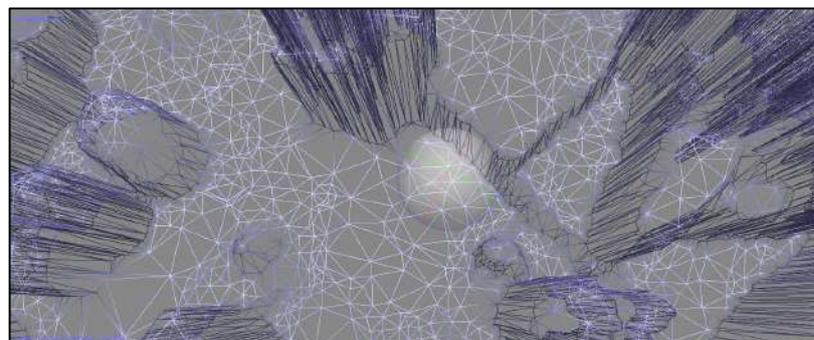


Figura 28. Generación de superficie creando una malla.

- Después que la superficie ha sido generada puede ser también texturizada como muestra la Figura 29 (relevante solo si se generó la malla) o puede generar una ortofoto. La ortofoto puede ser proyectada, si el usuario así lo desea, sobre la superficie de un MDE o una malla (si es que se generó para el proyecto).



Figura 29. Modelo en 3D texturizado.

El Anexo 3 “Proceso de imágenes en Agisoft PhotoScan” proporciona la información necesaria para procesar las imágenes de una manera más detallada.

2.3.4.1. Generación de ortofoto

La ortofoto es un conjunto de fotografías cuyas imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica. Esto se logra mediante un proceso denominado rectificación diferencial, en el cual se eliminan los efectos de la inclinación y del desplazamiento por relieve, propios de las fotografías. Por ello las ortofotos son equivalentes a los mapas de líneas en lo referente a su precisión geométrica (Jauregui, 2008).

Después de someter las imágenes obtenidas con drone al proceso realizado en PhotoScan, la exportación de una ortofoto (Figura 30) podrá ser posible siguiendo los pasos descritos en el Anexo 3 Guía básica “Proceso de imágenes en Agisoft PhotoScan”.

Este modelo está referenciado al Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) WGS 84 UTM¹ UTM² zone 14N como todas las imágenes utilizadas para el proceso.

¹ **World Geodetic System 1984** (Sistema Geodésico Mundial 1984) es un modelo matemático tridimensional que permite localizar cualquier punto de la tierra a través de coordenadas geográficas (expresadas en grados, minutos y segundos). Este modelo es representado por medio de un elipsoide, que es la figura geométrica que mejor se asemeja a la tierra.

² **Universal Transversal de Mercator** es un sistema de proyección que expresa las coordenadas en metros pasando de un modelo tridimensional a uno bidimensional.

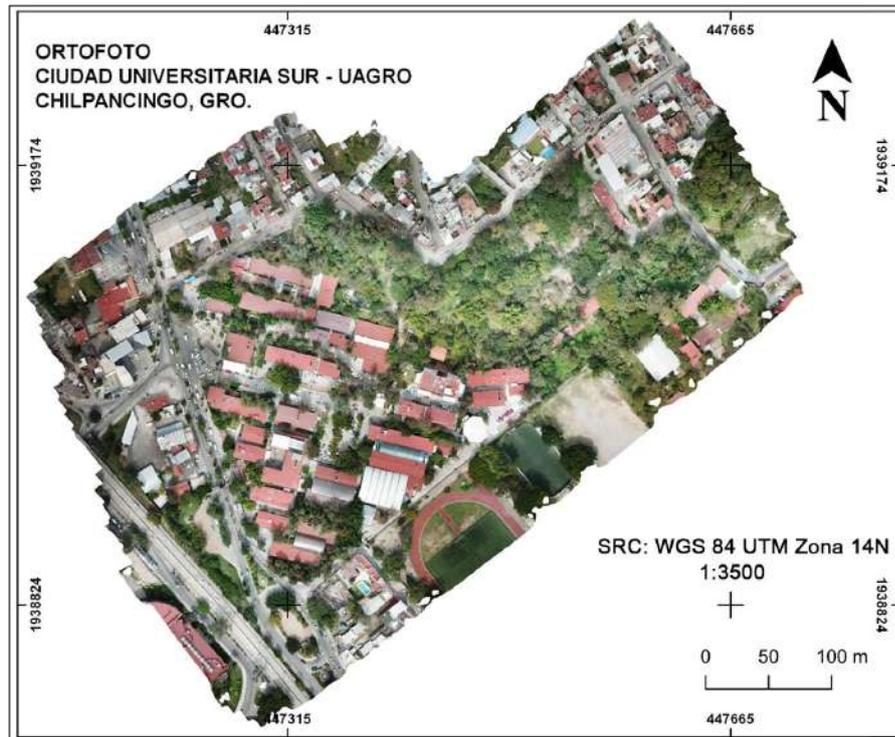


Figura 30. Ortofoto generada y exportada de Agisoft PhotoScan.

2.3.4.2. Generación de MDE

De manera general, un MDE es una representación en 3D de la superficie terrestre. Los MDEs de alta precisión y resolución son requeridos en esos proyectos donde la información sobre la elevación de la superficie es altamente importante.

Después de someter las imágenes obtenidas con dron al proceso realizado en PhotoScan, la exportación de un MDE (Figura 31) podrá ser posible solo siguiendo los pasos descritos en el Anexo 3 Guía básica “Proceso de imágenes en Agisoft PhotoScan”.

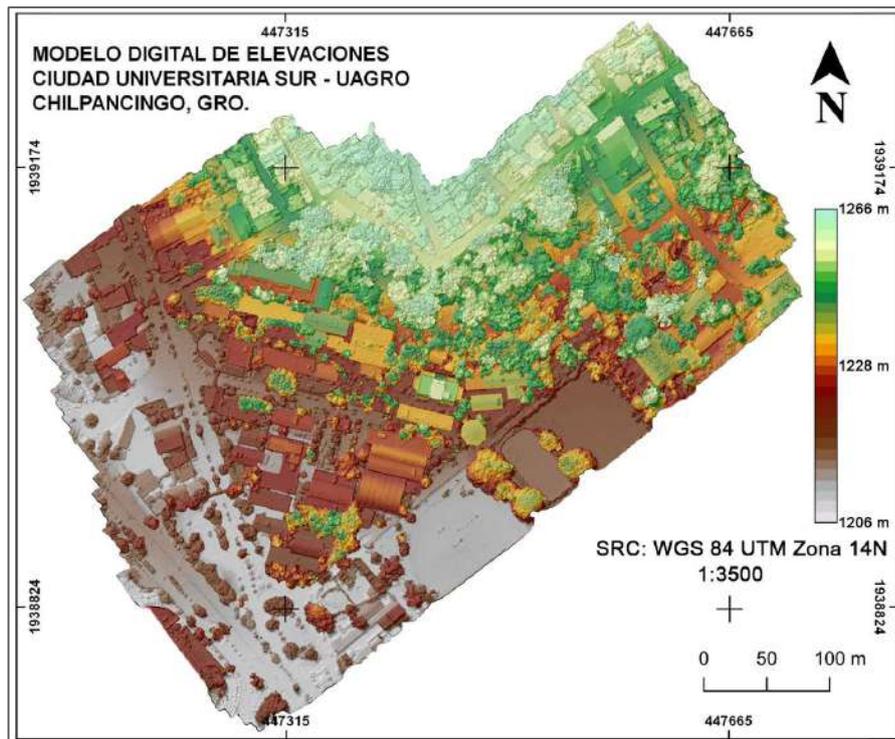


Figura 31. MDE generada y exportada de Agisoft PhotoScan.

Este modelo está referenciado al SRC WGS 84 UTM zone 14N como todas las imágenes utilizadas para el proceso.

2.4. Levantamientos

2.4.1. Levantamiento topográfico

El levantamiento altimétrico realizado en este trabajo se hizo con el método directo, por nivelación diferencial. Para el levantamiento planimétrico se miden los mismos puntos con un receptor GPS/RTK

La Figura 32 presenta el área de muestra levantada con una superficie de 4m x 10m con puntos marcados a cada 0.50 m que fueron medidos con nivel fijo para obtener lo que en este trabajo se considera la Verdad Terreno (VT_z), de este levantamiento se obtuvieron 189 puntos de los cuales dos de ellos fueron tomados como Bancos de Nivel (BN) con altura obtenida con el equipo GPS/RTK, con el cual también se realizó la toma de datos planimétricos (GPS_{xy}).



Figura 32. Levantamiento altimétrico en la zona de prueba dentro del área de estudio.

En la Figura 33 se muestra el orden en el que los datos fueron levantados para que al final de los levantamientos la comparación se realizara de manera ordenada, ejemplo: Pto 01 de nivelación comparado con Pto 01 obtenido del levantamiento con dron.



Figura 33 Orden y dirección de levantamiento topográfico.

Después de efectuar los levantamientos se realizó un análisis de los puntos levantados para eliminar aquellos que pudieran tener algún conflicto en el análisis estadístico, esto es, por ejemplo eliminar aquellos puntos del levantamiento con GPS/RTK que no obtuvieron la precisión necesaria por falta de señal con la base, eliminar aquellos puntos levantados con el drone que se encontraban sobre algunos elementos de más alta elevación como árboles, escalones existentes alrededor del área muestra, llegando así, después de la selección a un total de 147 puntos aptos para la evaluación.

2.4.2. Toma de datos altimétricos y planimétricos de drone

En esta etapa, después de haber procesado las imágenes aéreas obtenidas con el drone y haber generado la ortofoto y el MDE, lo siguiente fue extraer los datos tridimensionales de dichos modelos para poder comparar estadísticamente los datos obtenidos de ambos levantamientos.

Con el software QGIS se extrajeron los valores de elevación del MDE ($DRONE_z$) de los puntos medidos de acuerdo con las coordenadas X y Y del levantamiento GPS/RTK. Se substituyeron las coordenadas en Z y se creó un archivo vectorial con el que se comparó con el levantamiento VT_z . De manera independiente los datos X y Y del GPS (GPS_{xy}) se analizaron con los datos X y Y extraídos de la ortofoto generada con el drone ($DRONE_{xy}$).

Tanto datos de VT_z y GPS_{xy} se sometieron a una comparación contra $DRONE_z$ y $DRONE_{xy}$ respectivamente y de manera i) visual de los modelos espaciales en QGIS y ii) estadística aplicando el Coeficiente de correlación lineal de Pearson, promedio, desviación estándar, y la creación de diagramas de dispersión e histogramas.

2.5. Análisis.

El análisis cuantitativo se realizó a través del programa Dinámica EGO donde se construyó un modelo de proceso de diferencia (Figura 34) con el cual se crea un Mapa de diferencias (Md) en elevaciones entre datos de MDE generado con el levantamiento VT_z y datos $DRONE_z$, además de calcular histogramas y mapas de atributos.

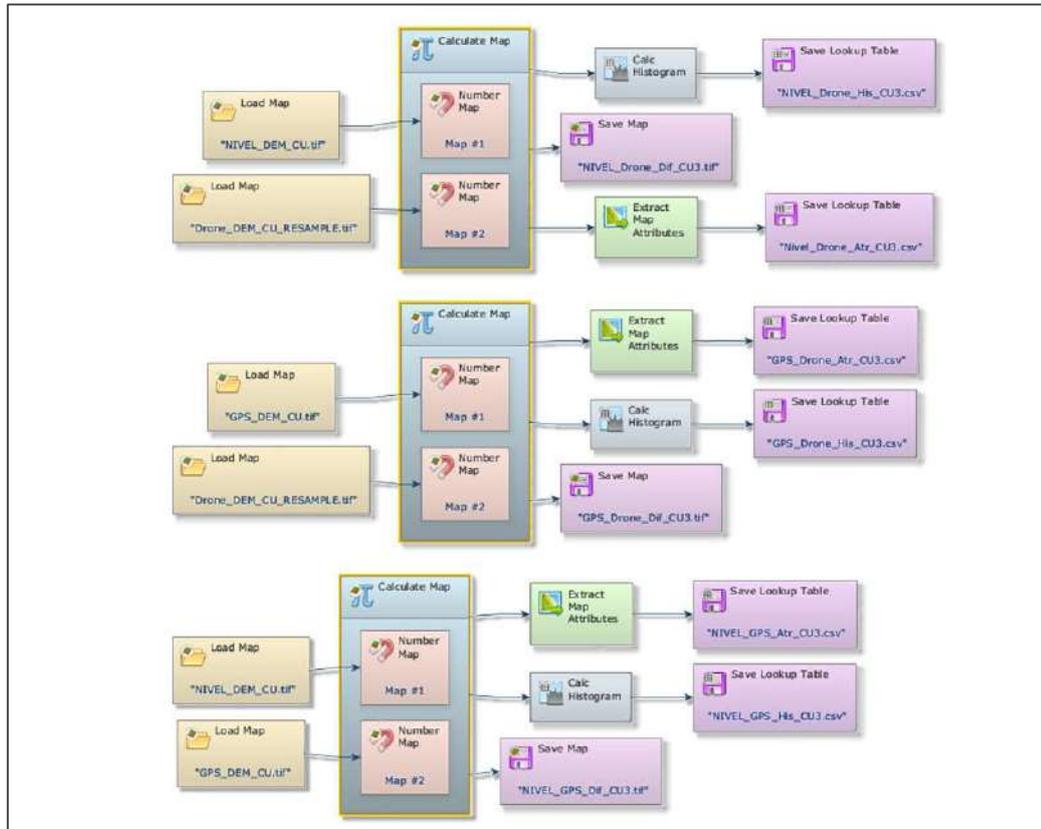


Figura 34. Modelo creado en Dinámica EGO para proceso de diferencias.

Con el programa QGIS se obtienen los perfiles de dichos MDEs para tener otra perspectiva de las elevaciones; se creó un perfil para cada tipo de levantamiento que parte del banco de nivel BN-01 al BN-02.

2.5.1. Análisis visual.

Para el análisis visual de los datos en Z los MDE de los levantamientos VT_z y DRONE_z se analizaron de manera visual en QGIS buscando las diferencias que ocurren entre ellos, aplicándoles una misma rampa de colores que muestran las diferencias de elevación de un área específica de ambos; con el Md se observó que sucede con las diferencias de elevaciones entre un modelo y otro, dicho Md en archivo ráster tiene por elevaciones en cada pixel la distancia de diferencia entre el pixel de VT_z y el pixel en la misma ubicación de DRONE_z. La Figura 35 muestra de manera previa los MDEs antes mencionados.

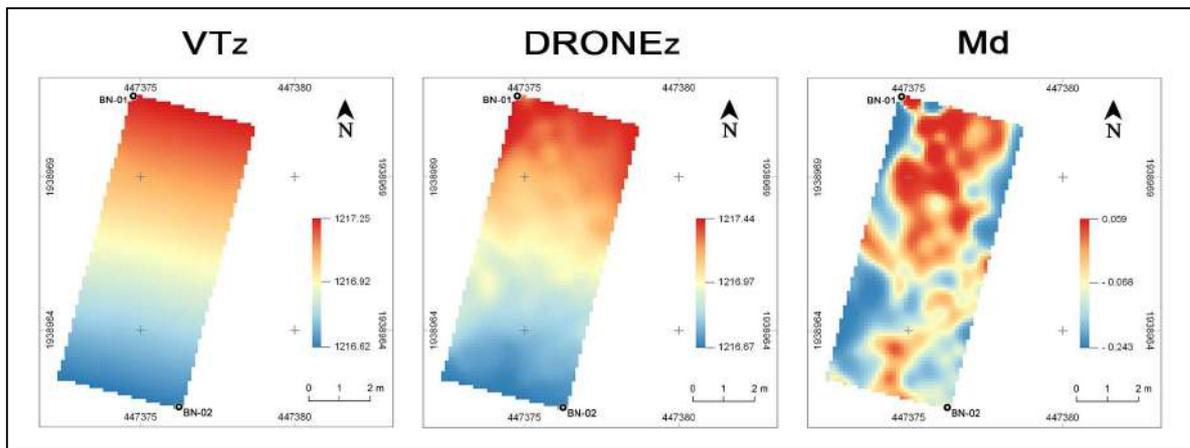


Figura 35. Vista previa de los MDEs VTz, DRONEz, Md.

Además, se extraerán perfiles de la muestra partiendo de BN-01 al BN-02 para, de otra perspectiva, observar que sucede con las elevaciones de la muestra en esa línea.

Con este análisis podremos saber de manera inmediata si el MDE DRONEz es idéntico a la verdad terreno VTz, o si presenta alguna diferencia notable.

En el caso sur del análisis visual para los datos X y Y se muestran las ventajas y desventajas entre la ortofoto generada con el dron y una ortofoto de la Ciudad de Chilpancingo del 2006 realizada con Fotogrametría convencional. Este análisis se realiza de esta manera ya que no se tiene otra forma para comparar visualmente la ortofoto generada con el dron. La Figura 36 muestra de manera previa dichas imágenes que serán examinadas más a fondo en las discusiones de este trabajo.

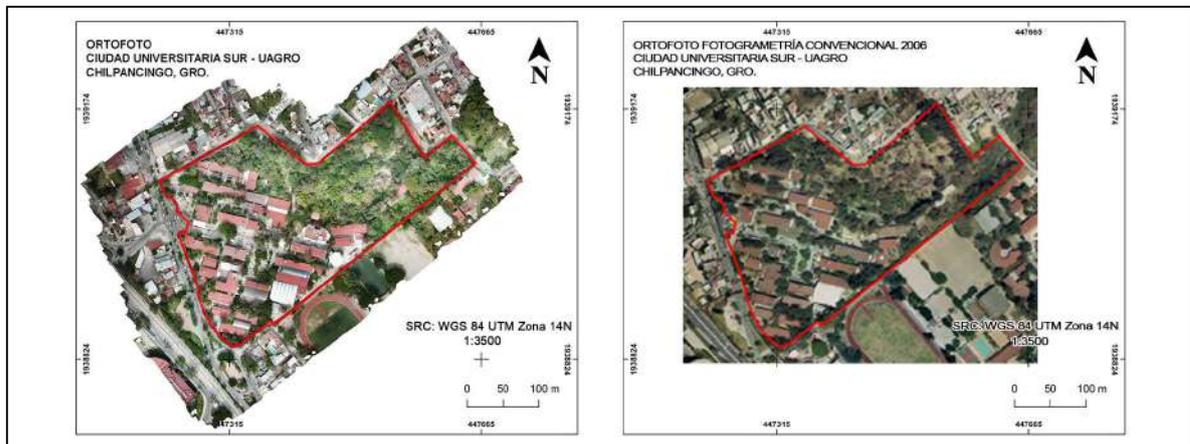


Figura 36. Ortofoto generada con el dron (Izq) y ortofoto del 2006 generada con fotogrametría convencional (Der).

2.5.2. Análisis estadístico.

2.5.2.1. Coeficiente de correlación lineal de Pearson

Para este trabajo de investigación se seleccionó este método estadístico dadas las condiciones que requiere el coeficiente de correlación de dos variables, que en primera instancia cuantifica como de relacionadas están dos variables, mide únicamente

la relación entre ambas variables sin considerar dependencias; a nivel experimental, la correlación se suele emplear cuando ninguna de las variables se ha controlado, simplemente se han medido ambas y se desea saber si están relacionadas. Para este caso de estudio se sometió a los levantamientos como se muestra en la Tabla 10 para saber la correlación.

Para el caso del análisis de los datos de VT_z vs $DRONE_z$, se agregan los datos de elevación GPS_z solo como una referencia ya que por la precisión del equipo utilizado pudiera asemejarse a la VT_z y es una manera de saber que ambos levantamientos se realizaron adecuadamente. Esto solo se realizó para ilustración de la diferencia entre un modelo y otro y no debe tomarse en cuenta para el análisis VT_z vs $DRONE_z$.

Tabla 10. Orden de variables para análisis VT_z vs $DRONE_z$.

X	Y
VT_z	GPS_z
VT_z	$DRONE_z$
GPS_z	$DRONE_z$

Para los datos X y Y se aplicó directamente el análisis GPS_{XY} vs. $DRONE_{XY}$ dado que el levantamiento topográfico de niveles no se obtienen datos bidimensionales.

Después de haber aplicado el coeficiente de relación a los levantamientos, para exponer los resultados de manera gráfica, se realizaron diagramas de dispersión para cada correlación.

2.5.2.2. Histograma, Desviación Estándar, Promedio.

Los métodos estadísticos mencionados se aplicaron a los datos de elevación de los pixeles del Md, ya que estos mostraron la diferencia entre los MDEs generados de la VT_z y $DRONE_z$ y revelaron de otra manera que tan relacionados están los datos de los pixeles de un modelo y otro.

De la misma manera los métodos estadísticos se aplicaron al análisis planimétrico, tomando la información bidimensional de cada pixel en el caso de GPS_{XY} vs $DRONE_{XY}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de proyecto

Siguiendo con la implementación de la propuesta de metodología y sometiendo las imágenes obtenidas con el drone al proceso con el programa fotogramétrico PhotoScan considerando los PCT para su georreferenciación, se obtuvo lo siguiente:

- i) Una imagen georreferenciada (ortofoto), (Figura 37) con un tamaño de 21624 x 19840 pixeles, una resolución espacial de 2.8 cm/pix, en cuanto a la resolución espectral, se cubrió el rango visible del espectro electromagnético con una imagen multispectral de 3 bandas (RGB = R 0.620 – 0.7 μm , G 0.500 – 0.578 μm , B 0.446 – 0.500 μm), y error medio cuadrático (Root Mean Square Error, RMSE) en X de 1.59 cm y en Y de 2.40 cm como muestra la tabla 11.

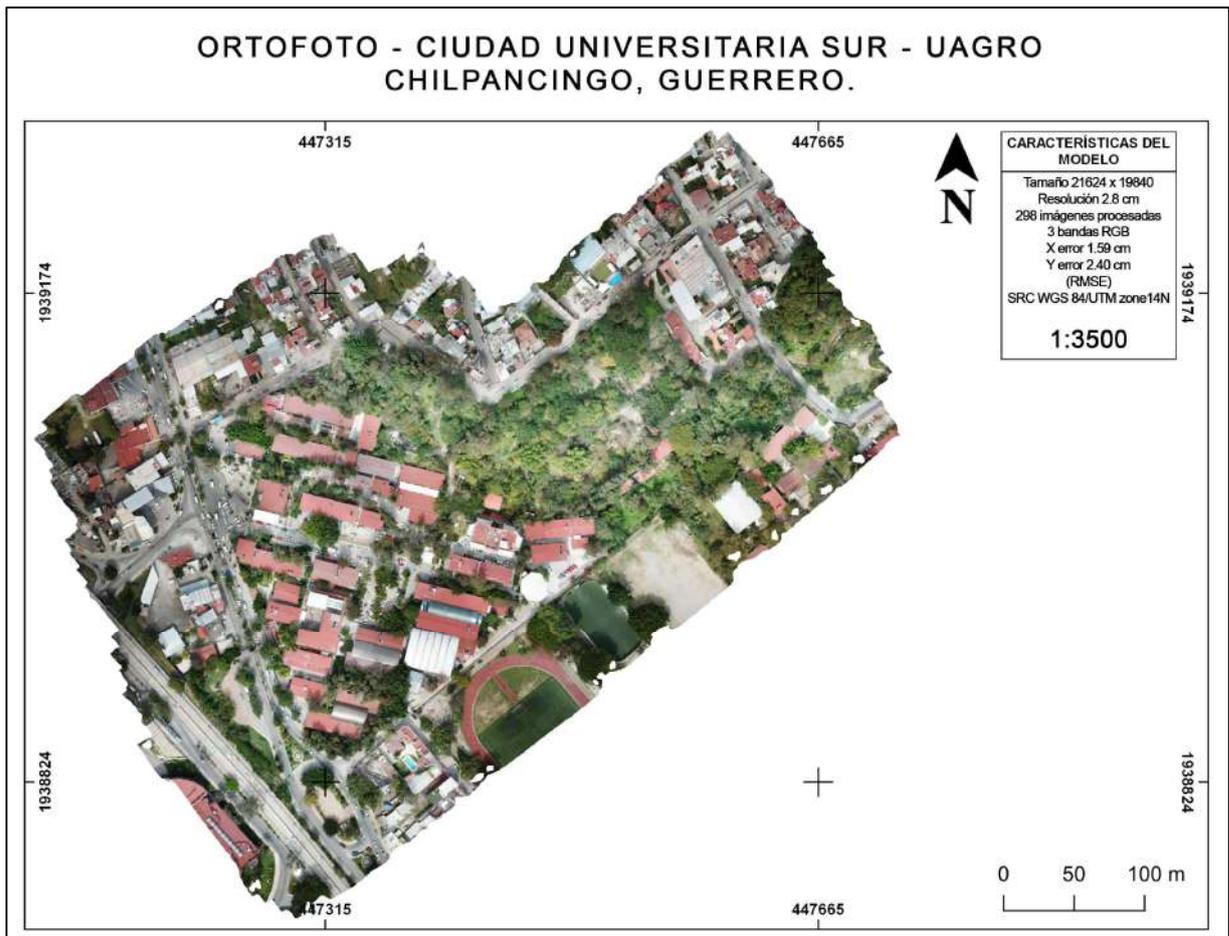


Figura 37. Ortofoto generada a partir de imágenes obtenidas con drones no-fotogramétricos.

Este producto se obtuvo con 298 imágenes procesadas que cubren un área aproximada de 7 ha, en un tiempo aproximado de 3 hrs. de proceso digital y 8 hrs de

planeación, señalización y levantamiento de los PCTs. Usando el equipo antes mencionado.

Este modelo espacial puede ser utilizado en cualquier estudio que requiera cartografía de datos recientes y datos multispectrales, ya que este es uno de los beneficios que brinda el proyecto fotogramétrico con drones. Es especialmente adecuado para la representación cartográfica de zonas urbanas como mapas base para planeación y desarrollo urbano, cartografía de la propiedad (Catastro) y para la representación de los aspectos geográficos en la ordenación del territorio (Rystedt, 2014). Además, puede ser utilizado en estudios en los que se apliquen técnicas de Percepción Remota por las bandas del espectro electromagnético visible obtenidas en la ortofoto.

Este es un producto de bajo costo y generado en menos tiempo a diferencia que si se generara con Fotogrametría convencional; y como lo describe Biasion, (2003), es eficiente para representar la forma correcta de cualquier modelo 3D, en su forma fotográfica, mediante su proyección ortogonal sobre un plano predefinido.

- ii) Un MDE (Figura 38) con un tamaño de 6550 x 5934 pixeles, una resolución espacial de 11.4 cm/pix, y un RMSE en Z de 1.36 cm, como muestra la tabla 11.

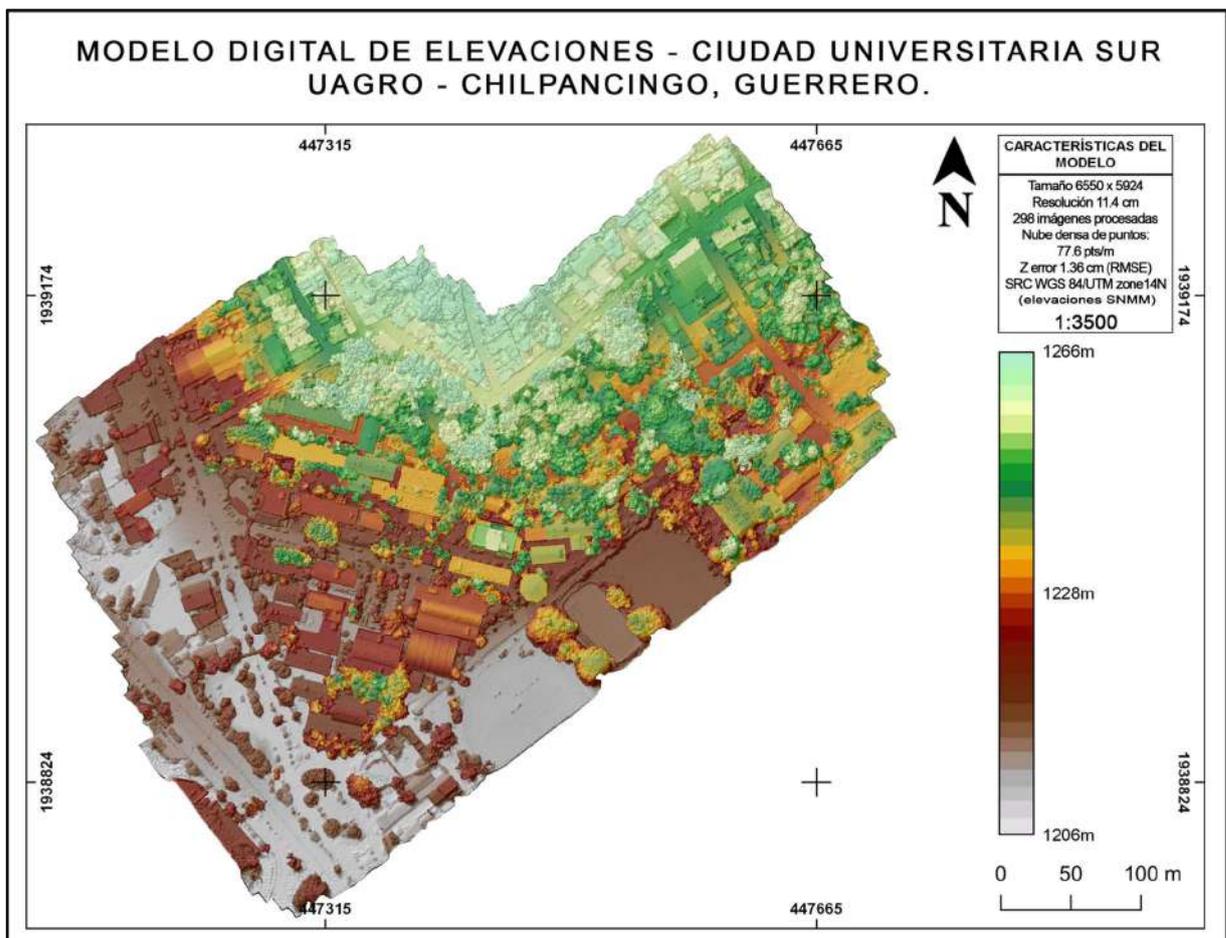


Figura 38. MDE generado a partir de imágenes

El MDE obtenido es de bajo costo, generado en menos tiempo, es de alta resolución y con una densidad de 77.6 puntos/m² obteniendo más información de elevaciones que un levantamiento topográfico típico.

El MDE siendo una representación en 3D del terreno junto con otros objetos y estructuras naturales y hechas por el hombre, pueden ser utilizados en trabajos como planeamiento urbano, modelado y simulación de inundaciones, nivelación en obras de construcción entre otros, donde la información de la elevación es de suma importancia (Bhandari et al, 2015).

Tabla 11. Resultados de los errores y RMSE para X,Y,y Z.

PCT	X	Y	Z		X	Y	Z
500	447480.263	1938975.6	1221.0564		-0.01573	0.00940	-0.00368
501	447441.587	1938928.6	1215.2653		-0.00154	0.00340	-0.00519
502	447385.52	1938881.67	1213.8661		-0.01666	0.02600	-0.01239
504	447329.509	1938804.16	1211.851		0.00928	-0.00255	-0.01882
505	447251.691	1938887.79	1211.8262		-0.01426	0.00506	0.02125
507	447360.065	1939155.48	1242.2548		0.00830	0.02868	-0.00144
508	447435.483	1939112.87	1243.7781		0.00639	-0.00605	0.00880
509	447586.221	1939220.36	1237.2979		0.02185	0.03774	-0.00162
510	447642.356	1939125.49	1226.3414		-0.03766	-0.00768	-0.00372
511	447260.449	1939044.72	1218.6526		0.02184	0.02201	-0.03092
512	447333.92	1939071.82	1226.5077		0.00320	-0.02152	-0.00069
514	447386.444	1938976.64	1217.4197		-0.00505	-0.02917	0.01615
516	447334.172	1938989.56	1217.0061		0.00857	-0.05528	0.01431
778	447415.348	1938982.89	1229.2432		0.01268	-0.00971	0.00915
RMSE					0.01597	0.02455	0.01363

Los errores mostrados en tabla 11 muestran las coordenadas de los PCTs usados para la georreferenciación del modelo; levantados por el receptor GPS/RTK, y la diferencia con las coordenadas estimadas del modelo reconstruido. El RMSE para ser un resultado aceptable debe mostrar un valor bajo, no-negativo, mientras más cerca de cero se encuentre el valor resultante indicará un ajuste aceptable a los datos; los mostrados en la tabla para X y Y se mantienen <3 cm siendo favorables para el estudio; mientras que para Z muestra un RMSE de 1.3 cm, un valor muy aceptable dado que el error vertical usualmente es el más alto en este tipo de procesos.

Con los productos obtenidos se cumplen los objetivos de generar la ortofoto y el MDE, ambos de alta resolución espacial y temporal, además aportan en la reducción de recursos como el tiempo de planeación y ejecución de proyectos que requieran datos como los expuestos anteriormente.

3.2. Discusión

En el análisis realizado a los modelos espaciales VT_z vs DRONE_z, se observa que ambos modelos tienden a una correlación, pero cuando se revisan los datos de los pixeles

y se analiza a detalle el modelo DRONE_Z, este, muestra algunas diferencias grandes en elevación, específicamente alrededor del BN-01.

Como se expone a continuación, se muestran los MDEs de la VT_Z y DRONE_Z haciendo una comparación visual entre los dos con el apoyo, además, de un perfil por modelo que parte del banco de nivel BN-01 hacia el banco de nivel BN-02.

La comparación entre ventajas y desventajas entre ortofoto generada con el drone, datos DRONE_{XY}, y ortofoto 2006, se presenta inmediatamente después.

3.2.1. Análisis Visual

En el MDE de la VT_Z de la muestra tomada del área de estudio (Figura 39), como es de esperar, siendo el MDE de un área controlada, una plancha de concreto para ser más específico y con una diferencia en elevación de 0.59 m entre banco de nivel, no tiene cambios súbitos de elevación, ni presenta detalles que puedan crear cambios como protuberancias o accidentes pequeños, esto se puede observar también en el perfil de la Figura 40, que va de banco de nivel BN-01 a BN-02.

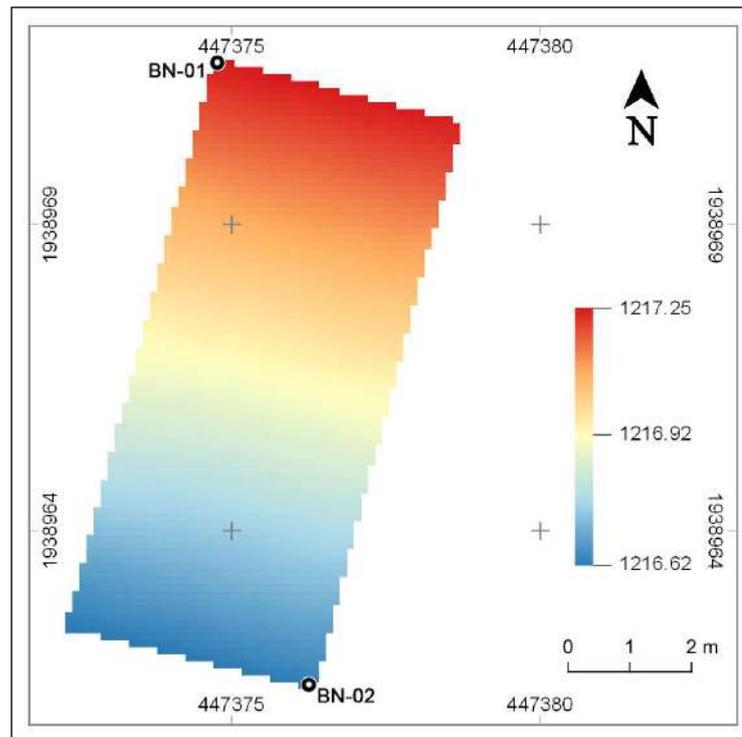


Figura 39. MDE de verdad terreno, levantamiento topográfico.

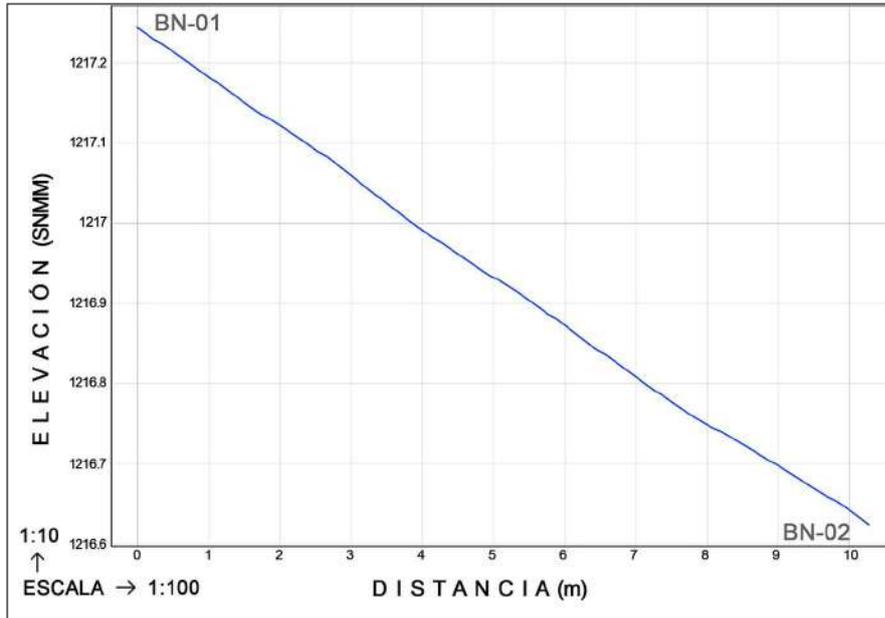


Figura 40. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del levantamiento topográfico o verdad terreno.

El segundo MDE es el modelo generado a partir de procesamiento fotogramétrico realizado a partir de las imágenes obtenidas con dron (Figura 41).

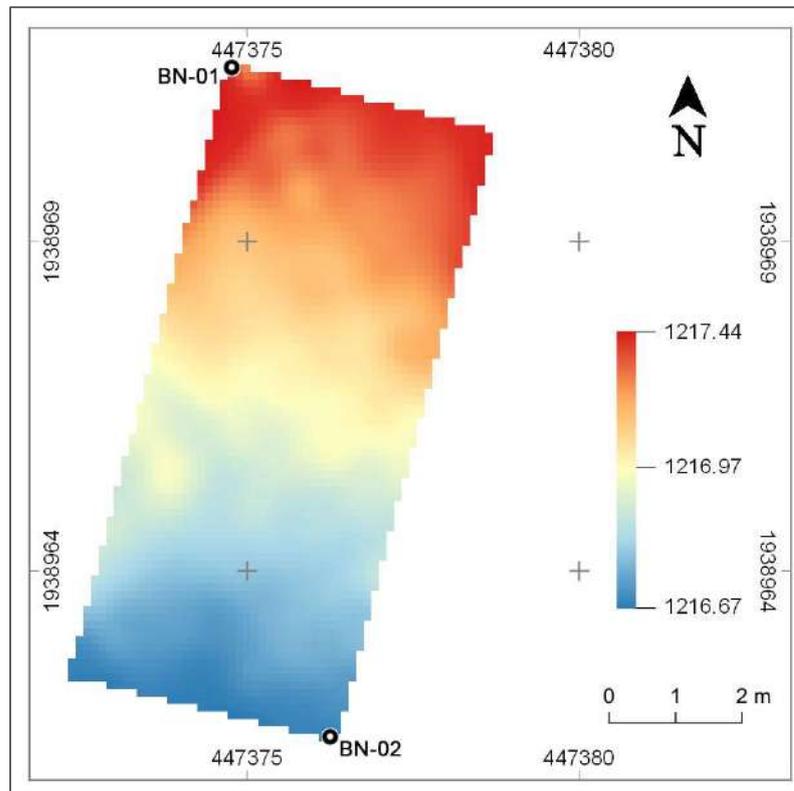


Figura 41. MDE generado del DRONEz.

En el modelo se perciben algunos cambios de nivel que no son similares a MDE de la VTz. Dentro del modelo se observan cambios súbitos de nivel y muestra algunos accidentes. Esto se puede observar en el perfil (Figura 42) y si se compara con el perfil de la VTz, aunque la inclinación es similar, los detalles dentro del perfil cambian.

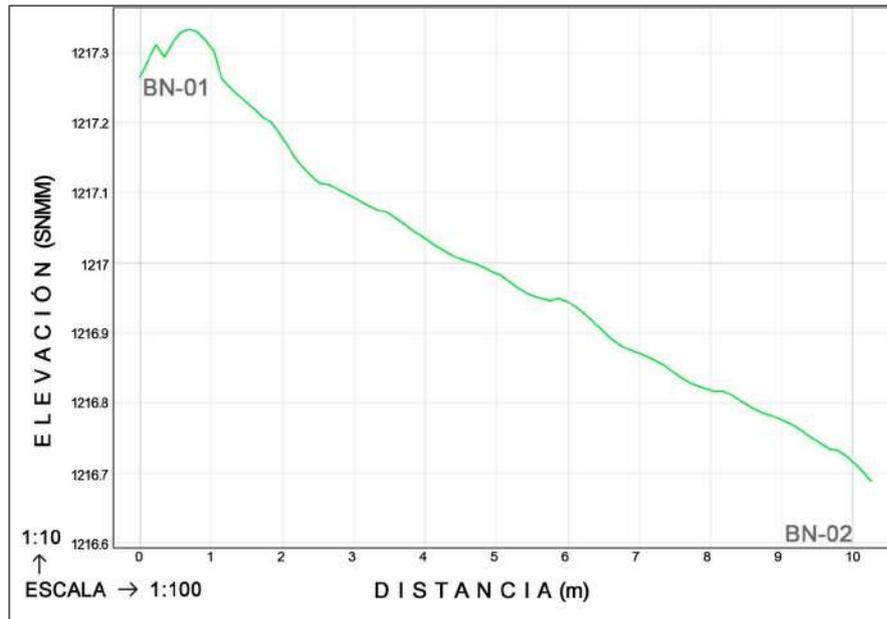


Figura 42. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del DRONEz.

Como se puede apreciar en la figura 40 alrededor del BN-01 existe un cambio drástico de nivel, además del resto de accidentes de principio a fin, que puede ser apreciado en el Md (Figura 43).

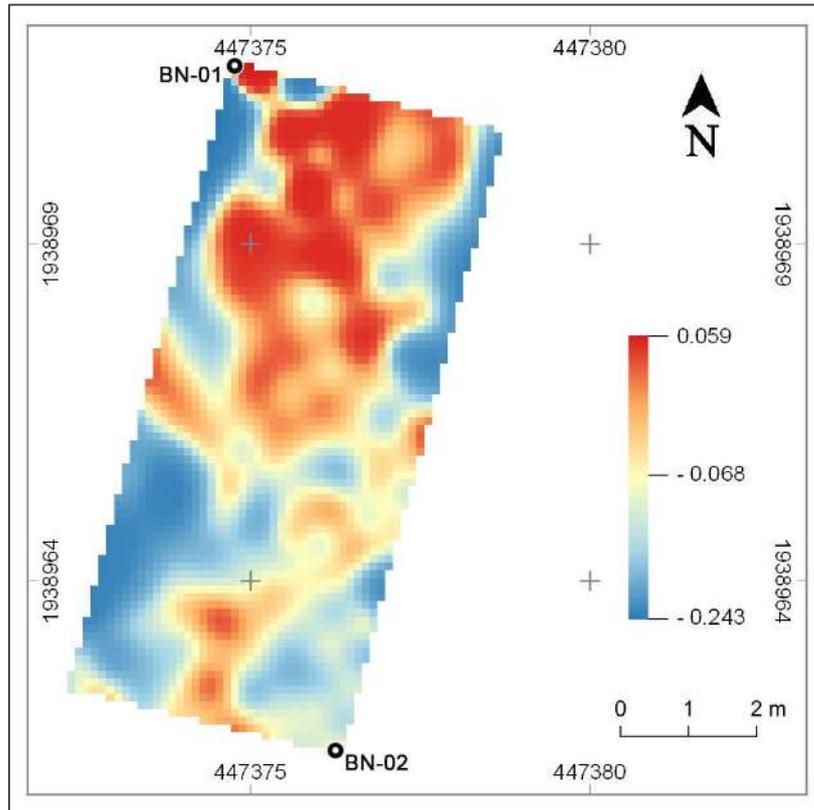


Figura 43. Mapa de diferencias MDE VT y MDE generado con Drone.

Si tomamos como base de comparación la resolución espacial de los MDE generados de 11.4 cm, se puede notar que la diferencia de elevación en las zona de color rojo es de 0.059 cm, por debajo del tamaño del pixel, a diferencia de las zonas en azul que elevan la diferencia hasta 0.242 cm, esa diferencia es la que se puede observar en el perfil (Figura 42) de la Figura 41 como un cambio súbito. La Figura 44 muestra en vista 3D lo que sucede en esa sección del modelo.

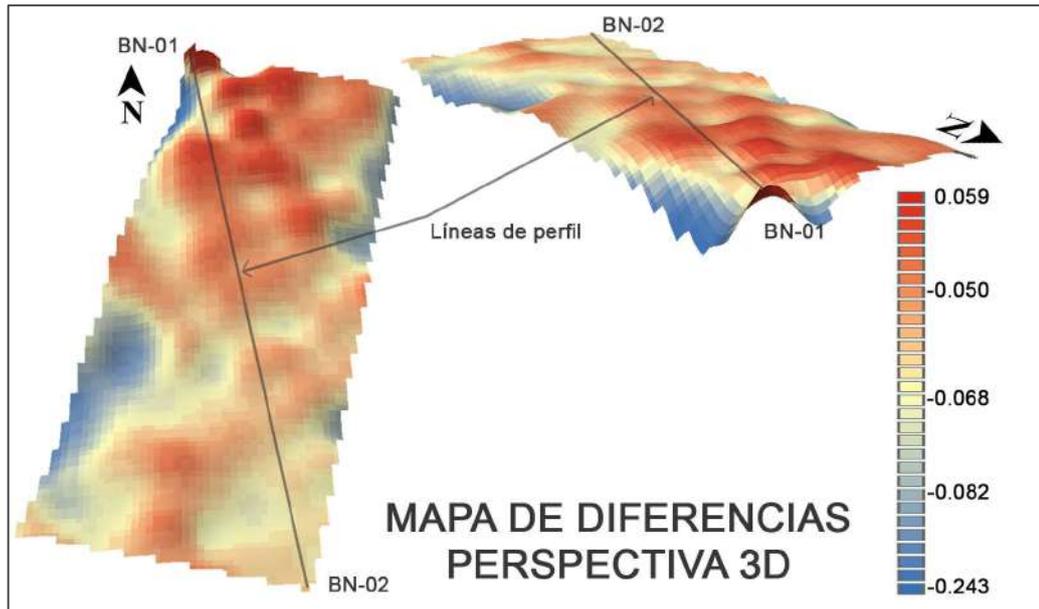


Figura 44. Mapa de diferencias en perspectiva 3D.

El perfil del Md es el siguiente.

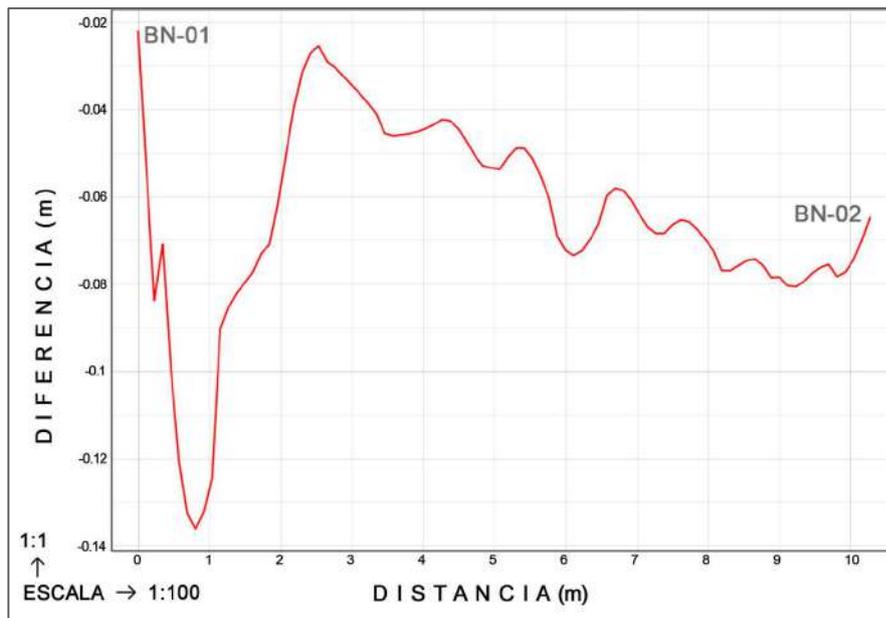


Figura 45. Perfil de banco de nivel a banco de nivel del Md.

Aunque hay un área de los modelos que muestra evidente desproporción, el resto del MDE del DRONE_Z presenta desniveles que no se acercan a la VT_Z y aun cuando solo se analizaron dos secciones del modelo, los mapas y perfiles de diferencia muestran que es la misma condición en todo el modelo. Además de lo anterior, un histograma en la sección de análisis estadístico realizado con los datos de los pixeles demuestra también que a nivel pixel existe diferencia entre los atributos de elevación de un modelo y otro.

En el caso de análisis de DRONExy (Figura 46) y una ortofoto del 2006 (Figura 47 e14v365n40) se observa que el modelo espacial generado con el drone es realmente vertical porque no muestra elementos verticales de estructuras como se observa en la ortofoto del 2006.



Figura 46. Ortofoto generada con drone, C.U. Sur, Facultad de Ingeniería, Edificio 1 (DRONExy).



Figura 47. Ortofoto 2006, C.U. Sur, Facultad de Ingeniería, Edificio 1.

Como podemos observar la ortofoto generada con drone se presenta realmente vertical a diferencia de la ortofoto del 2006 la cual se puede considerar parcialmente oblicua por que la imagen muestra un ángulo, dejando ver así los elementos verticales de las edificaciones.

3.2.2. Análisis Estadístico

3.2.2.1. Coeficiente de correlación lineal de PEARSON

Según Amat Rodrigo, (2019), la covarianza de una relación varía de +1 y -1, siendo +1 una correlación positiva perfecta y -1 una correlación negativa perfecta, y se utiliza una medida de fuerza de asociación (tamaño del efecto) donde:

- 0: asociación nula
- 0.1: asociación pequeña
- 0.3: asociación mediana
- 0.5: asociación moderada
- 0.7: asociación alta
- 0.9: asociación muy alta

Para interpretar los resultados de la aplicación del Coeficiente de correlación lineal de Pearson se muestran los siguientes diagramas de dispersión (Figura 48) que presentan la correlación entre un levantamiento y otro de acuerdo con la tabla 11 “Orden de variables”, mostrada anteriormente. La correlación de las variables de datos en Z (Tabla 12) es la siguiente:

Tabla 12. Correlación de variables de datos en Z.

	VT_Z	GPS_Z	DRONE_Z
VT_Z	1.0000	0.9980	0.9763
GPS_Z		1.0000	0.9627
DRONE_Z			1.0000

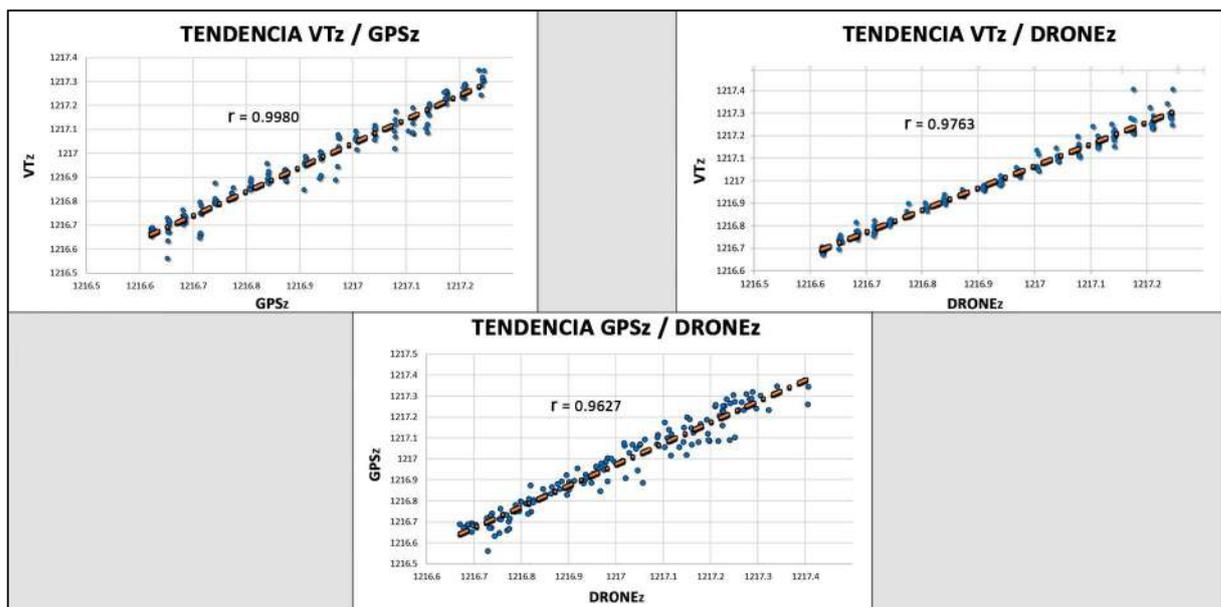


Figura 48. Diagramas de dispersión de los datos en Z.

Como se observa en los diagramas de dispersión anteriores los levantamientos de nivelación convencional, el realizado con GPS, y el generado con las imágenes obtenidas con dron tienen una tendencia a +1, independientemente de cómo sean ordenadas las

variables; VT_Z vs. GPS_Z, GPS_Z vs. DRONE_Z, o VT_Z vs. DRONE_Z. Esto quiere decir que la asociación de estos es muy alta y tienen una correlación según el Coeficiente de correlación de Pearson.

La comparación de los datos VT_Z vs. GPS_Z nos muestra que realmente el levantamiento es idéntico, de manera estadística, dado el resultado del coeficiente de correlación de 0.9980, teniendo esto como antecedente y después de realizar la comparación VT_Z vs. DRONE_Z, el resultado de 0.9763 resultó positivo para el estudio, el único resultado peculiar fue el de la comparación GPS_Z vs. DRONE_Z con el valor de 0.9627 que, aunque está dentro de la asociación muy alta de la correlación, este valor pudo haber estado en un lugar entre los dos valores anteriores dado que los PCTs fueron medidos con GPS.

Para el caso de los datos X y Y la tendencia tiene un resultado esperado ya que para estos datos el error siempre es menor que los datos de elevación. La correlación de estos datos se presenta en la Tabla 13 y en la Figura 49.

Tabla 13. Correlación de variables de datos en X (Izq) y Y (Der).

	GPS _X	DRONE _X	GPS _Y	DRONE _Y
GPS _X	1.00000	0.99997	1.00000	0.99999
DRONE _X		1.00000		1.00000

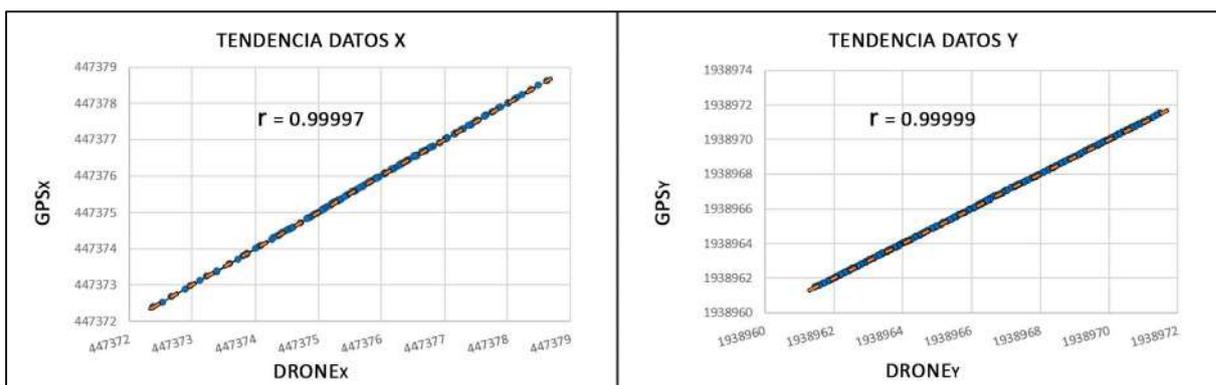


Figura 49. Diagramas de dispersión de los datos en X (Izq) y Y (Der).

Como se puede observar y de acuerdo con la fuerza de asociación arriba descrita, la correlación de los datos X y Y de los levantamientos GPS_{X,Y} y DRONE_{X,Y} es muy alta, siendo estos resultados favorables para análisis.

3.2.2.2. Histograma, Desviación Estándar, Promedio.

En el análisis del histograma los datos utilizados se extrajeron del Md y es de los pixeles ubicados en la misma posición de aquellos medidos en los levantamientos. Los resultados son los siguientes. Tomando el \bar{x} del conjunto de datos del Md y obteniendo la DesvEst se marca un umbral con los límites mínimo y máximo que permite observar que la mayoría de los datos se encuentran dentro de lo que la curva Gaussiana considera una curtosis positiva, esto es una curva pronunciada hacia arriba con colas estrechas a los extremos. La diferencia se presenta con el sesgo de la curva Gaussiana, este presenta una curva derecha con cola estrecha hacia la izquierda, esto quiere decir que

los datos presentan una conclusión negativa (Figura 50). Lo que evidencia este histograma es que los pixeles que muestran la mayor distancia en el Md son una cantidad mínima, ubicados en la cola izquierda del histograma y la mayoría de los pixeles dentro del umbral son menores a 0.10 m.

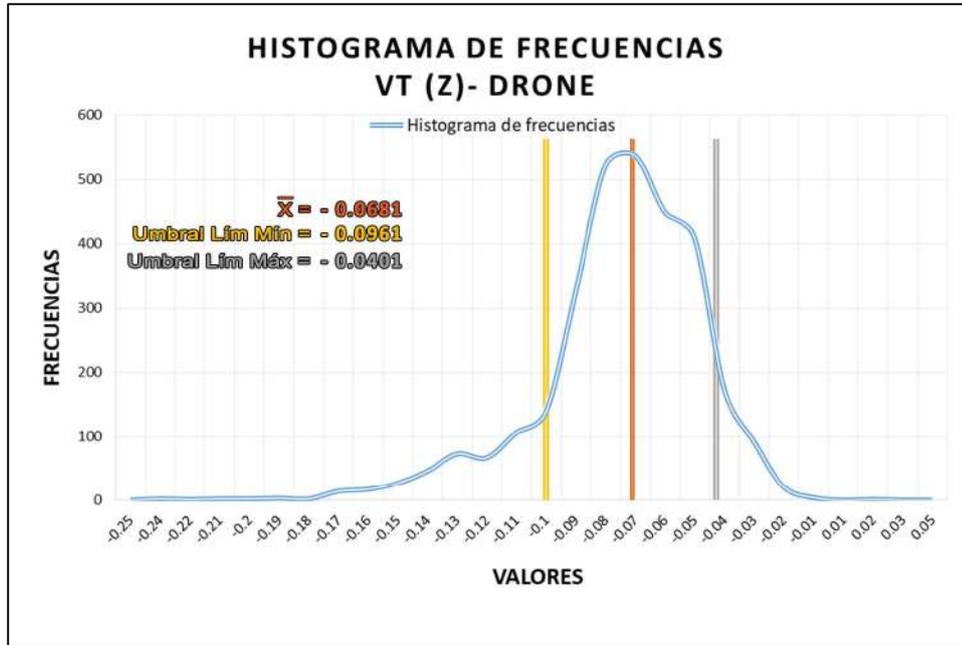


Figura 50. Histograma de frecuencias de los datos del Md.

La tendencia de ambos modelos espaciales lleva a una correlación, así como lo indica el análisis del coeficiente de correlación de Pearson. Pero al realizar un análisis a los pixeles donde se encontraban las elevaciones conocidas de ambos levantamientos los resultados de las diferencias mostraron una diferencia que se puede observar también en la DesvEst.

La DesvEst de los datos del Md (Figura 51) es mínima y esto revela un alto grado de similitud ya que la DesvEst es la distancia que los datos están alejados del \bar{x} ; solo el 3% de los pixeles en el análisis son mayores de 0.15 m como muestra el diagrama.

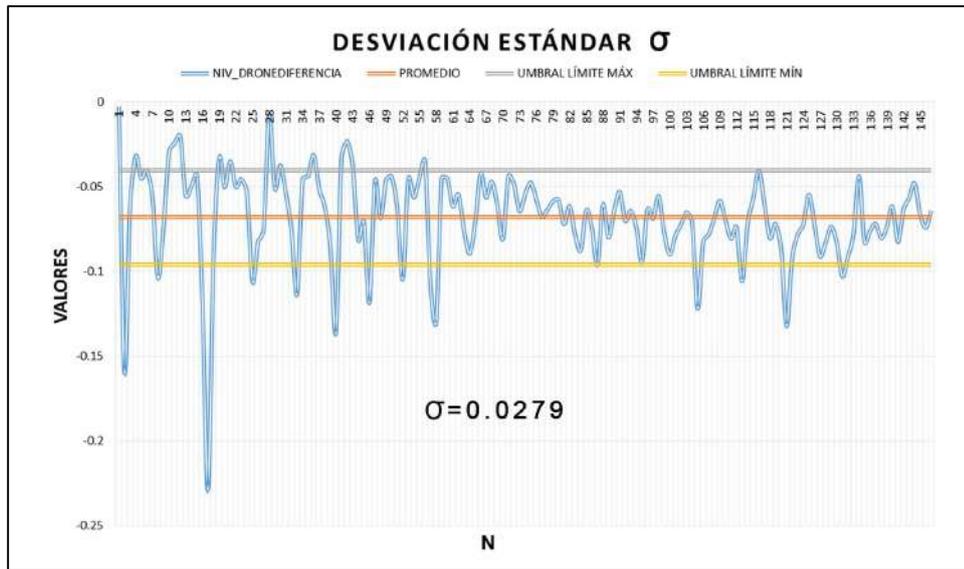


Figura 51. Desviación Estándar de la muestra del Md.

En resumen, el análisis estadístico refuerza la probabilidad de que los modelos espaciales obtenidos del procesamiento de las imágenes obtenidas con drones no-fotogramétricos pueden ser utilizados en muchos estudios geomáticos que no requieran información de alta precisión vertical.

Sin embargo, se observa un patrón espacial, los datos de nivelación con el drone siempre son mayores y esto requiere un ajuste al modelo generado con el drone ya que, como se muestra en la Figura 52, el MDE generado con el drone se presenta ligeramente por encima del MDE de la VTz.

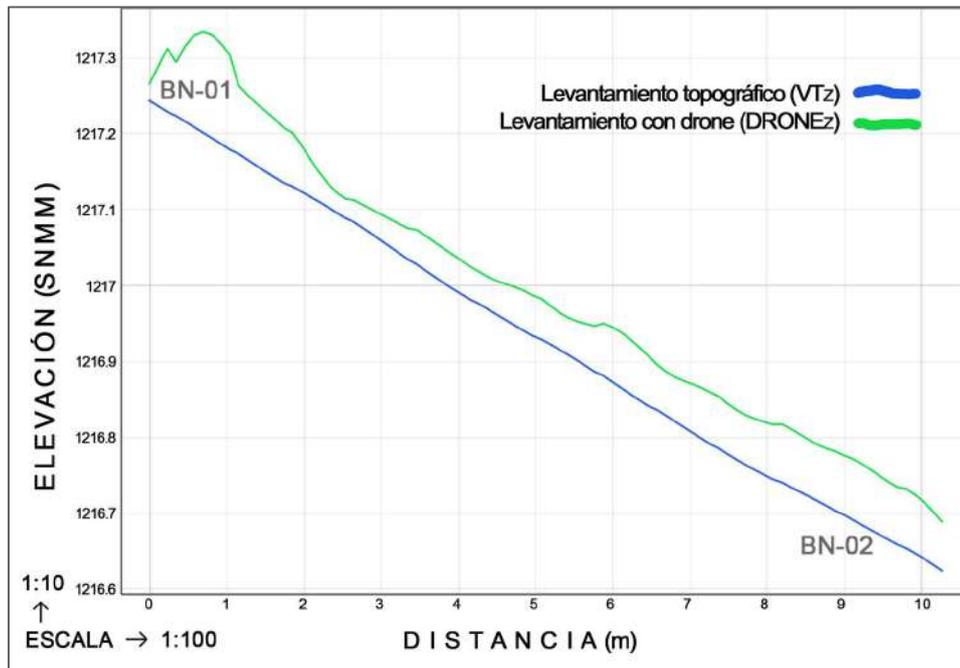


Figura 52. Perfiles de banco de nivel a banco de nivel de ambos levantamientos.

En cuanto a los datos bidimensionales X y Y, es de esperar que tiendan a ser favorables ya que es menos común que existan errores mayores que los que presentan las elevaciones. Estos resultados en el histograma demuestran una similitud muy cercana a la realidad dado que los resultados del análisis nos regresan valores milimétricos de las diferencias entre los levantamientos GPS_{XY} – DRONE_{XY} como se muestra en la Figura 53.

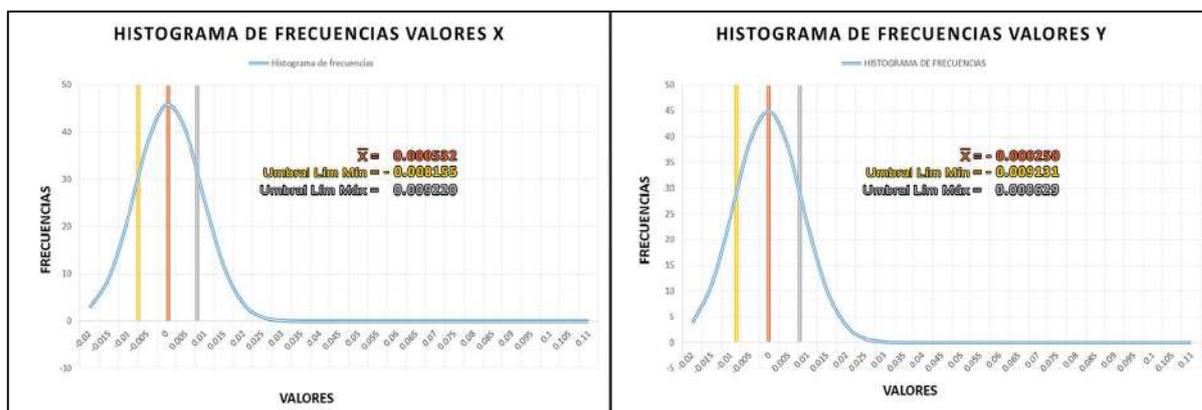


Figura 53. Histograma de las diferencias de datos X (Izq) y Y (Der) de los levantamientos GPS_{XY} – DRONE_{XY}.

Como se puede observar las curvas Gausiannas muestran el sesgo hacia la izquierda con una cola a la derecha y el pico pronunciado dando resultados positivos; dentro del umbral se observan los pixeles que pertenecen a el límite máximo, límite mínimo y la DesvEst y son la mayoría con valores que tienden a cero.

Lo anterior es comprobado por los diagramas (Figura 54) que presentan la DesvEst con resultados con tendencia positiva, para los valores en X la DesvEst es de 0.008687, para los valores en Y la DesvEst es de 0.008880.

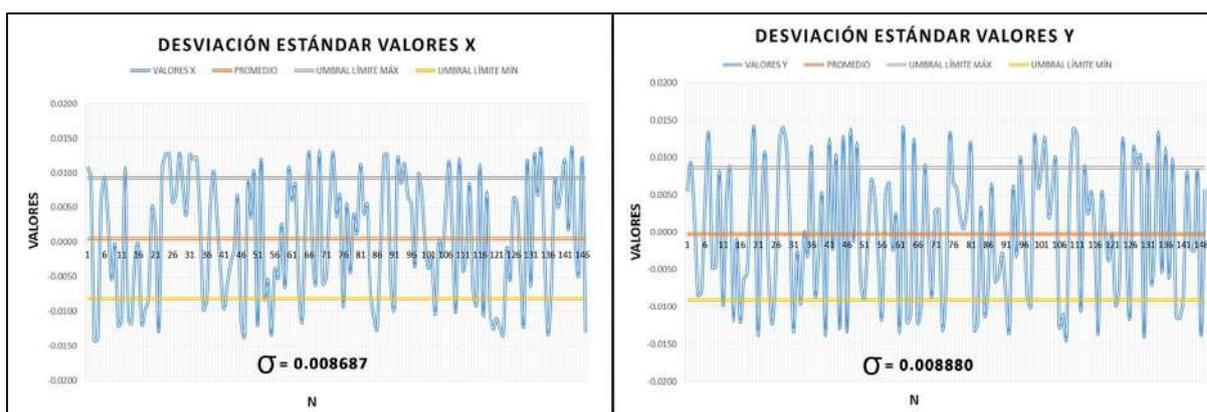


Figura 54. Desviación Estándar de las diferencias de los datos X (Izq) y Y (Der) de los levantamientos GPS_{XY} - DRONE_{XY}

Como se expuso anteriormente la DesvEst para que el análisis sea favorable debe ser lo más pequeño posible ya que es la distancia que un dato está alejado del \bar{x} . La mayoría de los pixeles dentro del umbral comprueba la similitud que existe entre los levantamientos GPS_{XY} y DRONE_{XY}.

4. CONCLUSIONES

1. La aplicación de la propuesta metodológica descrita ha demostrado que es posible generar ortofotos de alta resolución y MDE de relativa resolución con el uso de Drones No-fotogramétricos, reduciendo costos y tiempo.
2. Esta metodología puede aplicarse con equipo similar obteniendo resultados similares, sin embargo, como pudo comprobarse, las precisiones en la dimensión horizontal son del orden de los 2.5 cm y por tanto pueden aplicarse para estudios que requieran representación cartográfica de zonas urbanas como mapas base para planeación y desarrollo urbano, cartografía de la propiedad (Catastro) y para la representación de los aspectos geográficos en la ordenación del territorio, Además, puede ser utilizado en estudios en los que se apliquen técnicas de Percepción Remota por las bandas del espectro electromagnético visible obtenidas en la ortofoto. Por otro lado, se observó que la precisión vertical, de 1.5 cm y por tanto su uso debe ser con discreción dados los resultados del análisis, pero puede ser aplicado sin problema en trabajos como planeamiento urbano, modelado y simulación de inundaciones, nivelación en obras de construcción entre otros, donde la información de la elevación es de suma importancia.
3. Los hallazgos en cuanto a patrones espaciales y la DesvEst nos orientan a una línea de investigación pendiente a desarrollar, y esto es determinar si es posible diseñar una metodología para aplicar ajustes a los modelos espaciales generados para reducir los errores y las diferencias encontradas en este trabajo de investigación.
4. Para este trabajo de investigación se seleccionó este método estadístico (Coeficiente de correlación de Pearson) dadas las condiciones que requiere el coeficiente de correlación de dos variables, que en primera instancia cuantifica como de relacionadas están dos variables, mide únicamente la relación entre ambas variables sin considerar dependencias; a nivel experimental, la correlación se suele emplear cuando ninguna de las variables se ha controlado, simplemente se han medido ambas y se desea saber si están relacionadas.
5. Es posible con esta metodología + NIR (sensor) obtener imágenes multiespectrales y estar en posibilidad de aplicar técnicas de Percepción Remota en estudios Geomáticos.
6. Los beneficios de los productos obtenidos de los drones No-fotogramétricos como el utilizado en este trabajo de investigación son: la reducción de costos en cuanto al tiempo, comparado a realizar levantamientos topográficos y como un método alternativo, además que reducen los riesgos para el personal en campo evitando áreas de difícil acceso, y el alto costo de equipo especializado de más alto nivel.

Bibliografía

- Agisoft PhotoScan. (03 de 12 de 2018). <http://www.agisoft.com/>. Obtenido de http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., Sánchez-Hermosilla López, J., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (Febrero de 2018). Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry. *Measurement*, 1-37.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.062>
- Amat Rodrigo, J. (Septiembre de 2019). *Correlación lineal y Regresión lineal simple*. Obtenido de https://github.com/JoaquinAmatRodrigo/Estadistica-con-R/blob/master/PDF_format/24_Correlaci%C3%B3n_y_Regresi%C3%B3n_lineal.pdf.
- Arjomandi, A., Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., & Zhou, T. (2006). "Classification of unmanned aerial vehicles" Report for Mechanical Engineering class. *Report for Mechanical Engineering class*, 48.
- Barber, M. (2011). 'Quik! The Kodak!' Victorian and Edwardian aeronauts and aerial photographers (Draft). En M. Barber, *A History of Aerial Photography: Mata Hari's Glass Eye and Other Stories* (págs. 53-82). English Heritage: Swindon.
- Bhandari, B., Oli, U., Pudasaini, U., & Panta, N. (2015). Generation of high resolution DSM using UAV images. *Wisdom of Ages to the Challenges of the Modern World*, 17-21.
- Biasion, A., Dequal, S., & Lingua, A. (2003). A new procedure for the automatic production of true orthophotos. *International archives of photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, 538-543.
- Borjas Astorga, J., & López Ramos, J. (2015). Aplicaciones en la seguridad al control de fronteras. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería* (págs. 171-174). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Cambell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (Fifth ed.). New York: The Guilford Press.
- Campo Molinuevo, Í. (2015). Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones en la ingeniería civil* (págs. 149-160). Madrid: Gáficas Arias Montano.
- Caroti, G., Piemonte, A., & Nespoli, R. (2017). UAV-Borne photogrammetry: A low cost 3D surveying methodology for cartographic update. *MATEC Web of conferences*, 01-10.
- Centro de Sensoriamento Remoto / Universidade Federal de Minas Gerais. (05 de junio de 2020). <https://csr.ufmg.br/dinamica/team/>. Recuperado el 05 de junio de 2020, de <https://csr.ufmg.br/dinamica/>: <https://csr.ufmg.br/dinamica/about-dinamica-ego/>
- Checa Alonso, M. J., Escudero Barbero, M. d., Lario Leza, F. J., & Porcel Prado, P. (2015). Aplicación al seguimiento fitosanitario de masas forestales. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 119-128). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Del Río-Santana, O., Espinoza-Fraire, T., Sáenz-Esqueda, A., & Córtes-Martínez, F. (2019). Levantamientos topográficos con drones. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Laredo*, 15-19.
- Díaz Marcos, J. J. (2015). Aplicaciones de rescate. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 199-209). Madrid: Gráficas Arias Montano.

- Dirección General de Aeronáutica Civil, SCT, México. (25 de Julio de 2017). Circular Obligatoria. *Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio mexicano*. México.
- DJI. (Noviembre de 2018). *www.dji.com*. Obtenido de <https://www.dji.com/es/mavic/specs>
- Domínguez, J. A. (2015). Aplicaciones en la gestión del patrimonio y herencia cultural. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 161-170). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Dubbini, M., Curzio, L. I., & Campedelli, A. (2016). Digital elevation models from unmanned aerial vehicle surveys for archaeological interpretation of terrain anomalies: case study of the Roman castrum of Burnum (Croatia). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 121-134.
- El Meouche, R., Hijazi, I., Poncet, P., Abunemeh, M., & Rezoug, M. (2016). UAV Photogrammetry implementation to enhance land surveying, comparisons and possibilities. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 107-114.
- Ezcurra Talegón, A., & Díaz De Apodaca, L. (2015). Aplicaciones al control de calidad del aire. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 59-65). Madrid, España: Gráficas Arias Montano.
- García Márquez, F. (1981). *Curso Básico de Topografía - Planimetría Agrimensura Altimetría*. México, D.F.: Editorial Concepto, S.A.
- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., & Dosso, P. (2013). UAV Photogrammetry: Block triangulation comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 157-162.
- Gomasasca, M. (2009). *Basics of Geomatics*. New York, New York, USA: Springer Science+Business Media.
- Gomasasca, M. A. (2010). Basics of Geomatics. *Appl Geomat*, 137-146.
- Goodchild, M., Haining, R., & Wise, S. (1992). Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(5), 407-423.
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 99-131.
- INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (23 de Diciembre de 2010). Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional. *Diario Oficial de la Federación*. México.
- Jauregui, L. (2008). *Introducción a la Fotogrametría*. Mérida, Venezuela.
- Khan, M. A., Ectors, W., Bellemans, T., Janssens, D., & Wets, G. (2017). UAV-Based traffic analysis: A universal guiding framework based on literature survey. *Transportation Research Procedia*, 541-550.
- Konecny, G. (2003). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*. New York, New York, USA: Taylor & Francis, Inc.
- Laguna, C. (Febrero de 2011). *Correlación y Regresión Lineal*. Recuperado el 23 de Junio de 2019, de <http://www.ics-aragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T04.pdf>.
- Livingston, E. H. (2004). The Mean and Standard Deviation: What does it all mean? *Journal of Surgical Research*, 117-123.
- López Jimeno, C., & Martín Sánchez, D. A. (2015). Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 77-93). Madrid: Gráficas Arias Montano.

- Mancebo Quintana, S., Ortega Pérez, E., Valentín Criado, A. C., Martín Ramos, B., & Martín Fernández, L. (2008). *LibroSIG: Aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental*. Madrid, España: los autores.
- Maps Made Easy. (Noviembre de 2018). <https://www.mapsmadeeasy.com/>. Obtenido de <https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/categories/200739936-Map-Pilot-for-DJI>
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.-J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F.-J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1-10.
- Mazo, N. (2010). Técnicas y Métodos de Análisis Espacial. *Seminario Análisis Espacial* (pág. 32). Colombia: Universidad del Valle del Cauca.
- Melgosa Revillas, S. (2015). Aplicaciones a las auditorías energéticas con termografía aérea. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 185-190). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Mesas Carrascosa, F. J., & García-Ferrer Porras, A. (2015). Aplicaciones Urbanísticas. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 211-219). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Montesinos Aranda, S. (2015). Aplicaciones en agricultura. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 101-117). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Moreno Jimenez, A. (2006). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica: Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. D.F., México: Alfaomega Grupo Editor.
- Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., & Freville, T. (2017). Acquisition and processing protocols for UAV images:3D modeling of historical buildings using photogrammetry. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 163-170.
- Nájera-Ramos, A., Vázquez-Jiménez, R., Ramos-Bernal, R. N., Rojas-Sánchez, G., & Liborio-Vicente, A. M. (2019). Propuesta metodológica para la generacion de ortofotos y modelos digitales de elevación de alta resolución a través de vuelos con drones no-fotogramétricos. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tepic 2019* (págs. 972-978). Tepic: Academia Journals.
- Oñate de Mora, M. (2015). Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. En J. L. Esteban Herreros (Coordinador), *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 49-57). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Pedraza Santos, A. (2019). Análisis comparativo del levantamiento topográfico tradicional y el levantamiento topográfico con RPAS en la Huaca Aznapuquio, Los Olivos. 01-151. Lima, Perú: Universidad César Vallejo.
- Pérez Álvarez, J. (Septiembre de 2001). Apuntes de Fotogrametría III. Mérida, España: Universidad de Extremadura.
- Peterman, V., & Mesarič, M. (2012). Land survey from unmaned aerial vehicle. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 447-451.
- Pinto R., F. (2013). *Geomática: Tecnologías de punta* (1ra ed.). Bloomington, IN, EE.UU.: Palibrio.

- Polat, N., & Uysal, M. (2017). DTM generation with UAV based photogrammetric point cloud. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 77-79.
- QGIS. (22 de 02 de 2019). <https://www.qgis.org>. Obtenido de <https://www.qgis.org>: https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/gentle_gis_introduction/introducing_gis.html
- Ramos Castro, H., & Montes Navarro, J. C. (2015). Aplicaciones Hidrológicas. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 95-99). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Reinoso Delgado, R. (2015). Aplicaciones al mantenimiento de líneas eléctricas. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 175-184). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Rojas-Sánchez, G. (Enero de 2020). Generación de cartografía de ocupación y uso de suelo mediante el uso de técnicas de Percepción Remota en la región centro del Estado de Guerrero. Chilpancingo, Guerrero, México.
- Royo-Pérez, L. (2014). *Introducción al análisis espacial*. Obtenido de <http://inisig.com/introduccion-al-analisis-espacial-i>.
- Rystedt, B. (2014). 1. Cartografía. En *El mundo de los mapas* (págs. 7-13). Viena: F. Ormeling y B. Rystedt. Recuperado el 17 de Octubre de 2020, de <https://icaci.org/>: https://icaci.org/files/documents/wom/01_IMY_WoM_es.pdf
- Saez Paredes, D., & Beltrán Noguera, A. M. (2015). Aplicaciones Cartográficas. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 67-76). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Samuels, P., & Gilchrist, M. (2014). *Pearson Correlation*. Birmingham, UK.: Birmingham City University.
- Sarría, F. (2006). Sistemas de Información. *Sistemas de Información Geográfica*. Unviersidad de Murcia.
- Saura Sánchez, R., & González Carril, A. (2015). Aplicaciones al periodismo. En J. L. Esteban Herreros, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil* (págs. 191-197). Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Sentera. (Septiembre de 2019). <https://sentera.com/>. Obtenido de https://sentera.com/wp-content/uploads/2017/02/NDVI_Single_Sensor_New_Lit4056-WEB.pdf: <https://sentera.com/>
- Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). Modeling environmental dynamics with DinamicaEGO. 115. (C. d. Remoto, Ed.) Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais.
- US Army Corps of Engineers. (01 de Enero de 2007). Control and Topographic Surveying. Washington, DC, EE.UU.
- Uysal, M., Toprak, A., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 539-543.
- Valavanis, K. P. (2007). *Advances in unmanned aerial vehicles* (Vol. 33). (K. P. Valavanis, Ed.) Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Vázquez-Jiménez, R. (2011). Solución geomática para cuencas hidrográficas: Una aproximación desde los Sistemas Socioecológicos Complejos. 121. Ciudad de México, México: Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" CentroGeo.
- Wolf, P. R., & Brinker, R. C. (1997). *Topografía*. México: Alfaomega.

ANEXO 1. GUÍA PARA DESBLOQUEO DE EQUIPO A TRAVÉS DE VUELO SEGURO DE DJI

Ing. Abel Nájera-Ramos

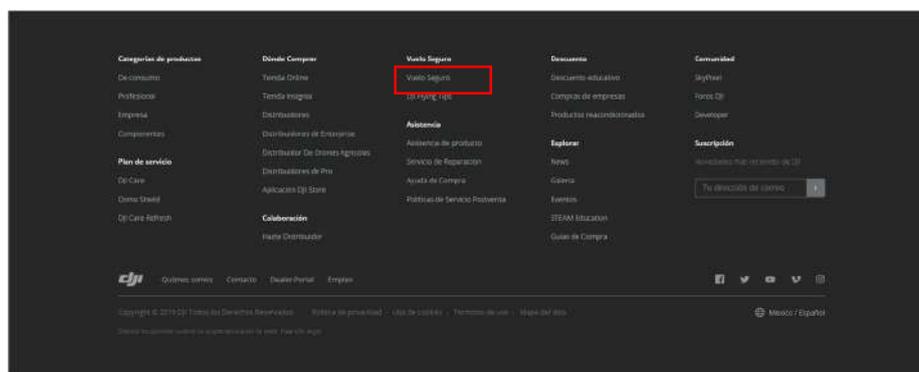
Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico

abel_nr@uagro.mx

1. Ir a la página www.dji.com y si no tiene una cuenta con ellos crear una, es gratis y se requerirá cada vez que se necesite desbloquear el equipo.



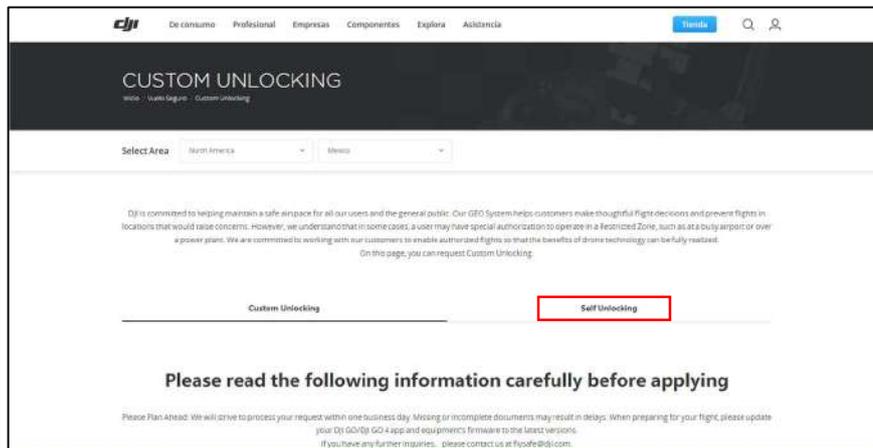
2. Después de acceder a la cuenta navegar hasta la parte de abajo y dar click en "Vuelo Seguro".



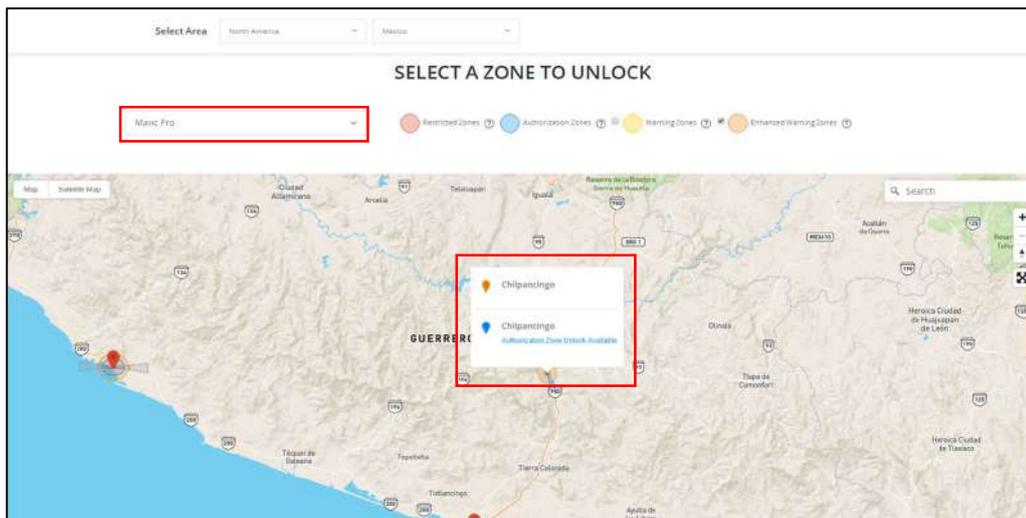
3. En la página de Vuelo Seguro navegar hasta la parte de “UNLOCKING REQUESTS” y dar click en “UNLOCK A ZONE”.



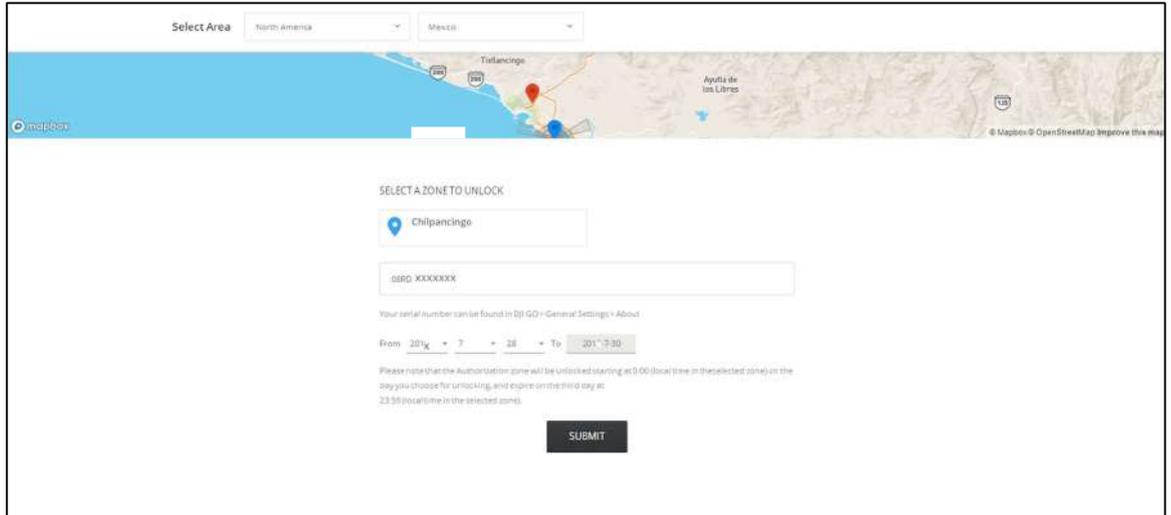
4. En “UNLOCK A ZONE” ir a la pestaña de “Self Unlocking”



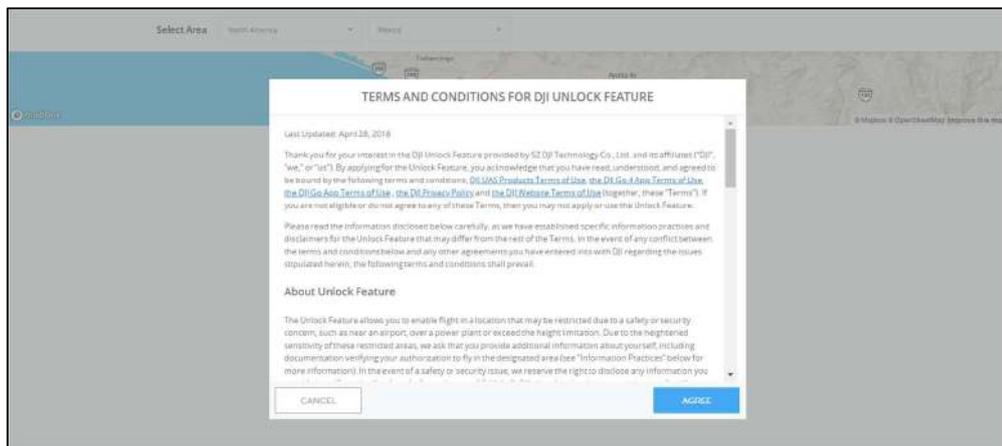
5. Dentro del mapa que aparece se muestran una serie de ubicaciones que exponen las zonas de no vuelo, seleccione la zona a desbloquear y seleccione el tipo de dron que utilizará para volar.



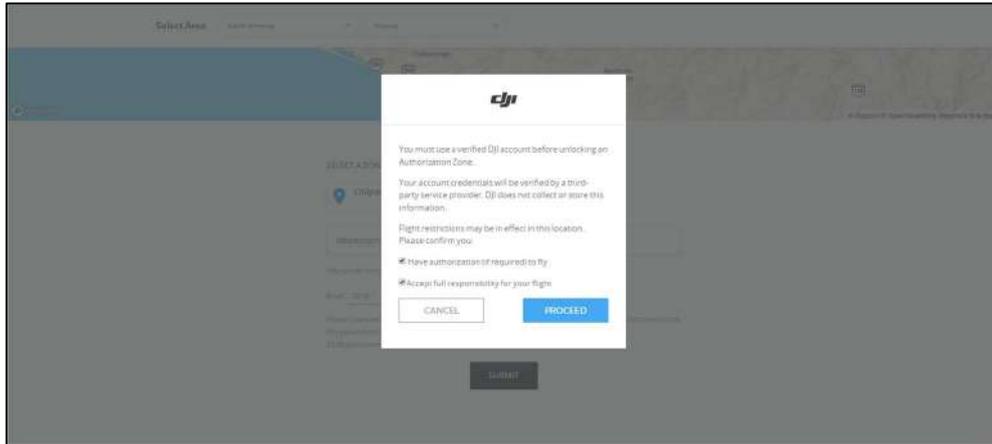
6. Para este siguiente paso necesita el número de serie del controlador, debe encender el drone y en la aplicación de DJI GO 4.0 obtener el número de serie. Ingrese la fecha que desea volar (tendrá 3 días para realizar el vuelo sin contratiempo, después de esos 3 días deberá desbloquear la zona otra vez), finalmente de click en “SUBMIT”.



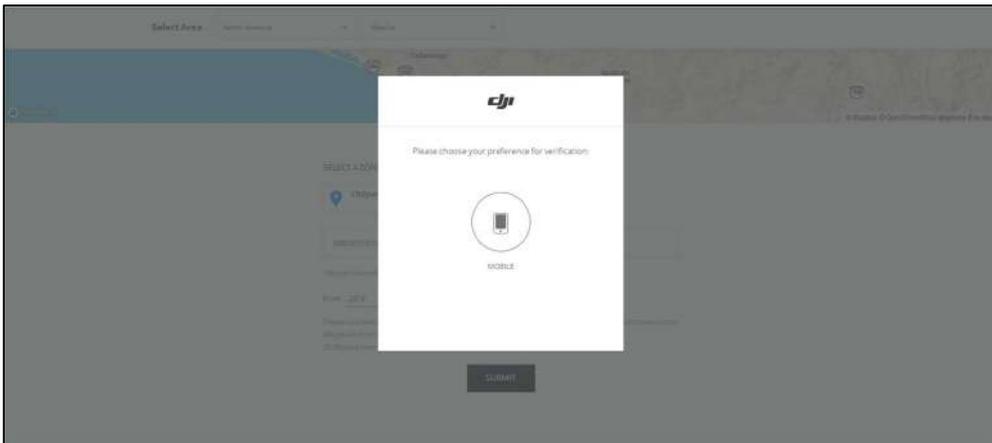
7. Leer los términos y condiciones, dar click en “AGREE”



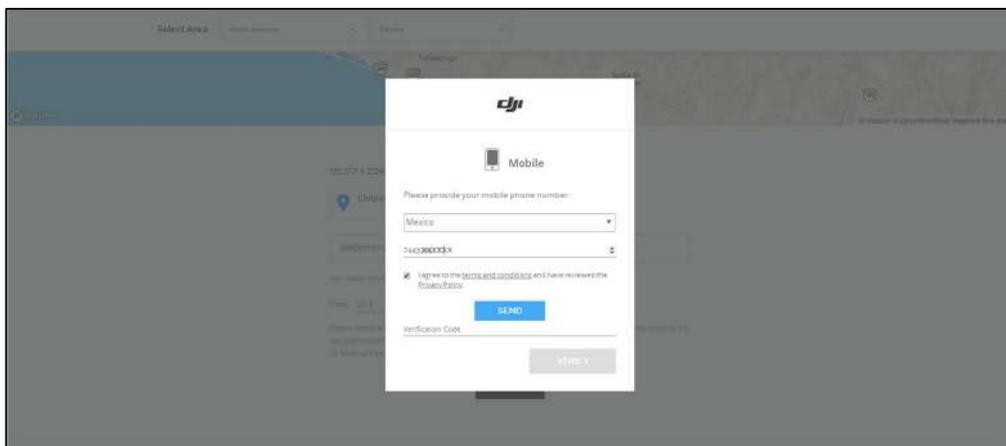
8. El siguiente cuadro seleccione las opciones según aplique y continuar dando click en “PROCEED”, la información registrada en la cuenta de DJI debe ser verificada por un proveedor de servicios tercero.



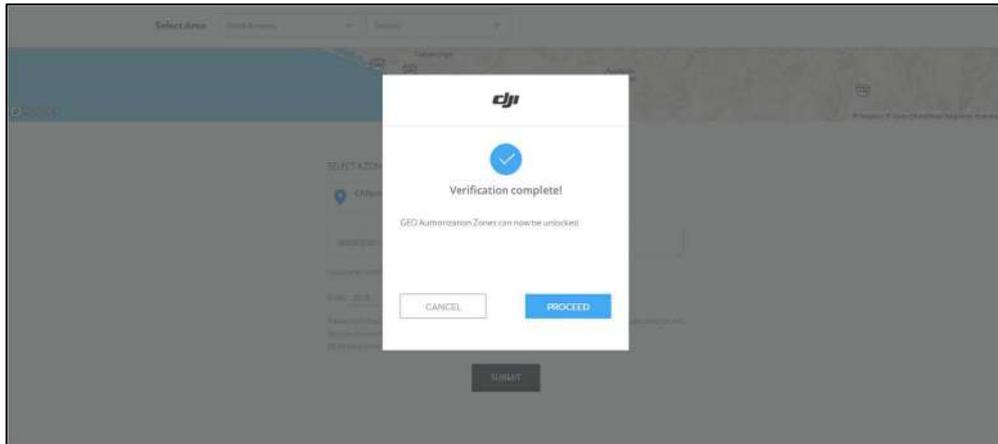
9. Seleccione la manera de verificación que desee, en este caso muestra la opción de verificación a través de un teléfono móvil.



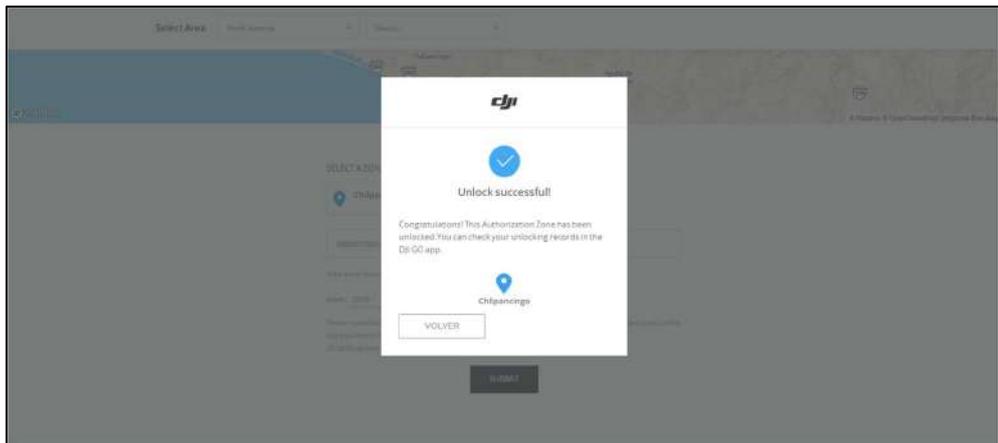
10. Ingrese el país y número telefónico, este paso envía un número de verificación en un mensaje de texto que deberá ingresar para continuar con el desbloqueo del equipo.



11. Una vez enviado el código de verificación lo siguiente será solo desbloquear la zona de interés, click en “PROCEED”.



12. Autorización completada.



Después de realizar lo anterior el equipo estará listo para poder realizar la misión planeada de vuelo.

ANEXO 2. GUÍA PARA LA CREACIÓN Y EJECUCIÓN DE MISIÓN DE VUELO EN MAP PILOT

Ing. Abel Nájera-Ramos

Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico

abel_nr@uagro.mx

Map Pilot es una aplicación de terceros que ayuda a recopilar datos con drones DJI. Esta aplicación realiza los vuelos automatizados tomando en consideración diferentes elementos que entran en juego al planificar y ejecutar un vuelo fotogramétrico. Map Pilot intenta hacer la mayor parte del trabajo con los cálculos del plan de vuelo relacionados con la obtención de las imágenes. La interfaz de la aplicación es amigable y es muy sencillo crear la misión de vuelo, para realizar esto se requiere de una conexión a internet para que se descargue el mapa de fondo, pero no es necesaria para ejecutar el vuelo como tal. Map Pilot es una aplicación de la plataforma Maps Made Easy (Figura 1).

Esta guía está basada en la información recopilada de la documentación y artículos sobre el uso de la aplicación Map Pilot y es específica para el uso de la aplicación y el drone DJI Mavic Pro con cámara FC220 4.7 4000x3000 RGB aunque puede utilizarse para otros drones siempre y cuando sean aeronaves compatibles con Maps Made Easy. Aquí una lista <https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/articles/205704366-Supported-Hardware>.



Figura 1. Map Pilot de la plataforma Maps Made Easy.

En la pantalla principal (figura 2) se muestran cuatro opciones principales:

- a) Create New Mission: Es la opción para crear las misiones de vuelo.
- b) Mission management: El lugar donde se guardan todas las misiones creadas.
- c) File manager: Aquí se encuentran los registros de vuelo de las misiones incluyendo archivos kml y csv.
- d) Settings: Configuraciones varias de la aplicación.



Figura 2. Pantalla principal

El primer paso será configurar el tipo de cámara y dron que utilizaremos para realizar los vuelos, para esto se selecciona la opción de *Settings*. En la siguiente pantalla se selecciona FLIGHT CAMERA (Figura 3a) y se busca en la lista el equipo que se usara para la ejecución de los vuelos (Figura 3b). Después de seleccionar el equipo se guarda la configuración y se regresa a la pantalla principal.

La selección de equipo y cámara permite a la aplicación reconocer parámetros que servirán para ejecutar un vuelo exitoso, entre estos parámetros se encuentra el tipo de batería y el tiempo que puede volar el dron, la resolución de la cámara para calcular traslapes, entre otras.

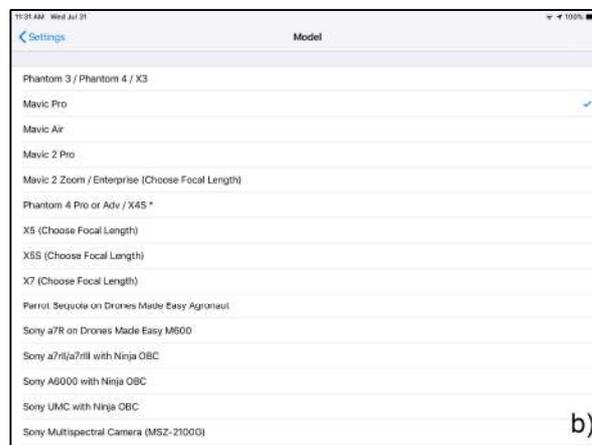


Figura 3 a) Pantalla de *settings* b) Lista de equipo compatible en la aplicación.

De regreso a la pantalla principal lo siguiente será crear una misión de vuelo. Para esto debemos estar familiarizados con el área de estudio y las normas que aplican para los vuelos con drones, así se podrá crear la misión del vuelo con los parámetros correctos.

En el uso de drones existen riesgos de desconexión, principalmente en vuelos automatizados. Aun cuando se han tomado todas las medidas necesarias para que la ejecución del vuelo sea exitosa, la comunicación entre el dron y el controlador, el dispositivo y el sistema aéreo, la aplicación en el dispositivo, tendrán riesgo de pérdida

del vehículo aéreo. Es necesario entonces seguir todas las normas tanto federales como locales, así como el manual de usuario del dron y de la aplicación Map Pilot para evitar algún accidente o daños a terceros.

Nota: Todos los pasos de planeación pueden realizarse sin la necesidad de conexión a la aeronave (que se muestra con un triángulo rojo cuando existe conexión). Si está conectado a la aeronave se debe asegurar que tenga una visión clara del cielo sin obstrucción, el triángulo rojo y el panel de control de vuelo no se mostrarán hasta que encuentre una sólida conexión GPS y un plan de vuelo válido.

CREAR MISIÓN

En la pantalla principal, seleccionar *Create new misión*. En la pantalla siguiente seleccionar la opción que aplique. Seleccione *OK* si desea continuar con la creación de la misión como se muestra en la figura 4.

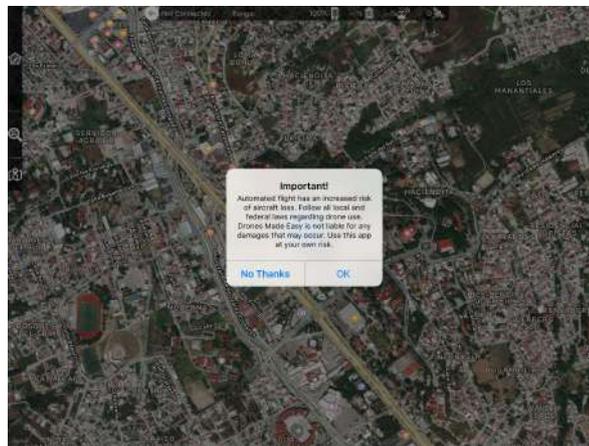


Figura 4 Creando misión.

Por defecto la aplicación mostrará la ubicación del dispositivo en el mapa, si no se encuentra en el área de estudio podrá ubicarlo navegando a través de él (Figura 5). Identifique el área escanear, asegúrese de que el terreno sea conocido y que todas las características y elementos de alta elevación sean tomados en consideración.

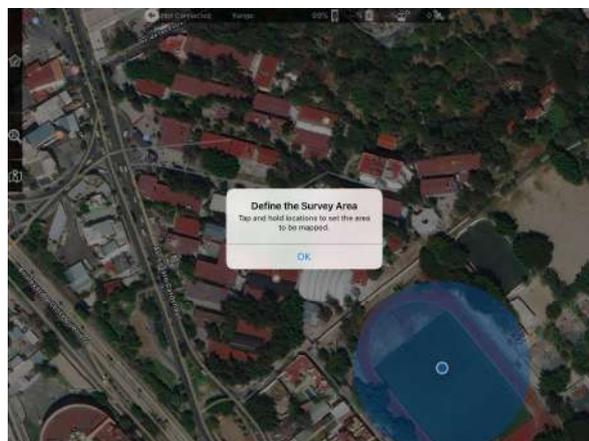


Figura 5 Mapa en Map Pilot.

En la esquina superior izquierda se encuentra el menú desplegable de estadísticas del plan de vuelo que permite saber algunos parámetros calculados por la aplicación. Abajo del menú de estadística se encuentra el menú para el ajuste de altitud que sirve para ingresar la altitud a la cual se ejecutara el vuelo. Los dos menús (figura 6) deben desplegarse cuando se crea una misión ya que muestra información pertinente al plan de vuelo.

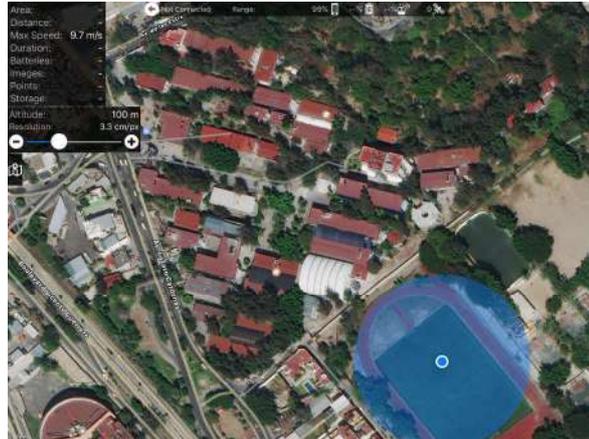


Figura 6. Menú desplegable de estadística y de ajuste de altitud.

Para comenzar a crear el polígono de apoyo que mostrará la misión de vuelo coloque marcadores de límite, tocando la pantalla y manteniendo por un segundo o dos, entonces aparecerá un punto amarillo (Figura 7a) con el que podremos crear un polígono de apoyo. Se realiza este paso para cada vértice del polígono, para mover cada marcador al área deseada en el mapa debe tocarlo y mantener hasta que el marcador tenga una reacción, arrastre y reubique. Para crear un marcador nuevo cuando ya se ha creado el polígono solo se deben seleccionar los puntos pequeños entre los vértices existentes y después de creado el marcador arrastrarlo al área correspondiente. Para borrar un marcador de un solo click sobre el marcador.

Haciendo doble click se creará un punto morado (Figura 7b) que será la ubicación tentativa de la zona de despegue y aterrizaje del dron. Esta ubicación solo es tentativa y se ajustara al momento de ejecutar la misión de vuelo. El marcador azul es el Punto de Inicio Móvil (Movable Home Point, Figuras 7a) y b)), este se actualiza a medida que el piloto se mueve, es importante mantener contacto por radio con la aeronave para asegurarse de que las actualizaciones estén ocurriendo.



Figura 7 a) Para crear vértices de polígono de misión de vuelo. b) Creando ubicación tentativa de despegue y aterrizaje, Punto de Inicio Móvil marcado en azul.

Creado el polígono (Figura 8) lo siguiente será ajustar los parámetros de acuerdo con el plan de vuelo que se realizó específicamente para el área de estudio.

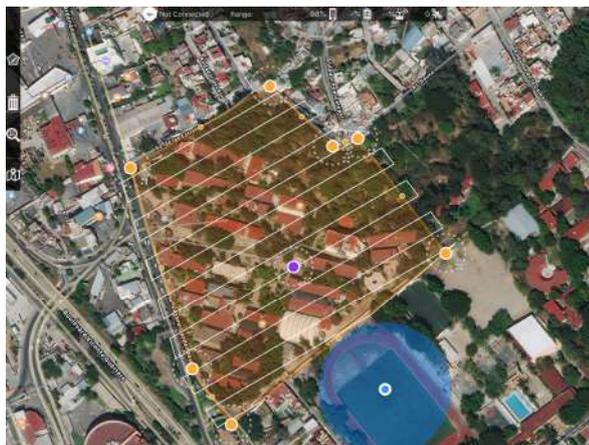


Figura 8 Creación del polígono sobre área de estudio

De acuerdo con el polígono creado el cuadro en la esquina superior izquierda de la pantalla revela ciertos cálculos que ha realizado la aplicación y que tienen que ver con la misión del vuelo. Estos elementos tienen que ver con la cobertura de terreno, la duración del vuelo, la cantidad de baterías que se requerirán para la misión de vuelo, la cantidad de imágenes que capturará, elementos a los que se les debe poner atención ya que de esto depende un vuelo exitoso.

El panel de control central desplegable desde el centro de la pantalla permite ajustar el traslape de las imágenes, que a su vez ajustará la trayectoria del vuelo del dron, estas se muestran en la figura 9 en color blanco. A medida que incrementa el traslape la trayectoria tendrá menos espacio entre sí, la duración de la batería cambiará, la cantidad de imágenes aumentará y otros factores se ajustaran.

Dentro de este panel de control se ajustan otros parámetros como la velocidad, el tiempo de uso de la batería, el control de cámara entre otros. Si desea cambiar la dirección de la trayectoria, por ejemplo, si en la creación del vuelo la trayectoria del dron

van de este a oeste y desea volara de norte a sur, toque la pantalla sobre el polígono con dos dedos por un segundo y rótelos en la dirección deseada. Se sugiere que la trayectoria del drone sea a lo largo de la zona de estudio para hacer más eficiente el tiempo y el uso de la batería para la misión.

Durante la creación de la misión de vuelo, la trayectoria del drone muestra un marcador de color verde y uno rojo en ambos extremos. El marcador verde indica el inicio de la toma de datos y el rojo indica el final de la misión. Es recomendable que el marcador rojo este lo más cerca posible del punto de despegue/aterrizaje, así, en caso de que la batería este por agotarse será corta la distancia que deba recorrer el drone para llegar a dicho punto para evitar alguna eventualidad. Aunque la aplicación puede parar de manera automática la misión para hacer cambios de batería y después reanudar, en dado caso de que el vuelo tome más de una batería, no está por demás poner atención a estos pequeños detalles que ahorran energía de la batería.



Figura 9. Panel de control central.

Para guardar la misión debe desplegar el menú de Control de Mapa que se encuentra debajo del ajuste de altitud, presione el botón de *Guardar* a la izquierda del menú para guardar la misión y se pueda ejecutar aun cuando no exista conexión a internet (Figura 10).

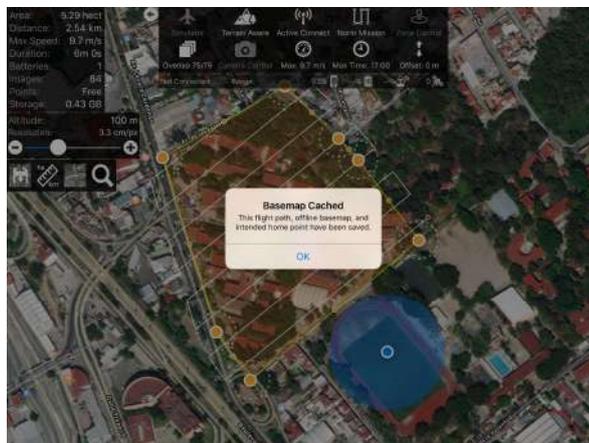


Figura 10. Panel Control de Mapa indica que se ha guardado la misión para su uso offline.

Regresando a la pantalla principal en la opción de *Mission Management* la misión tendrá por nombre las coordenadas Latitud y Longitud, esto puede editarse seleccionando y deslizando a la izquierda el nombre de la misión creada (Figura 11).

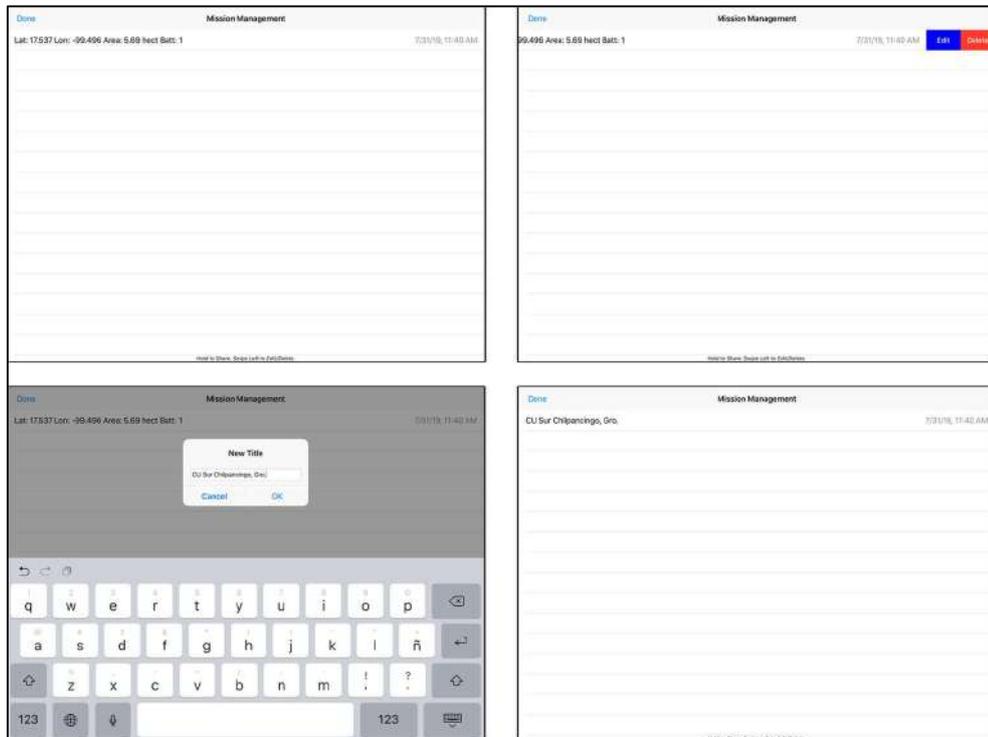


Figura 11. Mission Management, edición de nombre.

EJECUCIÓN DE VUELO

Después de encender el dron y verificar que pueda realizar el vuelo lo siguiente en Map Pilot será cargar la misión al equipo. Abrir el panel de Control de Vuelo (Figura 12) que se encuentra en la esquina superior derecha. Dar click en el icono *UPLOAD*, la misión se cargará de manera automática y tomará solo unos segundos.

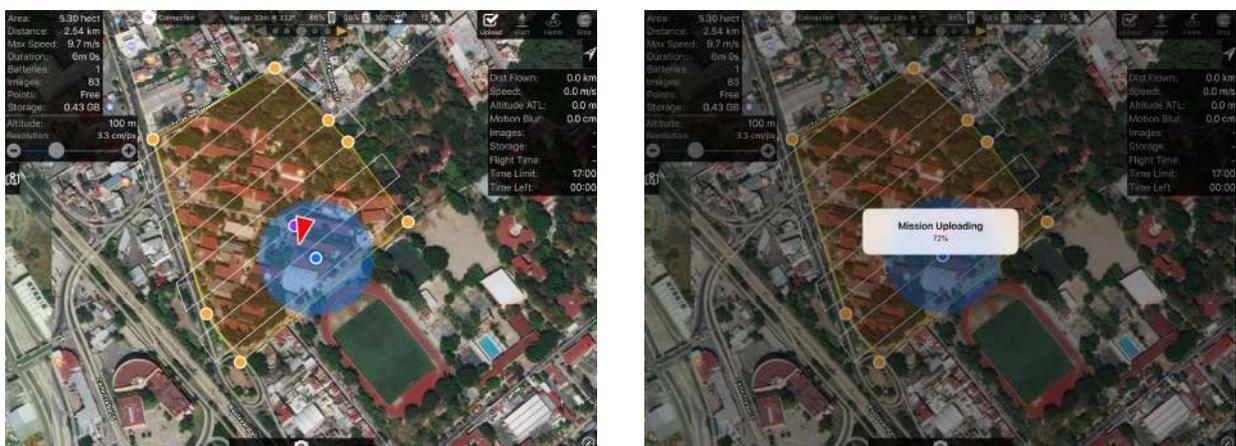


Figura 12. Cargar misión de vuelo a la aeronave.

En esta pantalla realice una revisión pre-vuelo para asegurarse que el sistema esté listo para la ejecución de la misión. Verifique que el vuelo programado sea el correcto corroborando que las líneas blancas de la trayectoria del drone ahora aparecen de color azul (Figura 13). Asegúrese también de que el punto de despegue/aterrizaje ha sido ubicado apropiadamente.

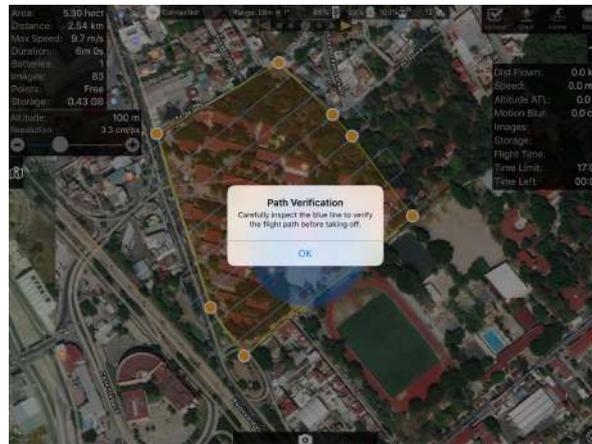


Figura 13. Verificación de trayectoria de vuelo.

Cargada la misión y verificada la trayectoria se ejecuta entonces la misión de vuelo dando click en el icono de **START** (Figura 14). La aeronave se elevará de manera vertical a la altitud crucero que fue configurada y tomará control de la cámara ajustándola al nadir (hacia abajo). El drone automáticamente procederá al inicio de su trayectoria (marcador verde) e iniciará su navegación a lo largo de la trayectoria tomando las imágenes a sus intervalos proyectados marcados con puntos grises como se muestra en la figura 15.

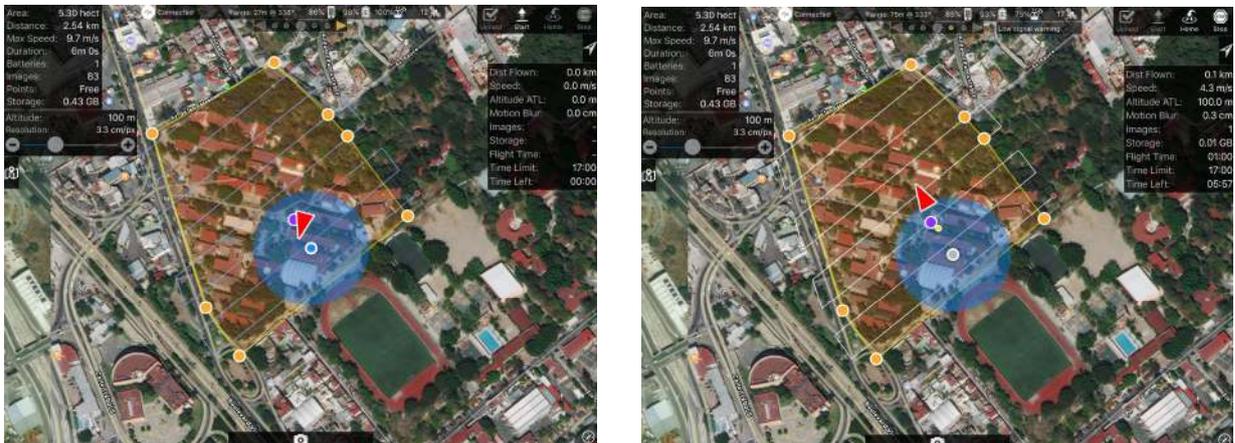


Figura 14. **START** inicio de vuelo, drone (identificado con un triángulo rojo) elevándose a altitud crucero y dirigiéndose al punto de inicio.

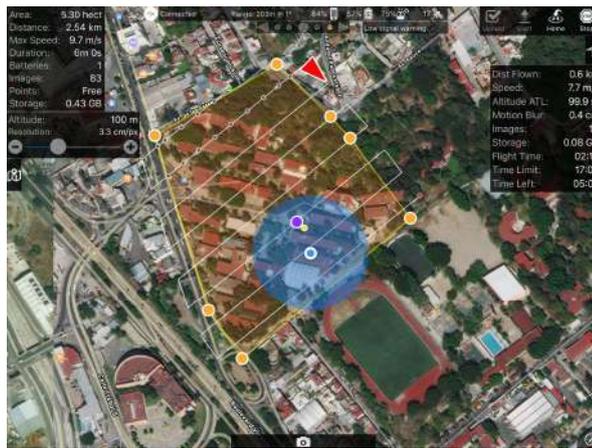


Figura 15. Drone en trayectoria tomando imágenes a intervalos proyectados.

Una vez terminada la misión (marcador rojo de la trayectoria) la aeronave procederá al punto sobre el área de despegue/aterrizaje y descenderá de manera automática (Figura 16).

Dado que la mayoría de los drones no-fotogramétricos están equipados con un navegador GPS y la precisión varía de 1 m a 5 m, el piloto debe atender que la aeronave descienda al punto de despegue/aterrizaje casi de manera manual para así evitar que el equipo aterrice en un área no apta para el aterrizaje.

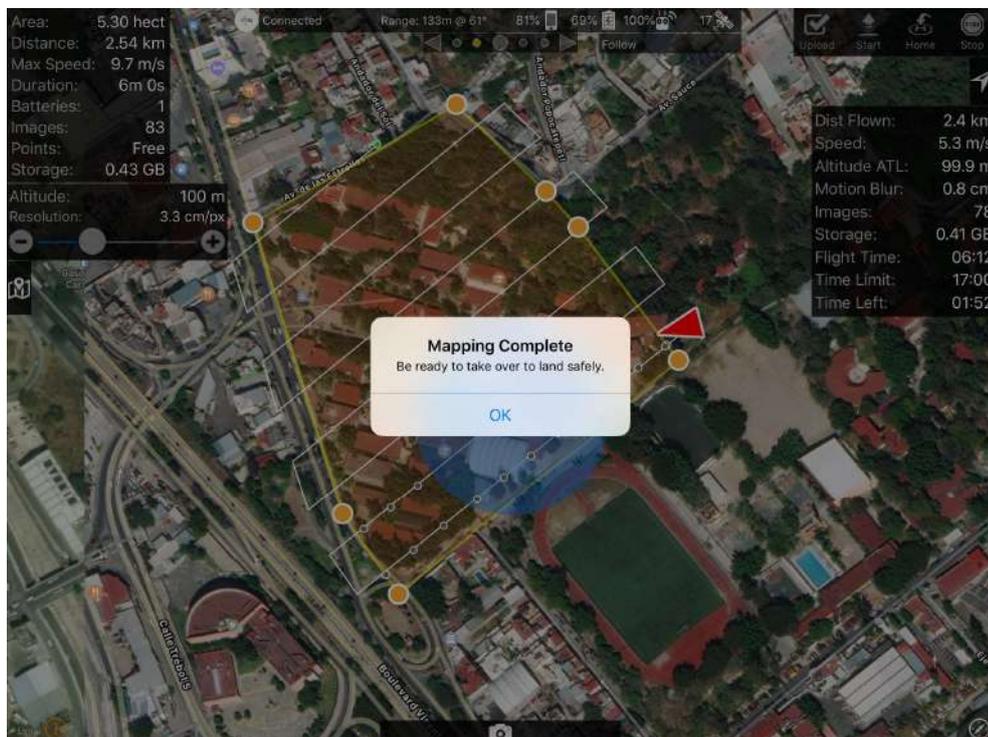


Figura 16. Misión completada.

REFERENCIAS

Maps Made Easy. (Noviembre de 2018). <https://www.mapsmadeeasy.com/>. Obtenido de <https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/categories/200739936-Map-Pilot-for-DJI>

Figuras obtenidas de la aplicación en dispositivo propio del autor.

ANEXO 3. GUÍA BÁSICA “PROCESO DE IMÁGENES EN AGISOFT PHOTOSCAN”

Ing. Abel Nájera-Ramos

Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico

abel_nr@uagro.mx

Esta guía básica está basada en el uso del programa Agisoft PhotoScan Professional v 1.4.1 para el procesamiento de imágenes obtenidas con drones No-fotogramétricos utilizando Puntos de Control Terrestre (PCT) para su georreferenciación. La información aquí presentada ha sido recopilada del manual de usuario, literatura científica y el proceso mismo de imágenes en este programa.

Siguiendo paso a paso la guía el lector podrá obtener entre otros elementos, Ortofotos y Modelos Digitales de Elevación (DEM) que son necesarios para estudios que requieren datos de alta resolución. Los resultados en cuanto a precisión de los productos generados tendrán que ver con la calidad de la medición de los PCT, calidad de las imágenes, de los parámetros seleccionados durante el proceso y el equipo de cómputo utilizado para el proceso, entre otros.

Agisoft PhotoScan es un programa de modelado en 3D basado en imágenes dirigido a la creación de contenido en 3D de calidad profesional de imágenes estáticas tomadas de distintos ángulos siempre y cuando muestren el objeto en proceso de modelación en al menos dos imágenes.

Generalmente el objetivo del procesamiento de imágenes con PhotoScan es construir superficie en 3D, ortomosaicos y DEMs. Este programa fotogramétrico es el más usado y ha presentado resultados óptimos en estudios realizados utilizando imágenes obtenidas con drones.

El procedimiento del proceso de imágenes en PhotoScan envuelve 4 fases principales. El mismo proceso mostrado puede realizarse independientemente de la cantidad de imágenes obtenidas del sistema aéreo y el tipo de cámara utilizado.

1. La primera fase es la **Alineación de las Imágenes**, donde el programa busca por puntos comunes en las imágenes, busca la posición en la que fue tomada cada una de ellas y afina los parámetros de la calibración de la cámara resultando en una nube dispersa de puntos y la ubicación de las imágenes con respecto al objeto de interés como se muestra en la figura 1.

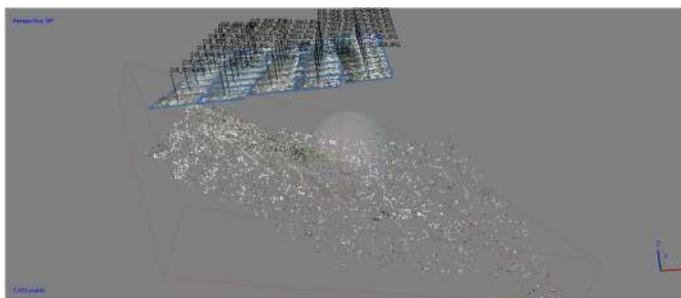


Figura 1. Nube de puntos dispersa y ubicación de imágenes.

2. Fase dos es la generación de la **Nube Densa de Puntos** (Figura 2), que es construida por el programa PhotoScan en función de las posiciones estimadas de la cámara y las imágenes.

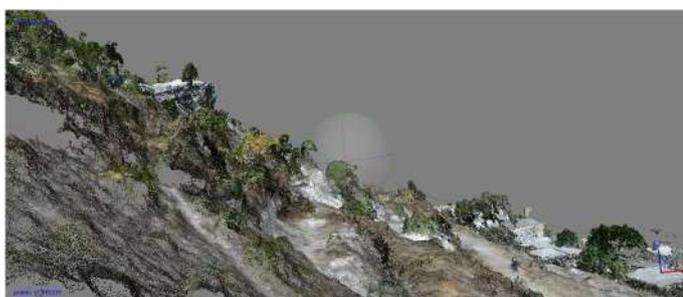


Figura 2. Nube Densa de Puntos.

3. La **Generación de Superficie** es la fase tres, creación de una **Malla o MDE**. Una malla (Figura 3) poligonal en 3D representa la superficie basada en la nube de puntos densa o dispersa, no siempre se requiere la creación de una malla, este paso se puede omitir, todo dependerá de las intenciones del usuario. El DEM se puede construir en proyección Geográfica, Planimétrica o Cilíndrica de acuerdo con las necesidades del usuario. Si la nube de puntos densa fue clasificada anteriormente es posible entonces generar un MDE de una clasificación específica de puntos, por ejemplo: puntos del suelo, esto generara un modelo digital de superficie.

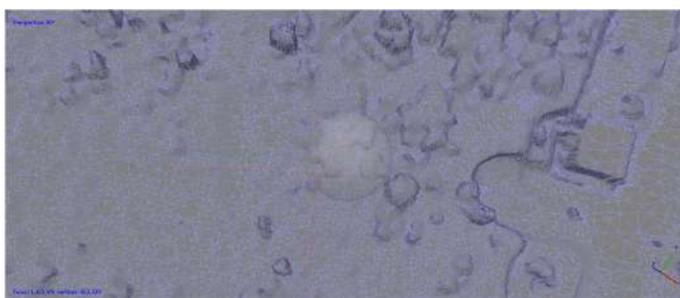


Figura 3. Generación de superficie creando una malla.

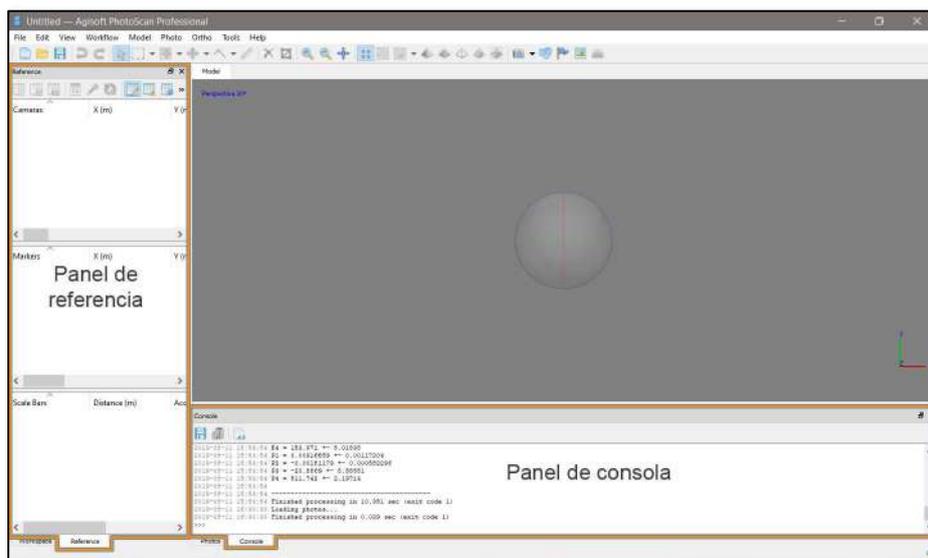
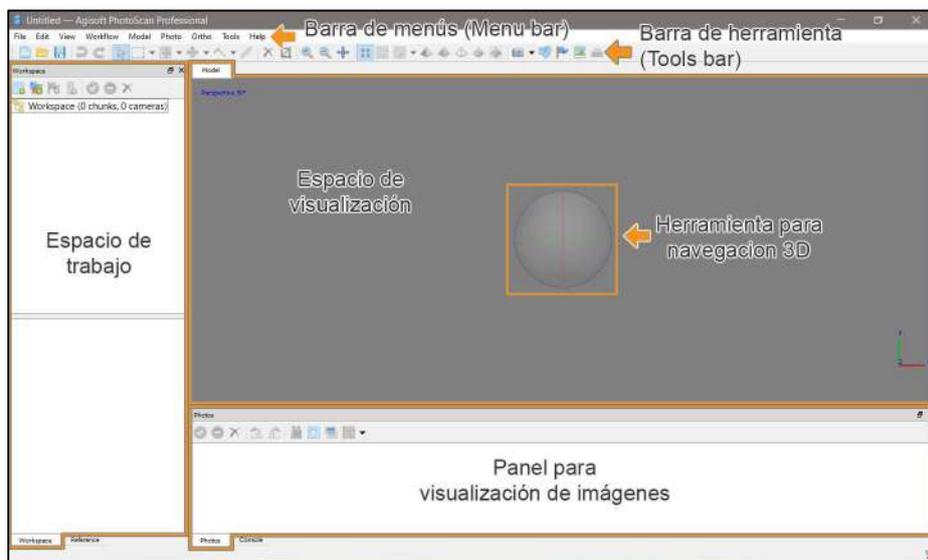
4. Después que la superficie ha sido generada puede ser también texturizada como muestra la figura 4 (relevante solo si se generó la malla) o puede generar una ortofoto. La ortofoto puede ser proyectada, si el usuario así lo desea, sobre la superficie de un DEM o una malla (si es que se generó para el proyecto).



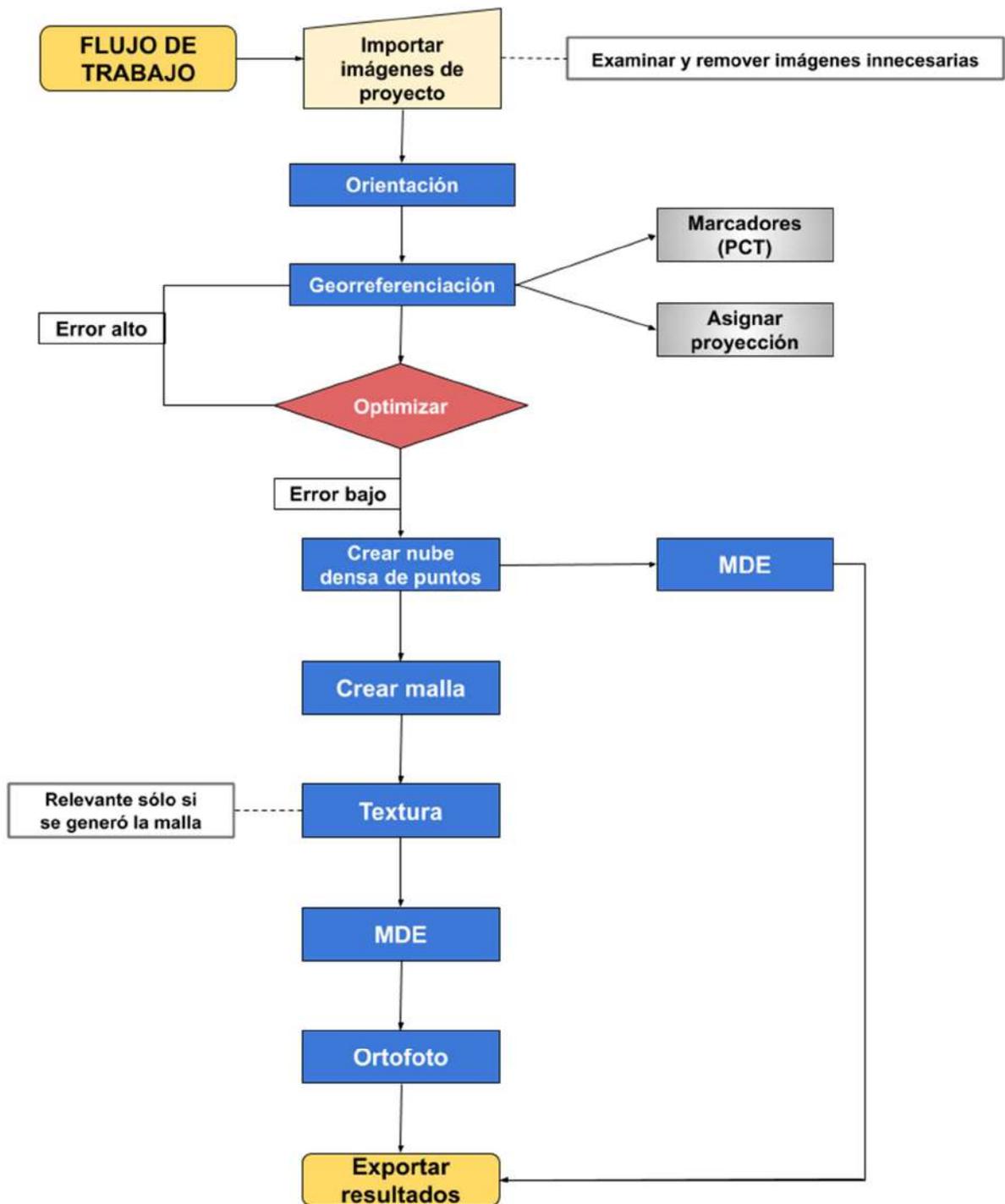
Figura 4. Modelo en 3D texturizado.

INTERFAZ DE AGISOFT PHOTOSCAN

PhotoScan presenta los siguientes elementos al abrir el programa



El siguiente diagrama muestra el flujo básico del flujo de trabajo y lo que ésta guía pretende realizar de principio a fin.



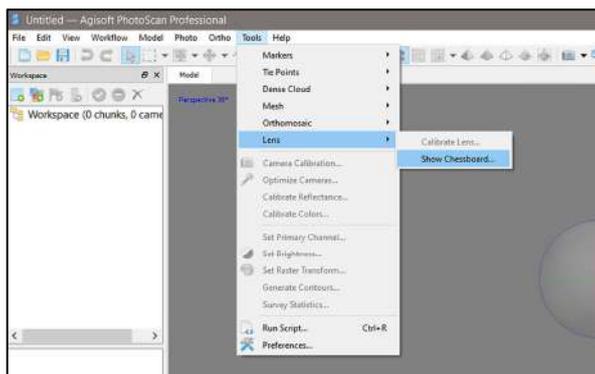
CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

Una operación importante que debe realizarse es la calibración de la cámara con la que fueron tomadas las imágenes. Mientras el proceso de alineación de las imágenes se efectúa, PhotoScan calcula los parámetros de orientación de la cámara tanto interna como externa, incluyendo distorsiones radiales no lineales. Si los resultados de la alineación de las imágenes resultan inestables, cargar la calibración puede ser útil.

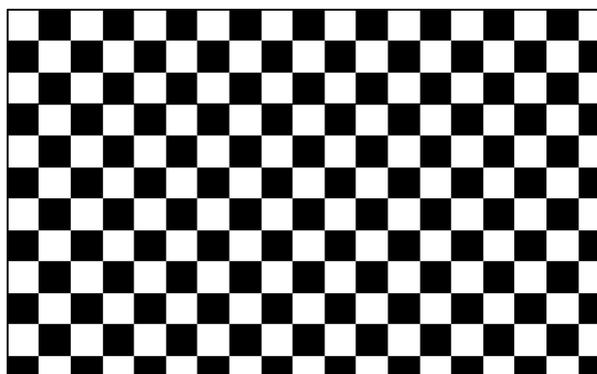
PhotoScan puede procesar imágenes tomadas por distintas cámaras. Para que el proceso de buenos resultados es importante aplicar el procedimiento de calibración de manera separada a las cámaras que tomaron las distintas imágenes. Una vez que se han cargado las imágenes al programa, PhotoScan las dividirá en grupos de manera automática de acuerdo con la calibración, resolución y metadatos.

Para la calibración PhotoScan utiliza el monitor LCD como un objetivo para tomar imágenes de una cuadrícula de ajedrez con la cámara que se calibrará. Para la calibración realice lo siguiente:

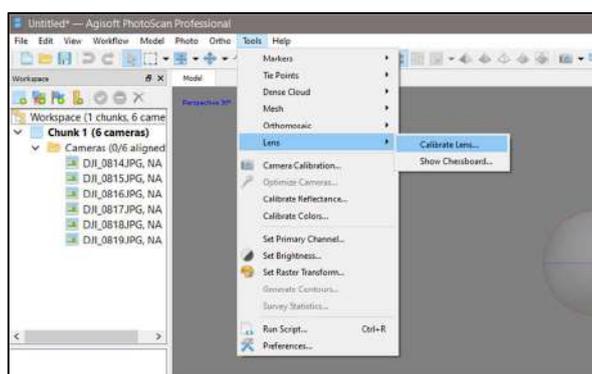
1. Abrir el programa Agisoft PhotoScan
2. Ir a *LENS* en la pestaña de *TOOLS* y seleccionar *Show Chessboard*.



3. El monitor mostrará a pantalla completa una cuadrícula de ajedrez el cual debe tener más de 10 cuadros por lado, utilice el zoom con la rueda del mouse para acercarse o alejarse para escalar la cuadrícula.



4. Tome mínimo 3 fotos de la cuadrícula tomando en cuenta las siguientes pautas:
 - a. Tome las imágenes de ángulos ligeramente diferentes.
 - b. Asegúrese de que la distancia focal sea constante en caso de que la cámara tenga lente de enfoque.
 - c. Evite luminosidad o deslumbramiento de alguna fuente de luz. Aleje la fuente de luz si es necesario.
 - d. Preferentemente, toda el área de las fotos debe ser cubierta por la cuadrícula de ajedrez. Mueva la cámara cerca del monitor si se requiere.
5. Después de tomar las imágenes para salir de la cuadrícula presione la tecla ESC en su teclado.
6. Cargue las imágenes a la computadora para el proceso de calibración.
7. Para cargar las imágenes a PhotoScan agregue un grupo con el icono  *Add Chunk* que se encuentra en el panel *Workspace*, seleccione  *Add Photos* se abrirá una ventana, navegue hasta el folder que contiene las imágenes de la cuadrícula de ajedrez, selecciónelas y de click en *OPEN*.
8. Las imágenes se cargarán en el panel de *Photos* donde podrá revisarlas una a una dando doble click. Debe asegurarse de que las imágenes no se vean borrosas para que la calibración sea óptima. Cualquier imagen con alguna imperfección debe ser removida.
9. Para realizar la calibración ir a *LENS* en la pestaña *TOOLS*, y seleccione *Calibrate Lens*.



10. En el siguiente recuadro seleccione los parámetros necesarios para la calibración deseada, de click en *Ok* para continuar.

Los siguientes parámetros de calibración son los que pueden ser estimados:

f

Distancia focal medido en pixeles

cx, cy

Coordenadas del punto principal, dicho en otras palabras, las coordenadas de la intersección del eje óptico de la lente con el plano del sensor en pixeles.

b1, b2

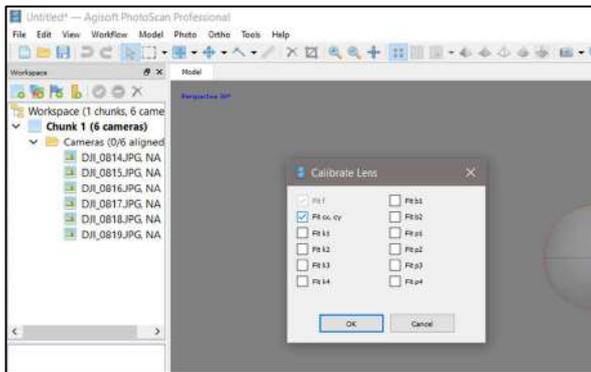
Coefficientes de transformación de afinidad y sesgo (no ortogonal).

k1, k2, k3, k4

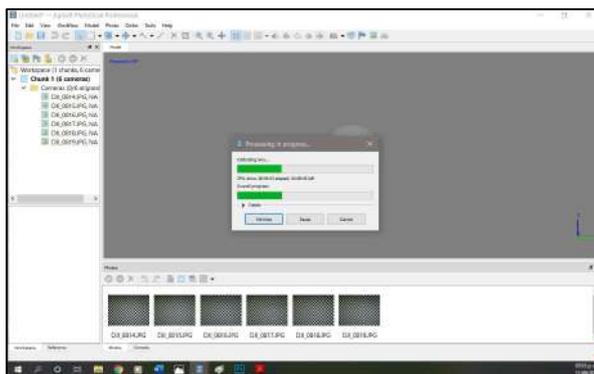
Coefficientes de distorsión radial.

p1, p2, p3, p4

Coefficientes de distorsión tangencial.

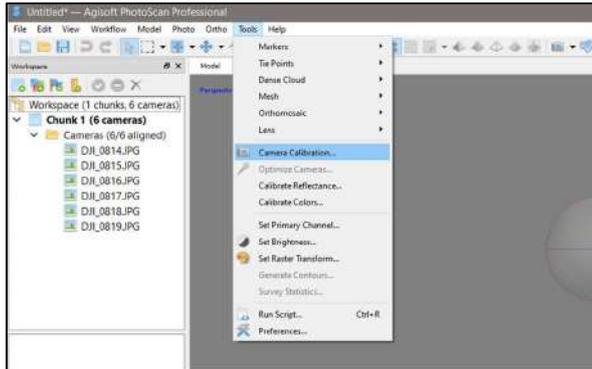


11. Una ventana del avance de progreso aparecerá, esto solo tomará unos segundos.

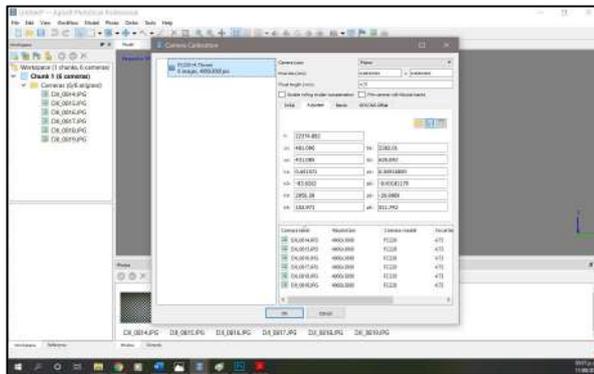


12. Terminado el proceso podrá cargar las imágenes que desea procesar y comenzar con su proyecto. Si utiliza la misma cámara para distintos proyectos, puede guardar la calibración y así ahorrar tiempo realizando este proceso.

Para esto debe ir a *Camera Calibration* en la pestaña de *TOOLS*.



En la siguiente ventana ir a la pestaña de *Adjusted* y presionar el icono de *Save* e ir al folder donde desea guardar la calibración. El archivo se guardará como *Agisoft Camera Calibration (*.xml)*, nombrar el archivo y de click en *Guardar*.



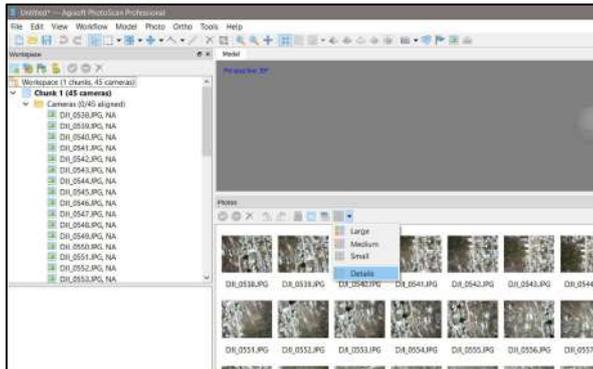
PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES AÉREAS

ORIENTACIÓN

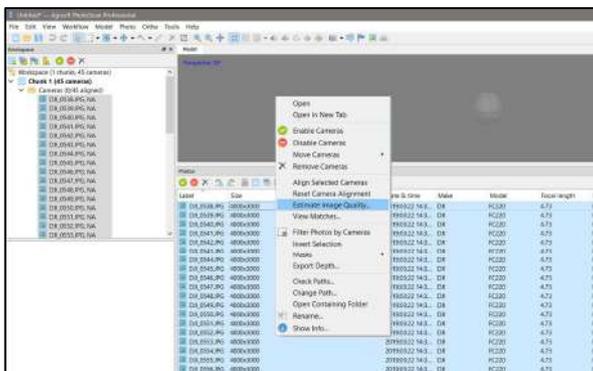
13. Habiendo guardado la calibración puede continuar con el proceso de su proyecto cargando las imágenes en un grupo  de fotos separadas y continuar con el paso 18.
14. Para crear un proyecto nuevo presione el icono .
15. Crear un grupo de imágenes presionando el icono .
16. Agregar las imágenes del proyecto presionando .
17. En la ventana navegue hasta el folder que contiene las imágenes de su proyecto, seleccione todas y presione *ABRIR*.

18. PhotoScan tiene una herramienta para la inspección de calidad de las imágenes y así eliminar cualquiera que pudiera tener alguna influencia negativa en la alineación. Imágenes borrosas, con poca iluminación o brillo, pueden arrojar resultados de poca calidad.

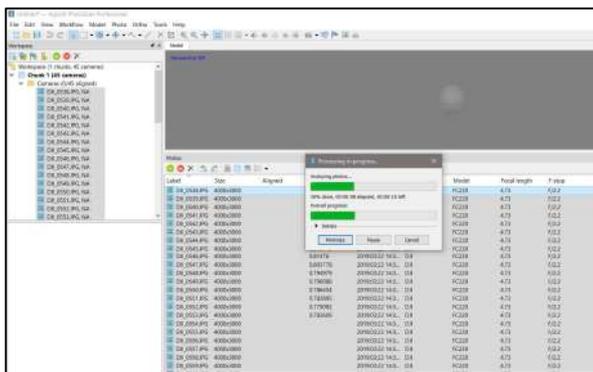
a) Para realizar la inspección en el panel de *Photos* cambie la visualización de miniaturas a detalles.



b) Después de cambiar la visualización seleccione todas las imágenes y de click derecho, en el menú dar click en *Estimate Image Quality...*

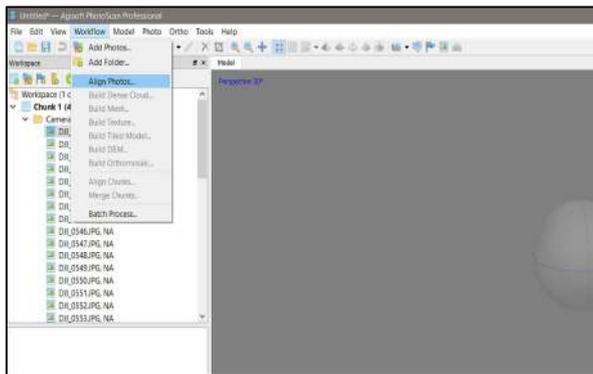


c) Este proceso tomará unos segundos y regresará algunos valores en la columna *QUALITY* los cuales se tendrán que revisar.



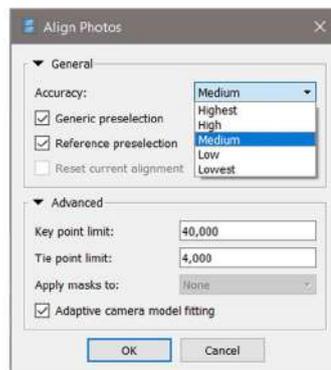
Es recomendable que aquellas imágenes con valor de calidad de menos de 0.5 sean eliminadas o excluidas del proyecto, siempre y cuando el resto de las imágenes sean suficientes y cubran el área de estudio.

19. Realizado lo anterior dar click en *Align Photos* en la pestaña WORKFLOW en la barra de menús.



En la ventana de diálogo seleccione los parámetros deseados para la alineación y de click en *OK*. (cualquier opción seleccionada en la ventana de dialogo es solo presentado como muestra).

Nota: se recomienda realizar una primera alineación de las imágenes en la configuración más baja para después continuar con el proceso de georreferenciación. Una vez que los PCT han sido colocados y las coordenadas asignadas se realiza una segunda alineación a la configuración deseada, pero este proceso será ya basado a las coordenadas fijadas para entonces generar la nube densa de puntos con referencias.



Accuracy

Esta opción ayuda a tener una mejor precisión en la estimación de las posiciones de la cámara. Mientras más alta la configuración mejor precisión, pero tomará mucho más tiempo, mientras más baja la configuración menor será la precisión, y tomará menos tiempo. Sin embargo, la configuración más alta es recomendable para imágenes

nítidas y para propósitos de investigación debido a que el procesamiento correspondiente consume bastante tiempo.

Pair preselection

Generic. En este modo de preselección los pares de fotos superpuestas se seleccionan haciendo coincidir las fotos con una configuración de precisión baja.

Reference. En el modo de preselección de referencia, los pares de fotos superpuestas se seleccionan en función de las ubicaciones medidas de la cámara. Este modo se selecciona para los proyectos que tienen datos de ubicación como coordenadas de referencia, un ejemplo son las imágenes que contienen en sus metadatos las coordenadas de donde fueron tomadas o en los proyectos aéreos y los PCTs que se colocan para georreferenciar.

Puede seleccionar ambas opciones para acelerar el proceso aún más.

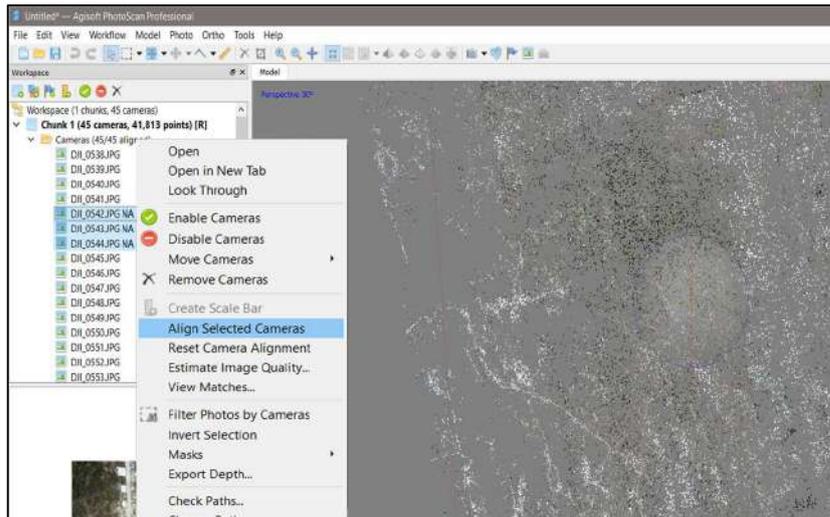
Key point limit

Tiene que ver con el límite superior de puntos característicos de cada imagen que se deben tomar en cuenta durante el procesamiento actual. Usar cero puntos permite que PhotoScan encuentre tantos puntos como sea posible, pero esto puede resultar en un gran número de puntos menos confiables.

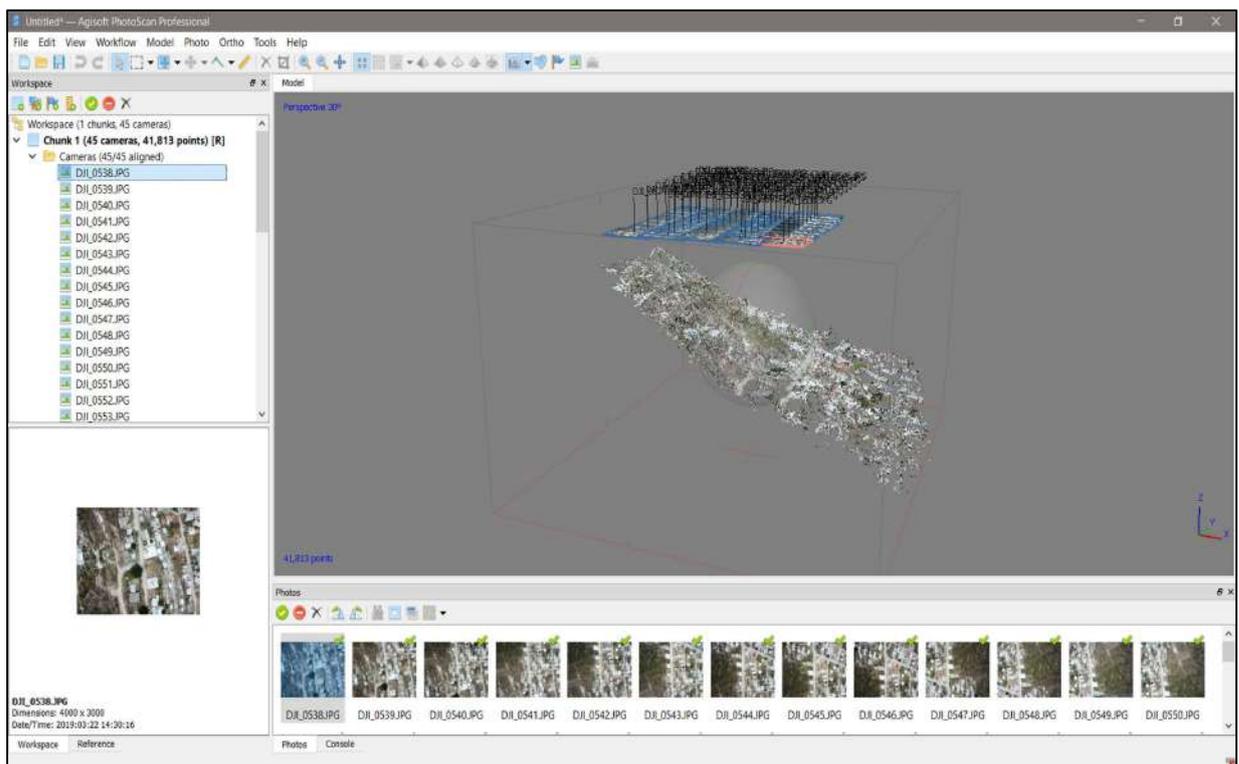
Tie point limit

Este número de puntos tiene que ver con la cantidad máxima de puntos coincidentes de cada imagen. El valor de cero no aplica algún tipo de enlace. Se recomienda que este número sea 4000.

Si terminado el proceso alguna imagen no se alinee por cualquier razón, puede alinearla dando click derecho en ella en el espacio de trabajo y seleccionar



Como resultado de este proceso se creará una nube dispersa de puntos y la ubicación de las imágenes con respecto al objeto de interés.



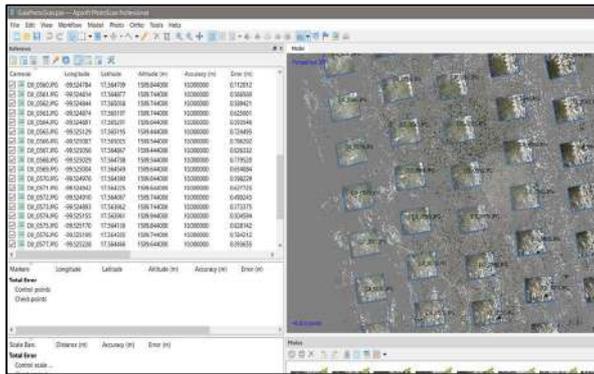
GEORREFERENCIACIÓN

20. Para la georreferenciación del proyecto se importan las coordenadas de los PCT medidos previamente en campo. Muchos programas requieren datos con un sistema de coordenadas definido, ya que proveen un modelo escalado correctamente permitiendo mediciones de áreas y volúmenes, además de que los

modelos pueden ser visualizados en geovisualizadores y la carga de esta información es mucho más fácil.

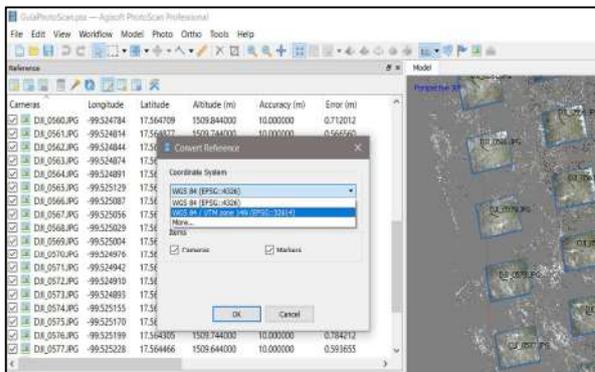
PhotoScan permite la configuración de un sistema de coordenadas basado en las coordenadas de los PCT o las coordenadas de las imágenes asignadas por la cámara, si ésta última tiene un sensor GPS. En cualquiera de los dos casos las coordenadas se pueden cargar al programa a través del panel de referencia del PhotoScan ya sea de manera manual o importando un archivo externo.

Las imágenes utilizadas para este proyecto fueron tomadas por un Dron DJI Mavic Pro con un sistema de navegación GPS el cual asigna las coordenadas de la ubicación de donde fueron tomadas dichas imágenes. PhotoScan reconoce esta información y las muestra en grados decimales en el panel de referencia en Latitud, Longitud, en el sistema de coordenadas WGS 84

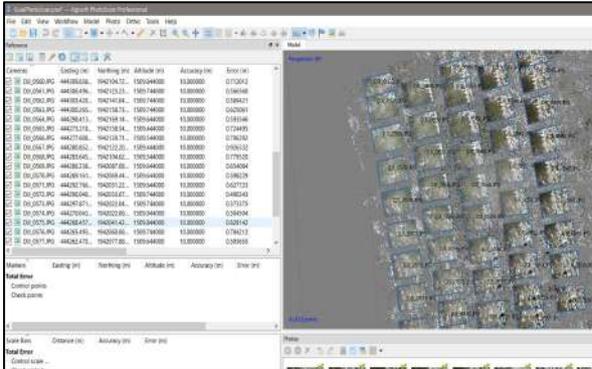


Los datos obtenidos en campo por la medición de los PCT fueron tomados con el sistema de coordenadas UTM WGS 84zone14N. Para hacer congruente el trabajo que realice el programa se debe asignar el mismo sistema de referencia para ambos casos. En este proyecto se cambió el sistema de coordenadas a las imágenes de la siguiente manera.

En la barra de menús del panel de referencia dar click en el icono  *Convert*, en la siguiente ventana de dialogo seleccione el sistema de coordenadas, si no lo encuentra de click en *More...*



Después de seleccionar las coordenadas de las imágenes cambiarán al nuevo sistema de coordenadas asignado.



21. Para agregar los PCT llamados  *Markers* en PhotoScan puede hacerse de la siguiente manera.

- a) De manera automática importados al programa cargados como texto y con caracteres separados por comas.

Para importar un archivo *.csv los datos deben estar organizados en columnas de manera separada como se muestra en la siguiente figura:

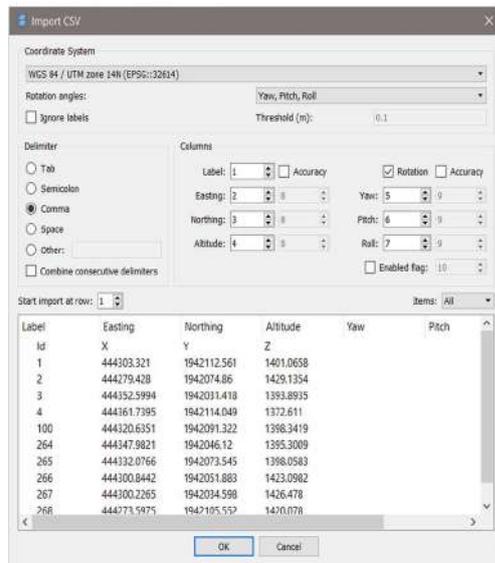
The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E
1	Id	X	Y	Z	
2	1	444303.321	1942112.56	1401.0658	
3	2	444279.428	1942074.86	1429.1354	
4	3	444352.599	1942031.42	1393.8935	
5	4	444361.74	1942114.05	1372.611	

Si existen datos de orientación asegúrese de que el ángulo triple sea ingresado correctamente [yaw, pitch, roll] o [omega, phi, kappa].

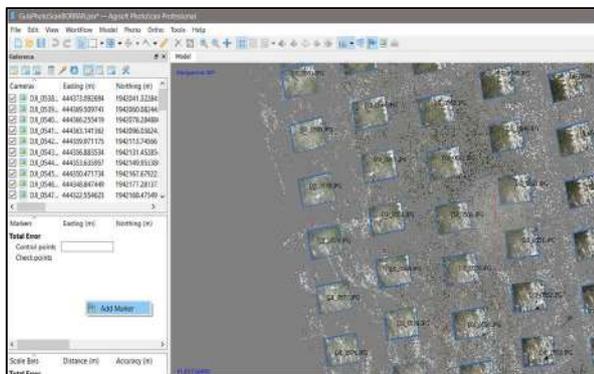
En PhotoScan diríjase al panel de referencia y presione  *Import*, en la siguiente ventana diríjase hacia el folder que contiene el archivo con los datos de los PCT y de click en *ABRIR*.

En la ventana de dialogo de *Import CSV* indique el sistema de coordenadas, el carácter delimitante de los datos a importar, y por último las columnas de los datos de orientación (si existen), revise que los datos a importar sean correctos y de click en *OK*.

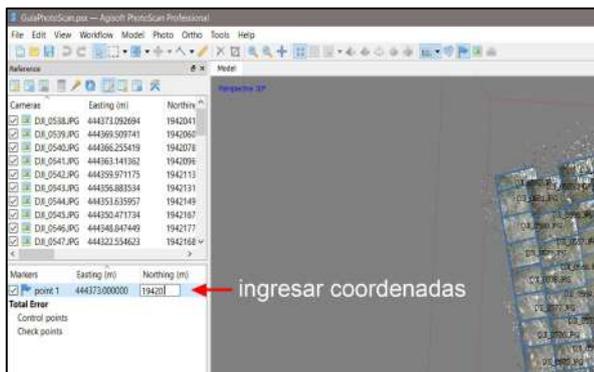


Habiendo importado los puntos el modelo mostrará los marcadores esparcidos, lo único que quedará será colocarlos en su respectiva posición en las imágenes.

- b) De manera manual en el panel de referencia dar click derecho en cualquier lugar del panel y seleccionar *Add Marker*.



De manera manual ingresar las coordenadas del PCT en el marcador y hacer así con el resto de PCT.

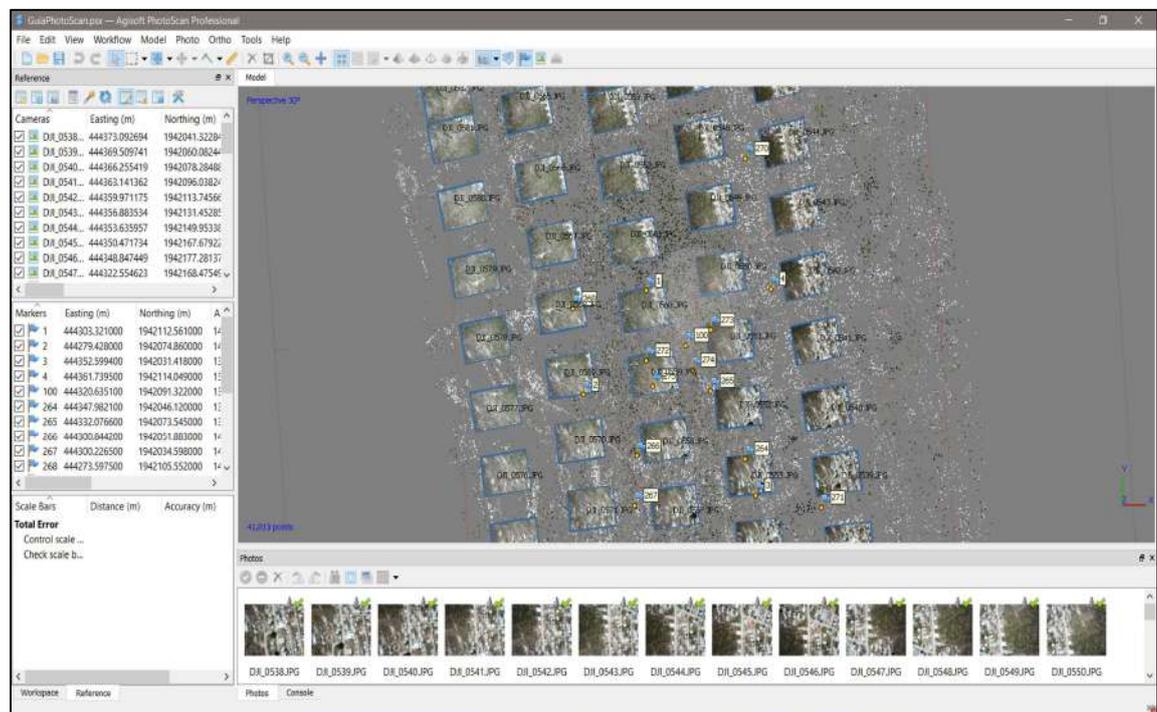


22. Los marcadores creados PhotoScan los utiliza para especificar posiciones dentro de la imagen. Estos marcadores se requieren para colocar un sistema de coordenadas, optimización de la alineación de las imágenes, para medir distancias y volúmenes, entre otros. La posición de los marcadores es definida por la proyección de las fotos de origen. Mientras más fotos son usadas para especificar la posición de un marcador más alta es la precisión de la colocación del marcador. Para definir la ubicación de un marcador este debe ser colocado mínimo en 2 imágenes.

PhotoScan tiene dos enfoques para ubicar los marcadores: *Colocación Manual*, que implica colocar los marcadores de manera manual en la ubicación a la que pertenecen en cada una de las imágenes en la que es visible y *Colocación Guiada* del marcador.

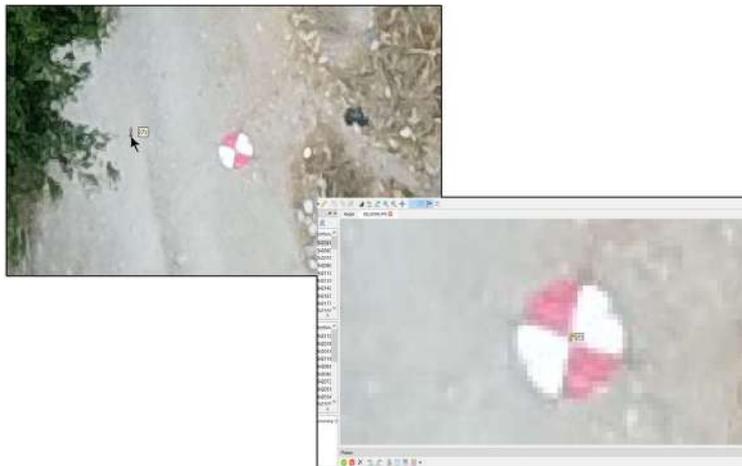
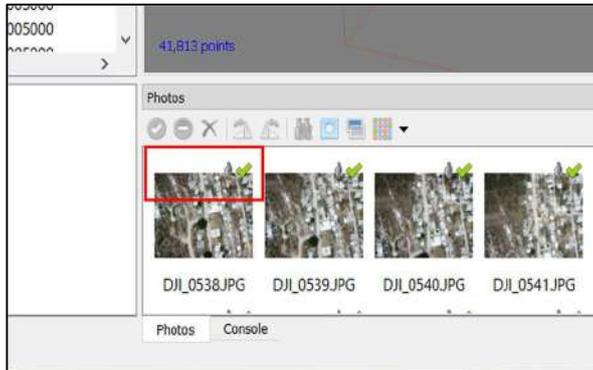
Esta guía describe el proceso manual ya que muestra más a detalle el procedimiento de colocación de los marcadores.

Realizado el paso número 20 la pantalla principal se muestra de la siguiente manera, mostrando las ubicaciones de la cámara, la nube de puntos dispersa y los marcadores colocados donde el programa calcula que deben estar de acuerdo con el sistema de coordenadas seleccionado.



Con el icono  *Camara* se puede prender y apagar las ubicaciones de la cámara. Apague la ubicación y continúe con el siguiente paso.

23. Para ubicar los marcadores seleccione la primera imagen que contenga el icono de una banderilla gris, dando doble click esta abre en una pestaña nueva. La imagen muestra los marcadores de los PCT que se encuentren en el área, de acuerdo con el orden de sus coordenadas y su ubicación seleccione y arrastre el marcador hacia el centro del PCT.



Después de colocados los marcadores las banderillas de color gris (Cerradas) aparecerán como banderillas verdes (Abiertas).

Una vez colocados 2 marcadores como se menciona en el paso 22, dar click derecho en el marcador con el que se está trabajando en el panel de referencia y seleccionar *Filter fotos by markers* esto hará que se filtren las imágenes donde solo aparece el marcador. Se realizará esta acción con todos y cada uno de los marcadores e imágenes para el proceso del modelo.

24. La precisión de la georreferencia puede mejorar significativamente después de la optimización. Se recomienda realizar la optimización si el propósito del modelo final será para realizar cualquier tipo de medición.

De manera básica después de haber seleccionado el sistema de referencia de coordenadas lo siguiente será ir al panel de referencia y dar click en el icono .

En la ventana de dialogo marcar las opciones adicionales de los parámetros de la cámara que se deseen optimizar y dar click en **OK**.

Después de que la optimización haya completado, los errores de georreferencia serán actualizados. Si los resultados no son satisfactorios después de un análisis, se recomienda recalcular los parámetros con valores bajos o reubicar los marcadores manualmente.

Los errores mostrados en el panel de referencia se refieren a lo siguiente:

Sección de ubicación de cámara

Error (m). Es la distancia entre la posición inicial y la posición estimada de la ubicación de la cámara.

Error (deg). Error medio cuadrático calculado sobre los tres ángulos de orientación.

Error (pix). Error de proyección medio cuadrático calculado sobre todos los puntos característicos detectados en la foto.

Sección de marcadores

Error (m). Es la distancia entre la posición inicial y la posición estimada del marcador.

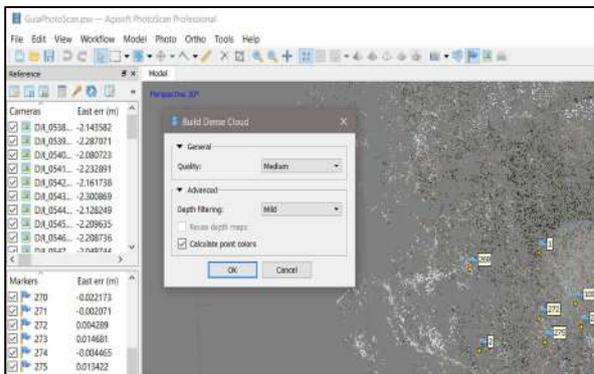
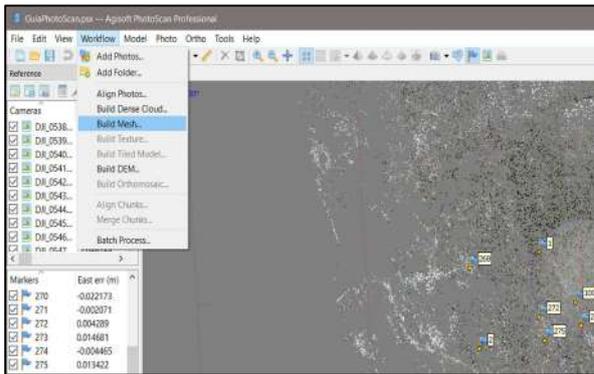
Error (pix). Error de proyección medio cuadrático para el marcador sobre todas las imágenes que el marcador es visible.

NUBE DENSA DE PUNTOS

25. PhotoScan permite generar y visualizar nubes de puntos. Basado en la posición estimada de las ubicaciones de la cámara, el programa calcula la información de profundidad para cada cámara para ser combinada en una sola nube densa de puntos. Estas nubes de puntos creadas por PhotoScan pueden llegar a ser aún más densas que las generadas por sistemas LIDAR.

Una nube de puntos puede ser editada y clasificada dentro del ambiente de PhotoScan para ser usada para etapas tales como la de *Construcción de malla*, *Construcción del MDE*, *Construcción del modelo de mosaico*.

Para construir la nube de puntos seleccione *Build Dense Cloud* del menú *Workflow*, de la ventana de diálogo seleccione los parámetros deseados y de click en **OK**.



Dentro de los parámetros a considerar para la construcción de nube de puntos son los siguientes:

Quality

Es la calidad de la construcción de la nube de puntos. La calidad *High* (Alta) es para obtener una geometría más detallada y precisa, pero requiere de más tiempo de procesamiento. Interpretación de los parámetros de calidad son similares a la precisión dada en la alineación de las fotos, la única diferencia en el caso del parámetro *Ultra High* es que este procesa fotos originales, mientras que las siguientes opciones reducen en escala por un factor de 4 las imágenes, reduciendo con ello también la calidad de detalle y el tiempo de proceso.

Depth filtering modes

Mild. Si existen detalles pequeños importantes que son espacialmente distinguidos en la escena a reconstruir, detalles que no deben ser aislados como valores atípicos. Esta opción puede ser útil para proyectos aéreos en caso de que el área de estudio contenga techos pobremente texturizados.

Aggressive. Este modo de filtro clasifica la mayoría de los valores atípicos, esos detalles que se comentan en la opción anterior.

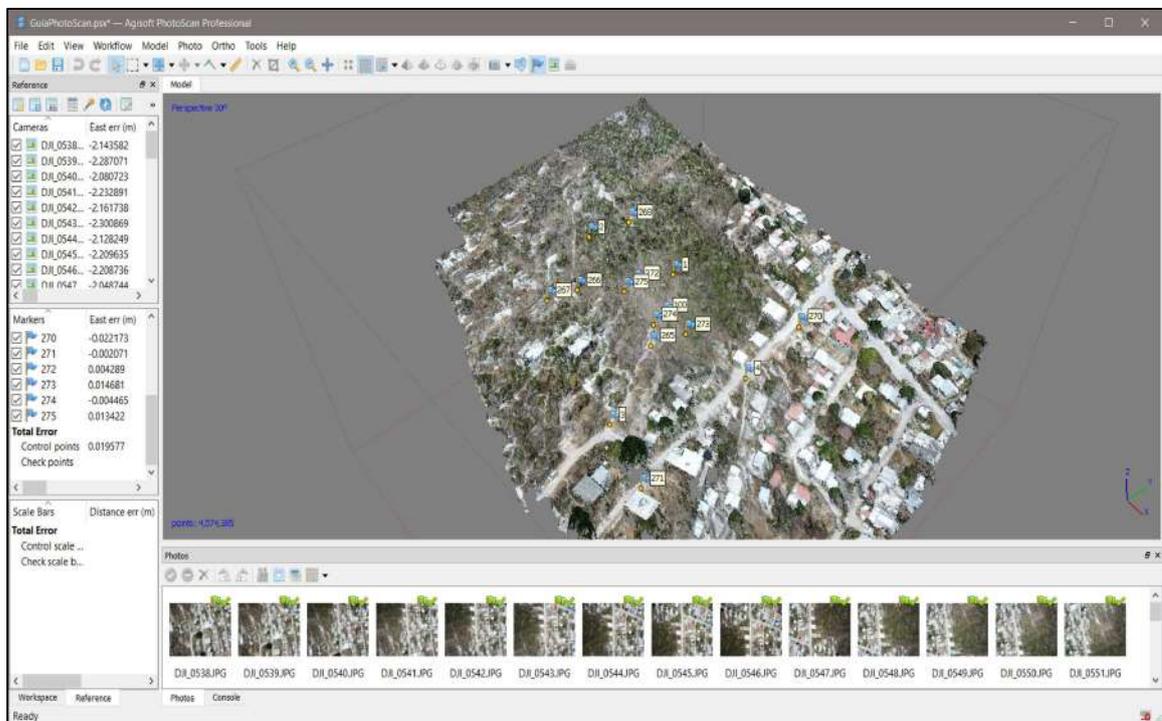
Moderate. Este filtro de profundidad da resultados que están entre las dos opciones anteriores.

Disabled. De la misma manera puede seleccionar este modo para que deshabilita el filtro de profundidad. Esta opción no es recomendable ya que la nube densa resultante puede tener muchas variaciones en el brillo y decoloraciones aleatorias.

Calculate point colors

Esta opción puede ser deseleccionada en caso de que los colores de los puntos no sean de interés, esto ahorrara tiempo de proceso.

Terminado el proceso de la construcción de la nube densa de puntos presionando el icono  *Point Cloud* puede revisar el resultado del modelo.



CONSTRUCCIÓN DE MALLA

26. Basado en la información de la nube de puntos PhotoScan puede construir un modelo poligonal llamado *Mesh* (Malla). El programa es compatible con métodos y configuraciones que producen reconstrucciones óptimas para cualquier conjunto de datos dado.

Para construir la malla seleccione *Build Mesh* en el menú *Workflow* de la barra de menús. Seleccione los parámetros deseados y de click en **OK**

Los siguientes parámetros se deben considerar para la construcción de la malla.

Surface type

Arbitrary. El modo arbitrario debe seleccionarse para cualquier objeto, especialmente para aquellos como: objetos cercanos, estatuas, edificios, etc.

High field. Esta opción está optimizada para el modelado de superficies planas como terrenos, y debe ser seleccionado para el proceso de fotografías aéreas ya que se requiere menor cantidad de memoria permitiendo el procesamiento de grandes sets de imágenes.

Source data

Especifica la fuente con la que se construirá la malla. Esta puede ser la nube de puntos dispersos que puede generar un modelo en 3D o la nube densa de puntos con la que se puede generar un modelo de mayor calidad, pero a costa de más tiempo de proceso.

Face count

Especifica el número máximo de polígonos en la malla final. Los valores sugeridos son calculados basados en el número de puntos de la nube de puntos generada previamente: la proporción va de 1/15 (High), 1/15 (Medium), y 1/45 (Low).

De manera adicional se puede ajustar el parámetro siguiente:

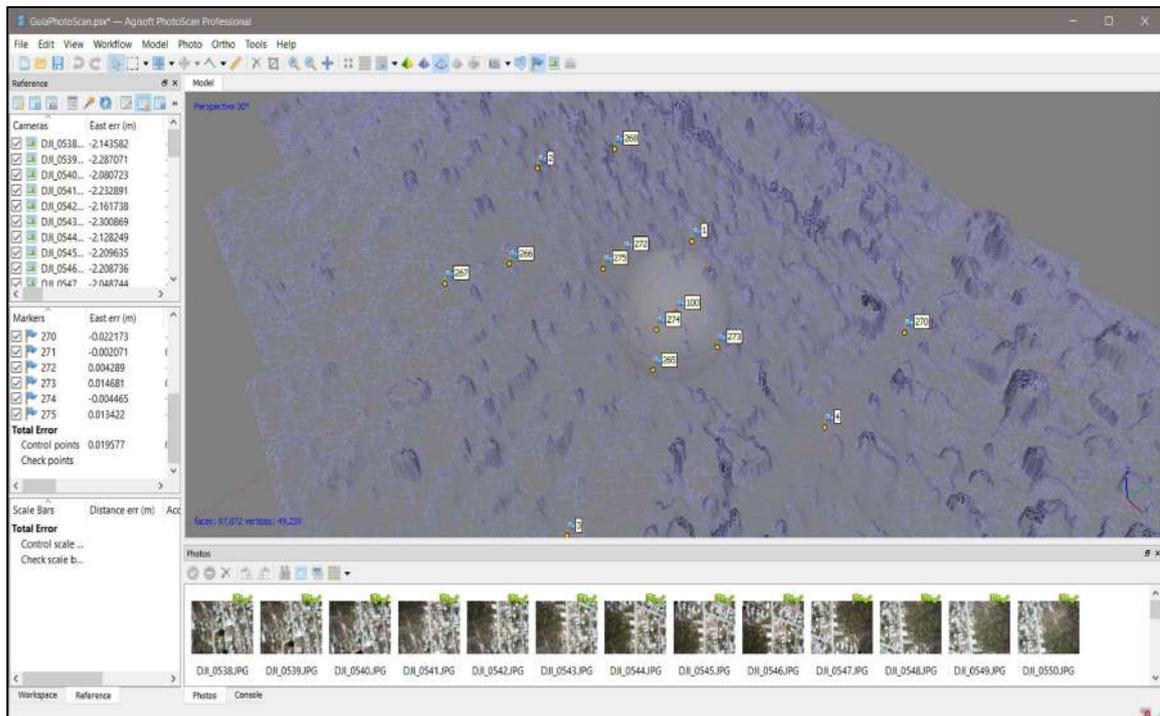
Interpolation

Disabled. Si la interpolación es deshabilitada la reconstrucción lleva a resultados precisos solamente en áreas que corresponden a los puntos de la nube de puntos. Para esto se requerirá postproceso manual para rellenar hoyos en el modelo.

Enabled (Default). Con la opción habilitada PhotoScan interpolará algunas áreas dentro de un círculo de cierto radio alrededor de cada nube de puntos, como resultado algunos hoyos serán rellenos automáticamente. Algunos hoyos pueden seguir presentes en el modelo requiriendo postproceso.

Extrapolated. En esta opción el programa crea un modelo sin hoyos con geometría extrapolada. Con este método grandes áreas de geometría extra pueden ser generadas, pero pueden ser removidas después con herramientas de selección y corte.

Finalizado el proceso de la construcción de la malla, con los iconos  se pueden observar los resultados en el modelo.



CONSTRUCCIÓN DE TEXTURA DEL MODELO

27. Dadas las condiciones de cambio de luz durante la toma de datos, se recomienda el uso de la opción *Calibrate colors* del menú de herramienta antes de construir la textura del modelo.

Los parámetros para la calibración de colores son los siguientes:

Source data

Sparse cloud. La estimación más rápida, pero áspera.

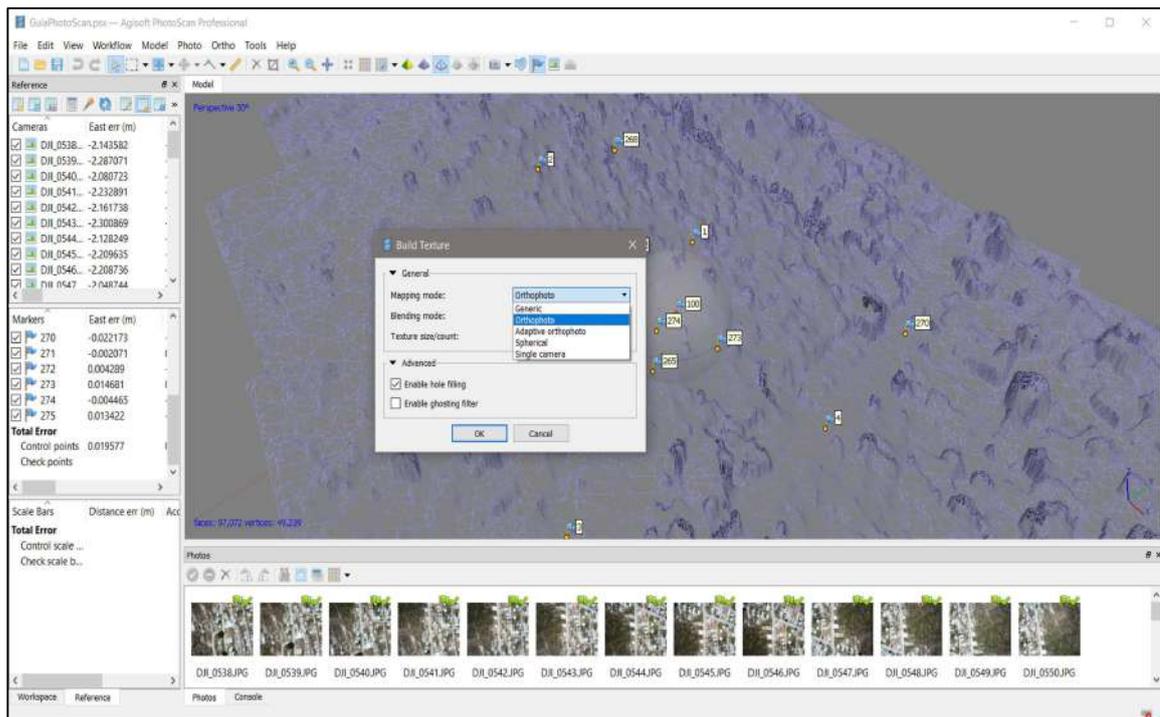
Model. Arroja resultados más precisos, pero bajo la condición de que la superficie este suficientemente detallada. Esta opción es la recomendada si el objetivo es calibrar colores para mejorar la calidad de la textura del modelo.

DEM. Es una alternativa razonable a la opción de *Model* para sets grandes de datos cuando no es factible la reconstrucción de un modelo poligonal solido (Mesh).

Calibrate white balance

Opción adicional si se requiere calibrar el balance de blancos.

Para construir la textura del modelo seleccione *Build Texture* en el menú *Workflow* de la barra de menús. Seleccione los parámetros deseados y de click en **OK**.

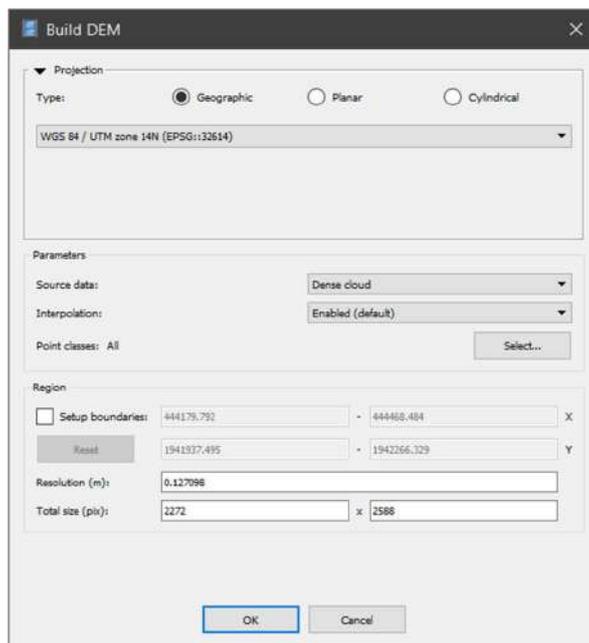


GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

28. PhotoScan permite la generación y visualización de modelos digitales de elevación (MDE), este representa la superficie como una red regular de valores de elevación. El MDE puede ser rasterizado a partir de una nube densa de puntos, una nube dispersa de puntos, o una malla. Resultados más precisos son calculados a partir de los datos de una nube densa de puntos como distancia, área, y mediciones volumétricas entre otros. Además, curvas de nivel pueden ser calculadas dentro del programa PhotoScan y mostradas en el MDE u ortofoto.

Para crear el MDE, seleccione *Build DEM...* en el menú *Workflow* de la barra de menús.

Aparecerá una ventana en la cual deberá ajustar el sistema de referencia de coordenadas o tipo de proyección, y los datos fuente del cual se realizará el rasterizado del MDE.



Los parámetros para la generación del MDE son los siguientes:

Tipo de proyección

Geográfica. Permite seleccionar el sistema de coordenadas geográfico de la lista desplegable. El sistema de coordenadas utilizada en el proyecto aparecerá por defecto, pero puede ser cambiado siempre y cuando los parámetros correspondientes de transformación del datum estén disponibles.

Planar. PhotoScan permite proyectar el MDE sobre un plano establecido por el usuario. Este tipo de proyección puede ser útil en la generación de MDE que tienen que ver con fachadas.

Cilíndrico. Permite proyectar el MDE en una superficie cilíndrica, el valor de la elevación es calculada como la distancia de la superficie del modelo a la superficie del cilindro.

Datos fuentes

Es recomendable que el MDE se calcule a partir de la nube densa de puntos. Por limitaciones de tiempo por la generación de nube densa de puntos, datos de elevación pueden ser generados a partir de la nube dispersa de puntos.

Interpolación

Si la interpolación es inhabilitada llevará a resultados precisos ya que solo las áreas correspondientes a la nube densa de puntos son las reconstruidas.

Clases de puntos

El parámetro permite seleccionar clases de puntos que serán usados para la construcción del MDE, para generar Modelos Digitales de Terreno (MDT) es necesario clasificar los puntos en al menos dos clases, en puntos que pertenecen al suelo y el resto.

GENERACIÓN DE ORTOMOSAICO

29. La exportación de ortomosaicos se utiliza normalmente para la generación de imágenes de alta resolución basadas en las fotos de origen y modelo reconstruido. La aplicación más común es el procesamiento de datos de levantamientos fotogramétricos aéreos, pero también puede ser útil cuando se requiere una vista detallada del objeto.

Para crear un ortomosaico del modelo, seleccione *Build Orthomosaic...* en el menú *Workflow* de la barra de menús.

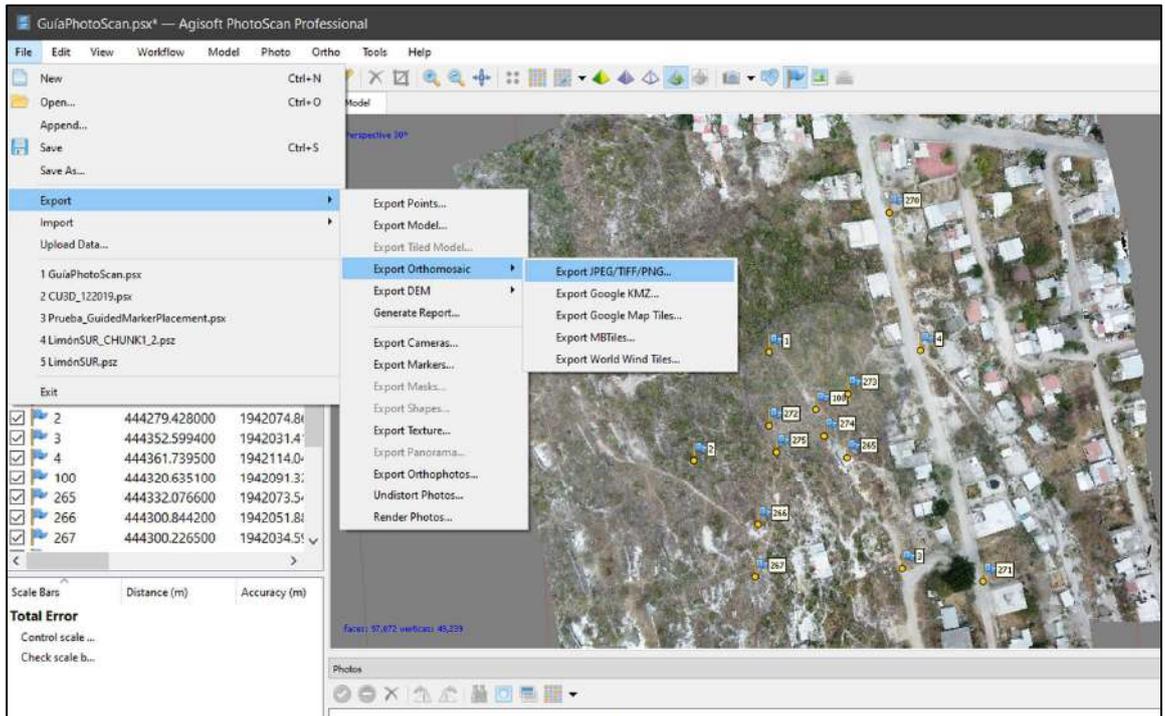
Aparecerá una ventana en la cual deberá ajustar el sistema de referencia de coordenadas o tipo de proyección, y los datos de superficie para proyectar imágenes ortorrectificadas.



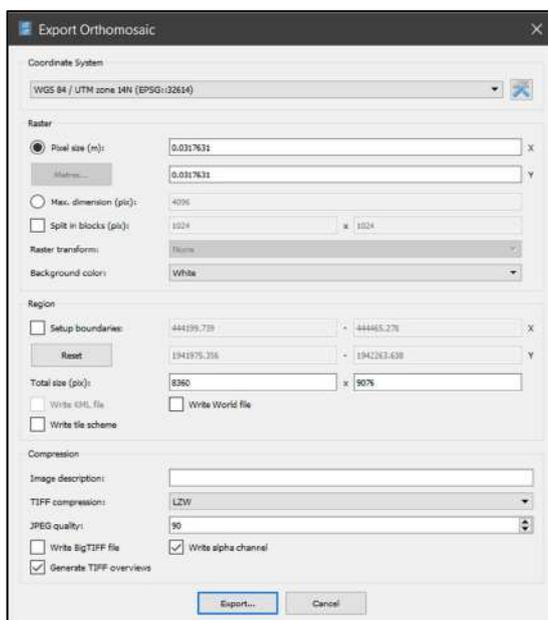
En esencia los parámetros serán similares a los parámetros de la generación del MDE. Referirse al manual de PhotoScan para más información.

EXPORTAR RESULTADOS

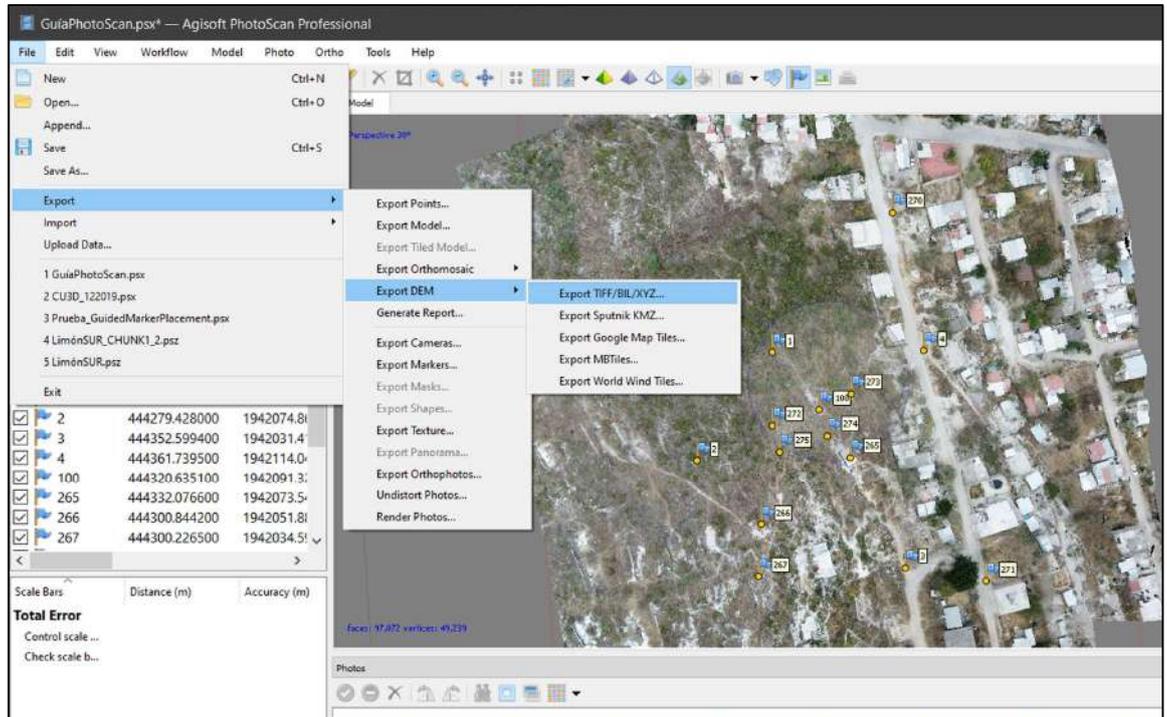
30. Para exportar modelos espaciales como MDE y ortofoto, el programa PhotoScan es compatible con la exportación de varios tipos de productos. Después de haber generado el MDE y la ortofoto en *Workflow*, para exportar en archivo TIFF ir a *Export JPEG/TIFF/PNG...* del comando *Export Ortomosaic* del menú *File/Export*.



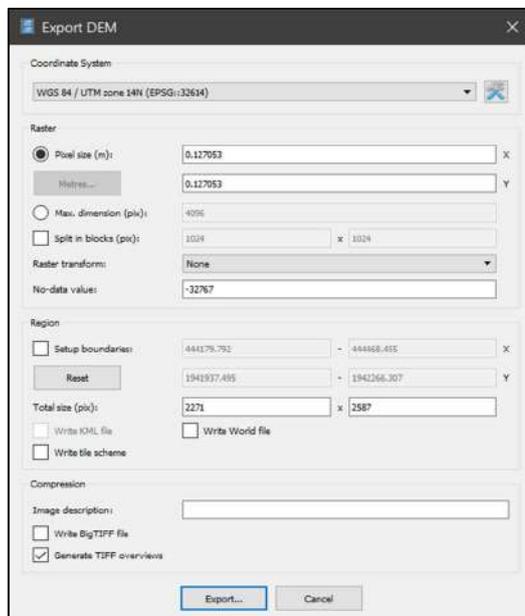
En la siguiente ventana especifique el Sistema de referencia de coordenadas con el que se guardará la ortofoto y dar click en *Export...*



Para exportar el MDE ir a *Export TIFF/BIL/XYZ...* del comando *Export DEM* del menú *File/Export*.



En la siguiente ventana especifique el Sistema de referencia de coordenadas con el que se guardará el DEM y dar click en *Export...*



Finalizados estos pasos, se habrán obtenido los modelos espaciales expuestos en el trabajo de investigación del que se deriva esta guía rápida.

REFERENCIAS

Agisoft PhotoScan. (03 de 12 de 2018). *<http://www.agisoft.com/>*. Obtenido de <http://www.agisoft.com/>: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf
Figuras obtenidas del programa Agisoft PhotoScan.