



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTOR: JUAN CARLOS SANI SANI

TEMA: VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA
ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL
MARCO DE REFERENCIA SIRGAS-ECUADOR

DIRECTOR: ING. ALEXANDER ROBAYO

CODIRECTOR: DR. ALFONSO TIERRA

SANGOLQUÍ, JUNIO 2015

CERTIFICACIÓN

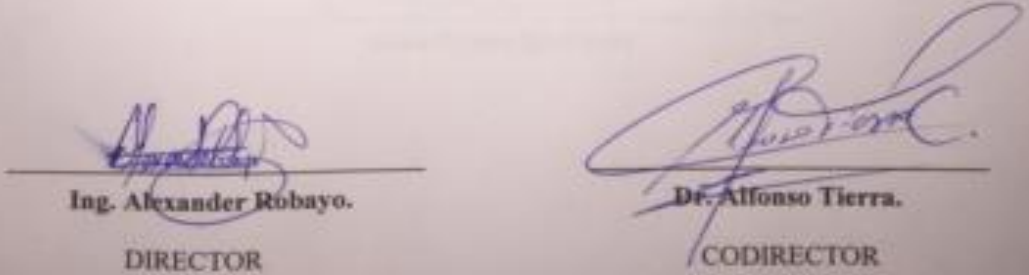
Ing. Alexander Robayo.

Dr. Alfonso Tierra.

Certifican:

Que el trabajo titulado **“VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS-ECUADOR”**, realizado por el Señor. JUAN CARLOS SANI SANI, ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Ing. Wilson Jácome, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil *de Acrobat (pdf)*.

Sangolquí, Junio 2015



Ing. Alexander Robayo.
DIRECTOR

Dr. Alfonso Tierra.
CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD


Juan Carlos Sani Sani

Declaro que:

El proyecto de grado denominado **“VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS-ECUADOR”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Junio 2015



Juan Carlos Sani Sani

AUTORIZACIÓN

Juan Carlos Sani Sani

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS – UAV PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA ESCALAS GRANDES REFERIDAS AL MARCO DE REFERENCIA SIRGAS-ECUADOR”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Junio 2015



Juan Carlos Sani Sani

DEDICATORIA

A mis padres, Carlos Sani y Emma Sani que con su ejemplo y dedicación supieron inculcar el respeto, honestidad y confianza en mí.

A mi padre, que me mostro siempre la importancia del trabajo, sin importar en el nivel que se desarrolle, gracias por su amor y apoyo incondicional.

A mi madre, una mujer excepcional que con su vida me mostro la grandeza de la humildad y el poder del amor de Dios.

A mis hermanas, que sin importar la distancia o el tiempo son una constante en mi vida.

A mi Abuelo, “Papi Juan”, que con su sabiduría y perseverancia me mostro que todo sacrificio tiene su recompensa y cada acción de nuestra vida siempre será para bien, si escuchamos a Dios.

Juan Carlos Sani

AGRADECIMIENTO

*“El principio de la sabiduría es el temor de Jehová;
Los insensatos desprecian la sabiduría y la enseñanza.”*

Proverbios 1:7

En primer lugar agradezco a Dios, por darme la vida y por ser mi amigo y confidente.

Gracias por las pruebas que pones en mi camino, porque forman mi carácter.

Gracias por la familia que me regalaste, porque son el pilar de mi vida.

Gracias por permitirme caer, para conocer el valor de la victoria.

Gracias por cada oración escuchada y respondida, porque me enseña a cumplir tu voluntad.

A mis padres, gracias por permitirme ser parte de su plan de vida.

A mis hermanas, Jenny, Karla y Katherine que a pesar de las diferencia son incondicionales.

A mis amigos y amigas, con los que compartimos esta aventura en medio de aulas y libros, mil gracias por compartir parte de sus vidas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I	1
PRESENTACIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5. METAS	3
1.6. ÁREA DE INFLUENCIA	3
1.7. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	3
1.8. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
CAPITULO II	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. SISTEMA DE REFERENCIA	5
2.1.1. SISTEMAS DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO	5
2.1.2. INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENTE SYSTEM - ITRS (SISTEMA TERRESTRE INTERNACIONAL DE REFERENCIA)	6
2.2. MARCO DE REFERENCIA	6
2.2.1. International Terrestrial Reference Frame - ITRF (Marco Terrestre Internacional de Referencia).....	6
2.2.2. Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS).....	7
2.2.3. Marco de referencia SIRGAS-ECUADOR.....	9

2.2.4. Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador (REGME).....	9
2.3. FOTOGRAMETRÍA	11
2.3.1. Fotogrametría Terrestre.....	12
2.3.2. Fotogrametría Aérea.....	12
2.3.3. Fotogrametría Analógica.....	12
2.3.4. Fotogrametría Analítica	12
2.3.5. Fotogrametría Digital	12
2.3.6. Proceso Fotogramétrico	13
2.4. IMAGEN DIGITAL.....	14
2.4.2. CALIDAD DE LA IMAGEN DIGITAL	16
2.5. SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO (UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS, UAS).....	17
2.5.1. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS	18
2.5.2. Clasificación de los UAV	19
2.5.3. Aplicaciones	21
2.6. TRIMBLE UAS UX5	22
2.6.1. Fuselaje	23
2.6.2. Plan de Vuelo	23
2.6.3. Características del sensor	24
2.6.4. Software de procesamiento	25
2.6.4.1. Trimble Business Center 3.40 (TBC).....	26
2.6.4.2. Inpho UAS Master 6.0	27
2.6.5. Legislación	28

CAPITULO III	30
METODOLOGÍA	30
3.1. GENERALIDADES.....	30
3.2. PLANIFICACIÓN DE VUELO (FASE 01).....	32
3.2.1. Parámetros de vuelo	32
3.2.2. Puntos de Control Horizontal /Vertical.....	33
3.2.2.1. RASTREO GNSS.....	34
3.2.2.2. NIVELACIÓN.....	36
3.3. VUELO (FASE 02)	37
3.3.1. Aerial Imaging	38
3.3.2. Descargar información	44
3.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	44
3.4.1. MÓDULO FOTOGRAMÉTRICO “TRIMBLE BUSINESS CENTER”	46
3.4.2. AJUSTE DE VUELO INPHO UAS MASTER	48
3.5. VALIDACIÓN DE LOS PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS	54
3.5.1. CONTROL HORIZONTAL	55
3.5.2. CONTROL VERTICAL	56
3.5.3. GEOMETRÍA DE OBJETOS	57
CAPITULO IV	58
RESULTADOS	58
4.1. VALIDACIÓN HORIZONTAL	58
4.2. GEOMETRÍA DE OBJETOS	66

4.3. VALIDACIÓN VERTICAL	68
CAPITULO V	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
5.1. CONCLUSIONES	73
5.2. RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los UAV por sus capacidades de vuelo.	20
Tabla 2. Parámetros del vuelo ESPE.....	33
Tabla 3. Resultado del procesamiento de los puntos de control del vuelo ESPE enlazadas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR época de referencia 2014.0.....	35
Tabla 4. Resultado del ajuste de la nivelación de la red de control para el vuelo ESPE.	37
Tabla 5. Tolerancia de cartografía para escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.	58
Tabla 6. Tolerancia máxima del mosaico ortorectificado para generar cartografía a escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.....	59
Tabla 7. Objeto mínimo a mapear para escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.....	59
Tabla 8. Diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.	60
Tabla 9. Diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.....	61
Tabla 10. Diferencia en distancia entre los puntos de validación GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.	62
Tabla 11. Diferencia en distancia entre los puntos de validación GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.	63

Tabla 12. Estadística descriptiva de los datos obtenidos al realizar la diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GCP GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.	64
Tabla 13. Estadística descriptiva de los datos obtenidos al realizar la diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GCP GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.	64
Tabla 14. Estadística descriptiva de los datos obtenidos al calcular la distancia entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente y con puntos de control.	65
Tabla 15. Resultado de la diferencia entre las medidas obtenidas sobre la fotografía ajustada con puntos de control y la fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.	66
Tabla 16. Resultado de la diferencia entre las medidas de área obtenidas sobre la fotografía ajustada con puntos de control y la fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.	66
Tabla 17. Precisión altimétrica en función al intervalo de curva para escalas grandes. .	68
Tabla 18. Diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 001.	69
Tabla 19. Diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 002.	70
Tabla 20. Análisis estadístico de la diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 001.	72
Tabla 21. Análisis estadístico de la diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 002.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Campus-Sangolquí Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.....	4
Figura 2. Sistemas de Referencias Geocéntrico.....	5
Figura 3. Ubicación de las estaciones SIRGAS95.....	8
Figura 4. Ubicación de las estaciones SIRGAS2000.....	8
Figura 5. Ubicación de las estaciones SIRGAS-CON.....	8
Figura 6. Red GNSS del Ecuador.....	10
Figura 7. Clasificación de la Fotogrametría.....	11
Figura 8. Definición de una imagen digital.....	15
Figura 9. Volumen de almacenamiento de una fotografía digital.....	16
Figura 10. Distribución de los elementos en un UAS (Unmanned Aircraft System.)	17
Figura 11. UAVs de (a) Ala fija y (b) Hélice.....	18
Figura 12. Clasificación de UAVs por el tipo de Aeronave y Despegue del equipo.....	19
Figura 13. Aplicaciones UAV.....	21
Figura 14. UX5 Aerial Imaging Solution.....	22
Figura 15. Dimensiones de la aeronave del sistema UX5.....	23
Figura 16. Tamaño del sensor de la cámara Sony NEX-5R.....	24
Figura 17. Tamaño del sensor de la cámara Sony NEX-5R.....	24
Figura 18. Cámara Sony NEX-5R con lente Voigtländer de 15 mm de longitud focal..	25
Figura 19. Interfaz de Software Trimble Business Center V 3.40.....	27
Figura 20. Flujo de trabajo en el software UAS Master.....	28
Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.....	31
Figura 22. Calculadora de vuelo online (http://uas.trimble.com/calculator).....	32
Figura 23. Ubicación Aproximada de la red de puntos de control para el vuelo ESPE.	33

Figura 24. Estación de monitoreo continuo GNSS-MET EPEC.	34
Figura 25. Rastreo de la red GNSS para puntos de control fotogramétrico.	35
Figura 26. Monografía del punto de control vertical PE28129-X.	36
Figura 27. Elaboración del plan de vuelo en la zona definida como Despegue/Aterrizaje.	38
Figura 28. Delimitación y parametrización del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.....	39
Figura 29. Delimitación y parametrización del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.....	40
Figura 30. Puntos de despegue y aterrizaje del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.....	41
Figura 31. Simulación del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.....	42
Figura 32. Checklist del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.	43
Figura 33. “Arm System” del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.....	44
Figura 34. Archivos necesarios para iniciar el ajuste fotogramétrico.....	45
Figura 35. Proceso de pinchado de puntos de control (GCP) en software TBC 3.30.....	47
Figura 36. Listado de archivos necesarios para el procesamiento de datos UAV en el Software INPHO UAS Master V6.0.....	48
Figura 37. Selección del sensor del UAS Trimble UX5 para el procesamiento de datos UAV en el Software INPHO UAS Master V6.0.....	49
Figura 38. Importación de fotografías aéreas del UAS Trimble UX5 en UAS Master. .	50

Figura 39. Importación del Archivo GNSS/IMU en formato .csv en UAS Master.....	50
Figura 40. Visualización de la generación de Strips en el Software UAS Master.....	51
Figura 41. Módulo “Georeferencing” en el Software UAS Master.	52
Figura 42. Resultado de los residuales del ajuste de la misión de vuelo en el módulo “Georeferencing” en el Software UAS Master.	53
Figura 43. Módulo “Surface and Ortho Generation” en el software UAS Master.	54
Figura 44. Herramienta para restitución estereoscópica en el Software UAS Master....	54
Figura 45. Distribución de los 70 puntos de validación sobre el mosaico ortorectificado.....	55
Figura 46. Línea de nivelación longitudinal para la validación del MDS.	56
Figura 47. Medida de área del objeto N° 10 sobre (A) Fotografía ajustada con puntos de control (B) Fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.	67
Figura 48. Línea de nivelación 001 sobre el MDS del vuelo ESPE.	69
Figura 49. Perfil longitudinal de la Línea de nivelación 001 sobre el MDS del vuelo ESPE.....	70
Figura 50. Línea de nivelación 002 sobre el MDS del vuelo ESPE.	71
Figura 51. Perfil longitudinal de la Línea de nivelación 002 sobre el MDS del vuelo ESPE.....	71

NOMENCLATURA UTILIZADA

GCP. – Puntos de control por sus siglas en inglés (Ground Control Points),

GNSS. – Sistema de Navegación Global por sus siglas en inglés (Global Navigation Satellite System).

GPS. – Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés (Global Positioning System).

MDT. – Modelo Digital de Terreno, representación del suelo desnudo sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios.

MDS. – Modelo digital de Superficie, se refiere a la superficie de la tierra e incluye todos los objetos que esta contiene.

SIRGAS. – Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

UAV. – Vehículo Aéreo no Tripulado por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle).

UAS. – Sistemas Aéreos no Tripulados por sus siglas en inglés (Unmanned Aircraft System).

RESUMEN

El avance acelerado de las tecnologías Geoespaciales en la actualidad, permiten desarrollar aplicaciones cada vez más precisas y con un costo menor, que al utilizar metodologías tradicionales. Por ejemplo, el avance de los UAS (Sistemas Aéreos No Tripulados) equipados con cámaras que poseen sensores más sensibles capaces de capturar escenas en formato digital de igual calidad que cámaras fotogramétricas, alcanzando precisiones sub métricas de forma más asequible. El objetivo de este trabajo es generar y validar información espacial para Ortofotos a escalas grandes enlazadas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR época de referencia 2014.00. Se utilizó el UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado) de la empresa Instrumental y Óptica de marca TRIMBLE modelo UX5 con el que se sobrevoló la zona de estudio; para el control posicional la estación GNSS-MET EPEC se definió como base. Los resultados preliminares fueron una ortofotografía capaz de generar cartografía 1:500 y un MDS (Modelo digital de Superficie). En este trabajo se presenta la validación horizontal de los productos fotogramétricos obtenidos a partir de tecnología UAV.

PALABRAS CLAVE

- **CARTOGRAFÍA.**
- **UAV (VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO).**
- **VALIDACIÓN**
- **MARCO DE REFERENCIA**
- **SIRGAS-ECUADOR**

SUMMARY

The accelerated geospatial technologies allow the development of precise applications at lower cost than using traditional methodologies. The development of UAS (Unmanned Aircraft Systems) technology allows the advance of new applications because its high resolution helps to improve applications such as local photogrammetry. The objective of this work is to generate and validate spatial information to Orthophotos on large scales linked to the framework SIRGAS reference time-ECUADOR 2014.00. The UAV (Unmanned Aerial Vehicle) from the Instrumental and Optics Company brand TRIMBLE model UX5 was used to fly and study the area of interest. The positional control was set to GNSS-MET EPEC to obtain precise coordinates. Preliminary results were an orthophotography capable of generating mapping 1: 500 and DSM (digital surface model). In this work the horizontal validation of photogrammetric products obtained from UAV technology is presented.

KEYWORDS

- **MAPPING.**
- **UAV (UNMANNED AERIAL VEHICLE) .**
- **VALIDATION**
- **FRAME OF REFERENCE**
- **SIRGAS - ECUADOR**

CAPITULO I

PRESENTACIÓN

1.1. Antecedentes

Las plataformas aéreas no tripuladas son empleadas en numerosas aplicaciones. Los UAVs (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) al ser dispositivos controlados por un mando remoto, permiten obtener información de lugares inaccesibles. Se usan mayoritariamente en aplicaciones de entretenimiento, seguridad y son una opción viable para fotogrametría.

En la actualidad los UAVs alojan dispositivos sensoriales que permiten coleccionar fotografías y videos de alta definición, los cuales mediante el proceso fotogramétrico digital pueden ser ortorectificados y así obtener mediciones aéreas de espacios urbanos o rurales, composición de mosaicos, cartografía base en escalas grandes. Es por ello que varios autores han incursionado en el análisis y desarrollo de esta tecnología; se sita entre los siguientes:

- ✓ Estudio de viabilidad de aplicaciones de observación aérea con UAVs y elaboración de un plan de empresa, Cataluña (Gallardo, 2007).
- ✓ Producción de productos cartográficos: MDT y ortofoto a partir de imágenes Capturadas por un vehículo UAV (Fernández, 2010).
- ✓ Estudio y Diseño de Metodología con Técnicas GPS para la actualización de la Cartografía Catastral del Municipio Palavecino (Venezuela) (Camargo, 2011).

- ✓ Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones (Barrientos, *et al.*, 2007).
- ✓ Teledetección Aérea no Tripulada (“Unmanned Aircraft System”) (UAS), Ventajas y Aplicaciones. CENIA-Chile (Castro, 2012).
- ✓ Demonstrating UAV-acquired real-time thermal data over fires. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (Ambrosia *et al.*, 2003).

1.2. Justificación

El avance acelerado de las tecnologías Geoespaciales en la actualidad, permiten desarrollar aplicaciones cada vez más precisas y con un costo menor, que al utilizar metodologías tradicionales. El avance de los sistemas aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras que poseen sensores más sensibles capaces de capturar escenas en formato digital de igual calidad que cámaras fotogramétricas, alcanzando precisiones sub métricas de forma más asequible. Convirtiéndose en una opción viable para la producción de información espacial a escalas grandes referida al Marco de referencia SIRGAS-ECUADOR.

1.3. Objetivo General

Generar y validar información espacial para ortofotos y Modelo Digital de Superficie (MDS) a escalas grandes obtenidos mediante UAVs, enlazadas al marco de referencia nacional.

1.4. Objetivos Específicos

- Obtener información base para la generación de fotogrametría aérea mediante tecnología UAV.
- Realizar el control de calidad horizontal y vertical de los productos obtenidos.
- Definir la escala de trabajo máxima para los productos fotogramétricos.

1.5. Metas

- Procesar las fotografías aéreas obtenidas con tecnología UAV.
- Generar un mosaico Ortorectificado del área de estudio.
- Producir un Modelo Digital de Superficie (MDS).
- Obtener una nube de puntos del mosaico Ortorectificado en formato .LAS (LIDAR)
- Artículo Técnico.

1.6. Área de Influencia

El área de influencia del estudio está enfocada a nivel nacional, debido a la demanda de información geoespacial en escalas grandes por parte de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD's) como el insumo principal para sus Planes de Ordenamiento Territorial.

1.7. Localización Geográfica

El área de estudio comprende 80 km², los mismos que abarcan el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas ubicado en la ciudad de Sangolquí en la provincia de Pichincha a 30 km Sur-Oeste de la ciudad de Quito.



Figura 1. Campus-Sangolquí Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Fuente: Google Earth Pro 6.2

1.8. Definición del problema

El Ecuador en este momento está sufriendo una transformación en la producción y gestión de geo información, para ello inició con la modernización de su marco de referencia Nacional, dejando atrás el sistema PSAD56 el cual en la actualidad es obsoleto, ya que no cubre las necesidades de los usuarios, pues el avance de la tecnología GNSS obligó a la creación de sistemas de referencia dinámicos y referidos a una superficie de referencia con un DATUM geocéntrico, susceptible a cambios temporales.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. SISTEMA DE REFERENCIA

Un *Sistema de Referencia* es un conjunto de prescripciones y convenciones junto con el modelado requerido para definir el origen, la escala, la orientación y el tiempo de evolución de un Sistema de Referencia Terrestre convencional el cual permite ubicar las coordenadas de puntos en el espacio. (Service International Earth Rotation, 2013)

2.1.1. Sistemas de Referencia Geocéntrico

Estos Sistemas están referidos a datums geocéntricos, los cuales están asociados a elipsoides globales, que tienen su origen en el centro de masas de la Tierra.

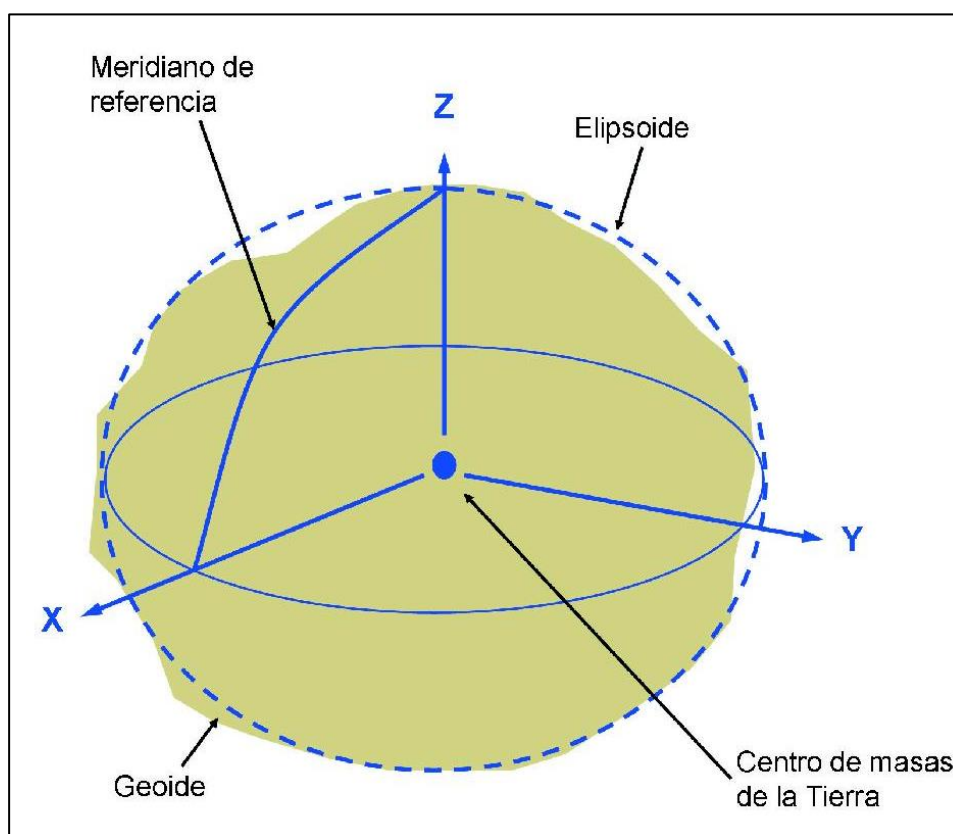


Figura 2. Sistemas de Referencias Geocéntrico.
Fuente: (Atlas Global de la Región de Murcia , 2015).

2.1.2. International Terrestrial Reference System - ITRS (Sistema Terrestre Internacional de Referencia)

Es un sistema de referencia espacial que gira conjuntamente con la Tierra en su movimiento diurno en el espacio. En tal sistema, las posiciones de los puntos anclados en la superficie sólida de la Tierra tienen coordenadas que se someten a pequeñas variaciones con el tiempo, debido a los efectos geofísicos (tectónicos o deformaciones de marea). (ITRF, 2014)

2.2. MARCO DE REFERENCIA

El *Marco de referencia* es la materialización de coordenadas de puntos en el espacio referidas a un Sistema de Referencia.

2.2.1. International Terrestrial Reference Frame - ITRF (Marco Terrestre Internacional de Referencia)

Es un conjunto de puntos materializados en la superficie terrestre con coordenadas perfectamente determinadas en un sistema de coordenadas dado, cartesianas o geodésicas, conectado a un ITRS. Además está constituido por técnicas o medidas aplicadas en las observaciones y por los métodos de cálculo para la obtención de los parámetros. (Santacruz, 2010)

Este marco de referencia materializa el ITRS, a través de aprox. 900 estaciones ubicadas en la superficie terrestre, las mismas que cuentan con coordenadas definidas para una época específica así como también sus variaciones en el tiempo (velocidades). (Zurita, 2011)

Un sistema de referencia no tiene aplicación práctica si no es mediante la utilización de un marco de referencia. (Sanchez, 2004)

2.2.2. Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)

SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), es un marco del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS: International Terrestrial Reference System) para América, su realización es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF: International Terrestrial Reference Frame). (SIRGAS, 2015)

La primera realización SIRGAS95 (Figura 3) corresponde al ITRF94, época 1995.4 y está dada por una red GPS de alta precisión con 58 estaciones distribuidas sobre América del Sur. Esta red fue reocupada en el año 2000, extendiéndose a los países del Caribe y de Centro y Norte América. La segunda realización SIRGAS2000 (Figura 4) incluye 184 estaciones y corresponde al ITRF2000, época 2000.4. La precisión de las coordenadas de estas dos realizaciones está entre $\pm 3 \dots \pm 6$ mm. Actualmente, SIRGAS está materializado por una red de estaciones GNSS de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión (asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (velocidades de las estaciones). La red SIRGAS-CON de funcionamiento continuo (figura 5) está compuesta en la actualidad por cerca de 250 estaciones, de las cuales 48 pertenecen a la red global del IGS. La operabilidad de SIRGASCON se fundamenta en la contribución voluntaria de más de 50 entidades latinoamericanas, que han instalado las estaciones y se ocupan de su operación adecuada, los países latinoamericanos están mejorando sus marcos geodésicos de

referencia mediante la instalación de un número mayor de estaciones GNSS de operación continua y, teniendo presente que dichas estaciones deben ser integradas consistentemente en el marco de referencia continental. (SIRGAS, 2011)

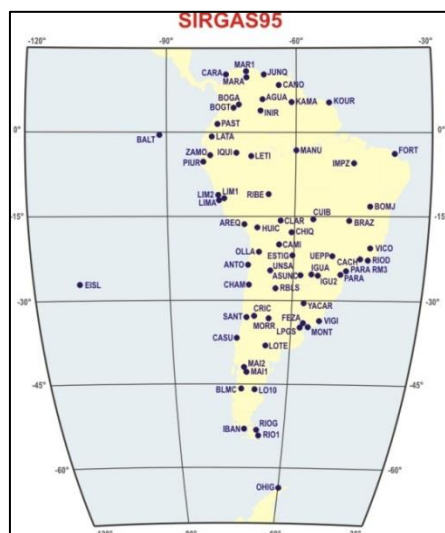


Figura 3. Ubicación de las estaciones SIRGAS95.

Fuente: <http://www.sirgas.org>.

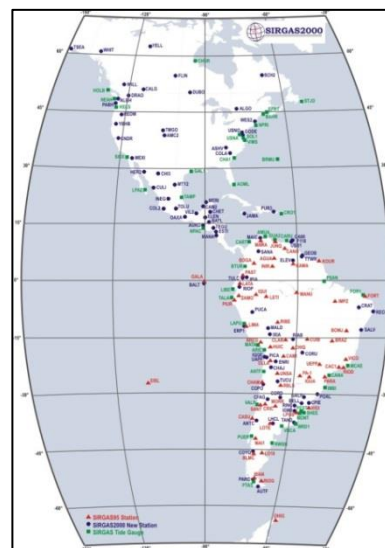


Figura 4. Ubicación de las estaciones SIRGAS2000.

Fuente: <http://www.sirgas.org>.

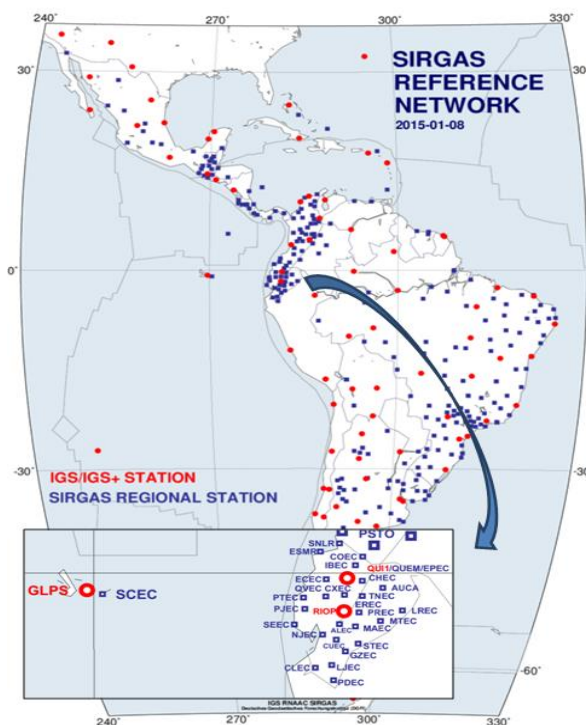


Figura 5. Ubicación de las estaciones SIRGAS-CON.

Fuente: <http://www.sirgas.org>.

2.2.3. Marco de referencia SIRGAS-ECUADOR

SIRGAS – ECUADOR constituye la densificación de SIRGAS en el Ecuador, a través de estaciones geodésicas de alta precisión enlazadas a la realización SIRGAS - CON, es decir al IGB08. Son parte de SIRGAS – ECUADOR, la Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador (REGME) y la RED Nacional GPS del Ecuador (RENAGE). (Zurita, 2011)

La adopción del marco geodésico SIRGAS-ECUADOR se encuentra en proceso de adopción.

2.2.4. Red GNSS de Monitoreo continuo del Ecuador (REGME).

El avance acelerado de la tecnología satelital y su uso en diferentes aplicaciones, han obligado al IGM a asumir el reto de implantar una red geodésica que permita el monitoreo continuo de información GNSS en el territorio nacional, que provea de la plataforma de georeferenciación ágil y precisa, esta plataforma se denomina Marco de Referencia. (Zurita, 2011)

Con la finalidad de mantener actualizado el Marco Geocéntrico de Referencia Ecuatoriano y ampliar el servicio de posicionamiento satelital GNSS a nivel nacional, el IGM, implementó un conjunto de estaciones (receptores GNSS doble frecuencia con sus respectivas antenas geodésicas) de monitoreo continua, enlazadas a SIRGAS. Actualmente se encuentra conformada por 33 estaciones distribuidas de manera homogénea a lo largo y ancho del territorio nacional. (Figura 6)

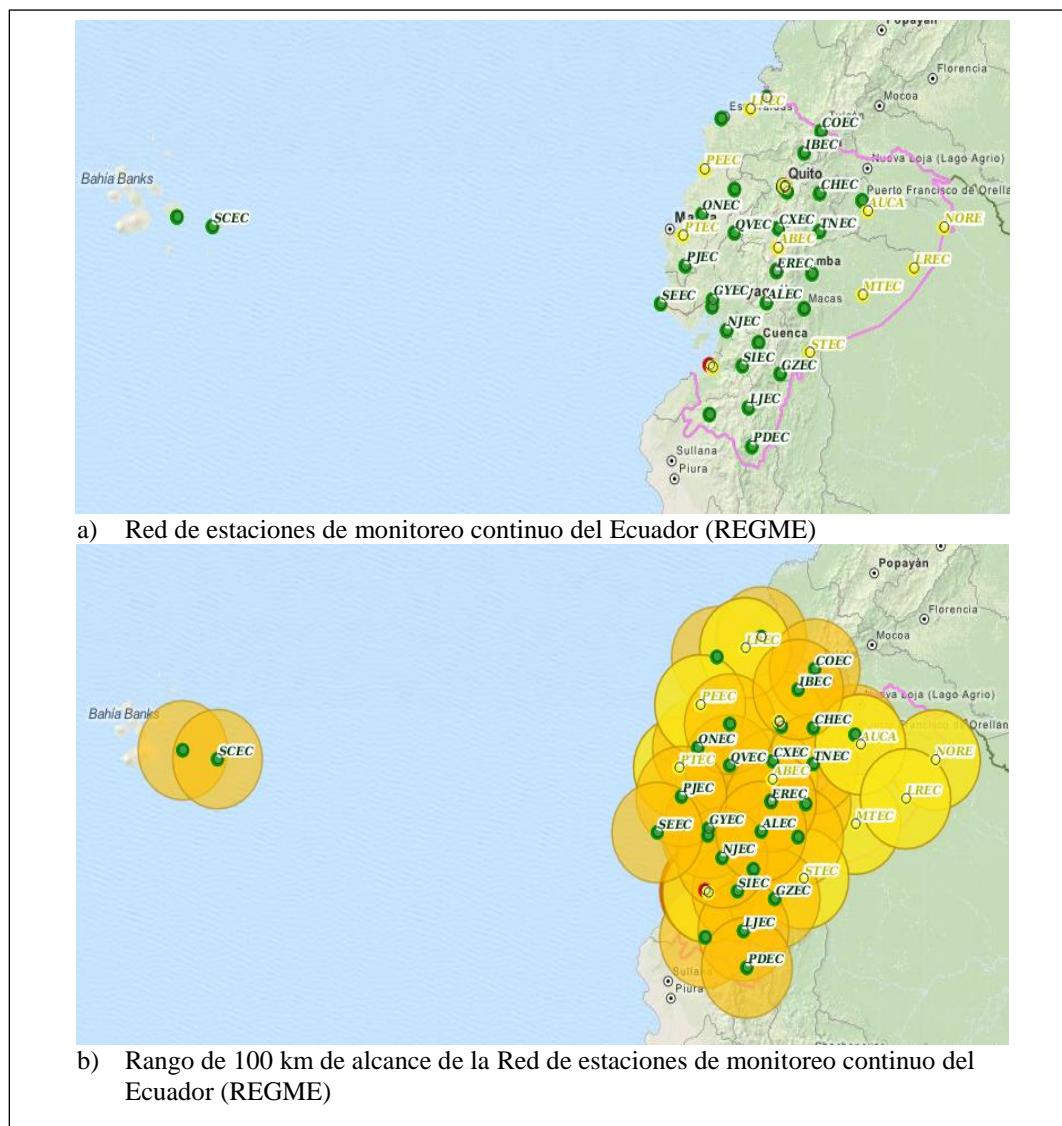


Figura 6. Red GNSS del Ecuador.

Fuente: http://www.geoportaligm.gob.ec/visor_regme/

Esta red se constituye en el marco geodésico de referencia nacional y proporciona a los usuarios de información georeferenciada, con alta precisión compatible con los sistemas satelitales de navegación global para la realización de trabajos geodésicos, topográficos, obras de ingeniería, mapeo, geofísica, demarcación, prospección minera y petrolera, entre otros. (Cisneros, 2013)

2.3. FOTOGRAMETRÍA

Según Bonneval, “*La fotogrametría se define como “la técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto”*”. (Valero, Ribera, & Bellver, 2004, pág. 63)

Una definición más actualizada que nos da la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) “*Es el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos*”. Esta última definición es más amplia, abarcando técnicas modernas, y eliminando casi las diferencias existentes entre la Fotogrametría y la Teledetección. (Sánchez, 2006)

La fotogrametría puede ser clasificada en dos ramas; la primera, por la posición de toma de fotografía capturada y la segunda, por el tipo de captura y procesamiento de las fotografías. (Figura 7)

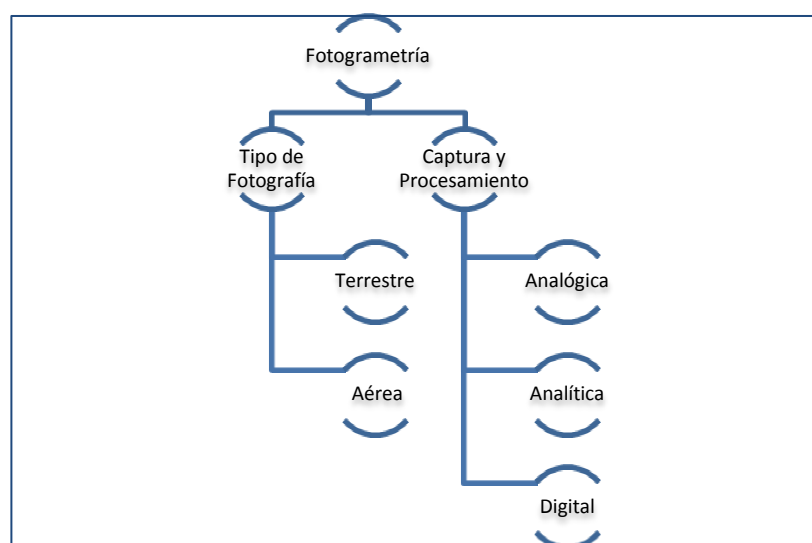


Figura 7. Clasificación de la Fotogrametría.

2.3.1. Fotogrametría Terrestre

Tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología, se basa en el principio de la toma de fotografías horizontales en superficie; en donde la posición de la cámara y el objeto es conocida.

2.3.2. Fotogrametría Aérea

Es la que utiliza fotografías verticales tomadas desde una cámara o sensor calibrado, ubicada en una plataforma aérea ya sea tripulada o no.

2.3.3. Fotogrametría Analógica

Está basada en la utilización de equipos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realiza la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado. Para la obtención de mapas, con información altimétrica. Se realizaba con el principio de la marca flotante.

2.3.4. Fotogrametría Analítica

Con la fusión de restituidores analógicos y ordenadores se crea al restituidor analítico, optimizando los tiempos y recursos. Posibilitando obtener información en programas de tipo CAD.

2.3.5. Fotogrametría Digital

El avance tecnológico posibilitó el salto a la fotogrametría digital, ya que en la actualidad se cuenta con hardware (computadores, sensores, cámaras digitales) de mejor resolución con mayor cantidad de memoria de procesamiento y almacenamiento;

permitiendo un desarrollo de software para el tratamiento de fotografías aéreas de mayor fiabilidad, obteniendo mosaicos ortorectificados y modelos digitales de terreno 3D en formato raster o vectorial.

La fortaleza de la salida de productos digitales, es su utilización, como información base para la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.3.6. Proceso Fotogramétrico

Este proceso se realiza en cuatro pasos bien diferenciados:

- **Orientación Interna:** Es la reconstrucción de la forma del haz perspectivo o lo que es lo mismo, reconstrucción de los movimientos de la cámara con la que se obtiene la imagen con la ayuda datos internos. En el caso de una fotografía, se requiere conocer la distancia focal entre otros parámetros.
- **Orientación Relativa:** Determinación de la posición relativa de un haz respecto a otro, de tal forma que las intersecciones de puntos homólogos en la fotografía determinen los puntos del objeto.
- **Orientación Absoluta:** Colocación y escalado de todo el bloque fotogramétrico con el apoyo de puntos de control referidos a un sistema de coordenadas terrestre.
- **Restitución:** Determinación e identificación de pares estereoscópicos con los puntos de objetos foto identificables y extracción de detalles altimétricos y planimétricos.

Estos cuatro pasos constituyen el método general de la Fotogrametría. Se incidirá más detalladamente sobre estas fases y de una forma más concreta y aplicada en el presente tema. (Sánchez, 2006)

2.4. IMAGEN DIGITAL

Una imagen digital se puede asimilar a una matriz de n filas y m columnas. A cada celda de la matriz se le denomina pixel y esta representa una superficie que es función de su tamaño (Δx , Δy). A cada pixel le corresponde uno o más valores digitales (número digital o valor digital “Nd”). (Figura 8)

El número digital puede representar información de diversa naturaleza, así puede ser proporcional a las características físicas del área (radiancia, reflectividad, transmisividad, emisividad) o bien representar los valores resultantes de la manipulación de la información original mediante técnicas de análisis de imágenes. Los números digitales definen una matriz de carácter multidimensional en función de las capas de información almacenadas (bandas o canales). Entre las imágenes más frecuentemente empleadas se encuentran las imágenes monocanal: imágenes binarias (blanco/negro) y las imágenes pancromáticas o monocromáticas; las imágenes de tres canales como las imágenes en color (un canal para cada color básico -rojo, verde, azul-) y las imágenes en falso color; y, por último, las imágenes multicanal como las imágenes multispectrales representadas por más de tres pseudocolores (número de bandas pueden ir de 1 a 14). (Perez, 2001)

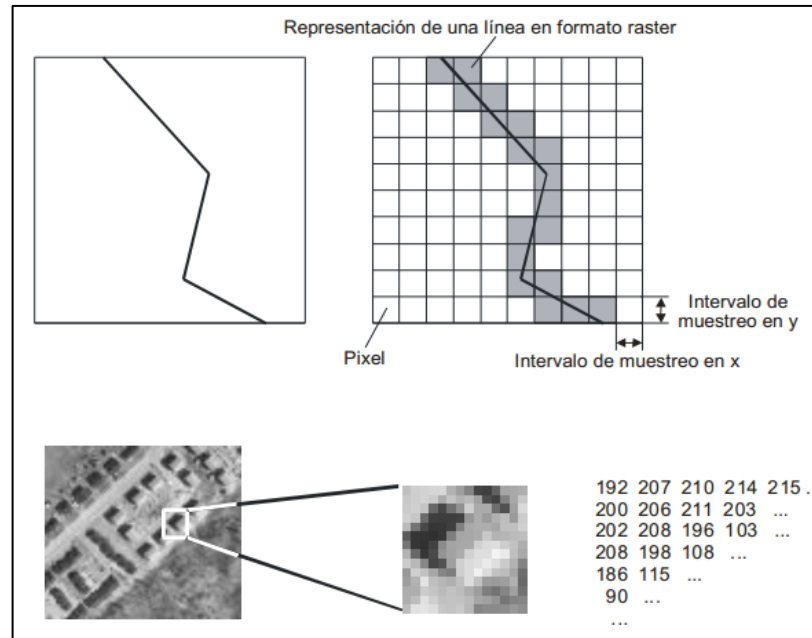


Figura 8. Definición de una imagen digital.

Fuente: (García, 2010)

2.4.1. Tipo de Imagen Digital

Imágenes monocanal (1 banda):

- Binarias (dos valores únicos 0 y 1) – Imágenes de 1 bit – . 8 píxeles/byte
- Pancromáticas (niveles digitales entre 0 y 255) –Imágenes de 8 bits- . 1 byte/pixel

Imágenes multicanal (más de 1 banda):

- Imágenes en color real – 3 canales RGB/HSI ó 4 canales CMYK-. Imágenes de 16.7 millones de colores (24 bits = 8 bits * 3 canales). 3 bytes/pixel.
- Imágenes multispectrales –más de 3 canales. Típicas de sensores instalados en satélites.

- Imágenes hiperespectrales –elevado número de canales. Típicas de sensores instalados en satélites o aerotransportados.

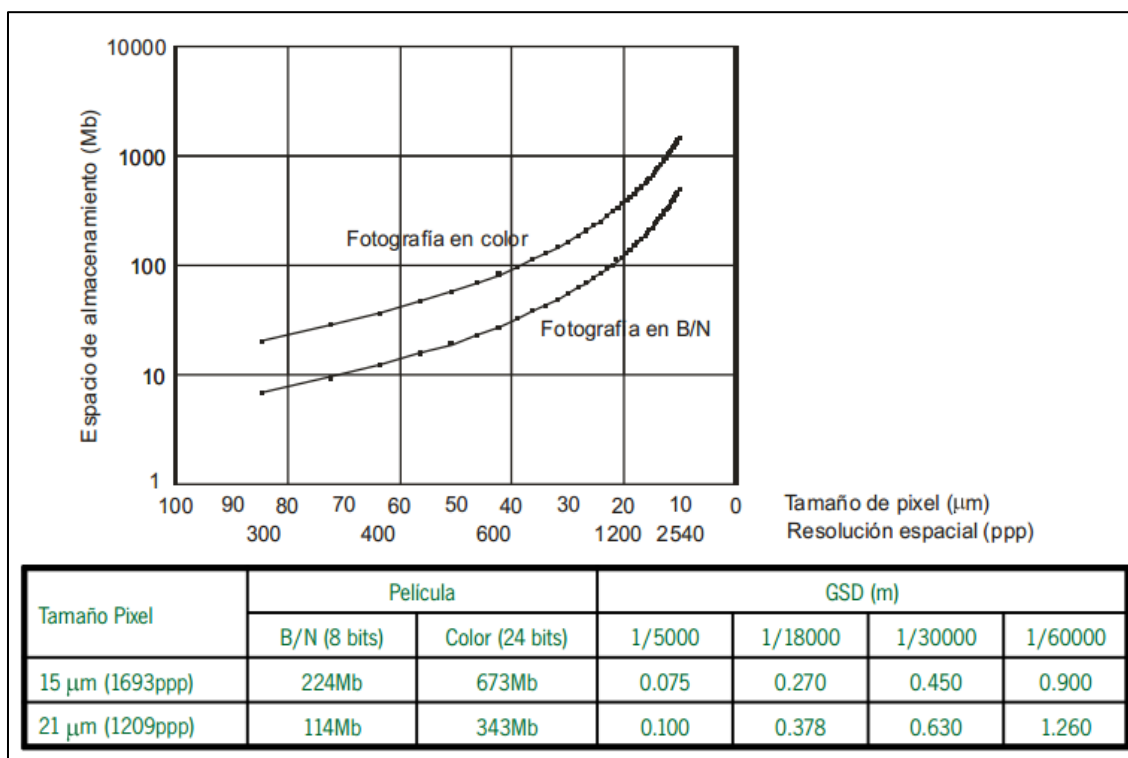


Figura 9. Volumen de almacenamiento de una fotografía digital.

Fuente: (García, 2010)

2.4.2. Calidad de la Imagen Digital

Un factor fundamental es el tamaño del píxel empleado en la digitalización. Es importante buscar un equilibrio entre el tamaño del píxel y el volumen del archivo de la imagen digital. El tamaño de píxel proyectado sobre el terreno se conoce como GSD – ground sample distance- o surfel (surface x element), el GSD depende del tamaño de la digitalización y de la escala de la imagen.

2.5.SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO (UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS, UAS)

Un UAS es un sistema formado por un conjunto de elementos que posibilitan el vuelo de una aeronave no tripulada. Los elementos implicados en estos sistemas determinarán diferentes tipos de plataformas UAS. Es decir, tipo de estructura aérea seleccionada, aviónica instalada a bordo, la estación de control utilizada y la forma en que se realice el enlace de datos, etc. conformarán diferentes tipos de arquitecturas UAS. (Acosta, 2011)

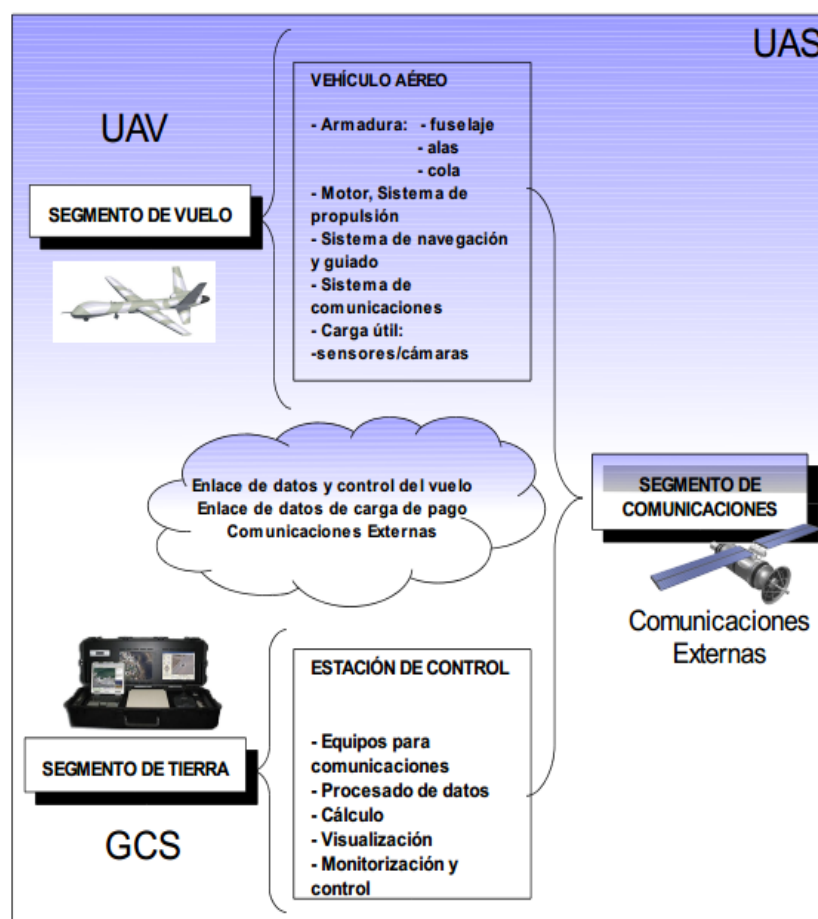


Figura 10. Distribución de los elementos en un UAS (Unmanned Aircraft System.)

Fuente: (Acosta, 2011)

2.5.1. Vehículos Aéreos no Tripulados

Un UAV, de sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle. Por definición, es un vehículo aéreo no tripulado reutilizable, capaz de mantener un vuelo controlado y sostenido. Esta definición es la que separa los UAV de los misiles. (Rovira, 2011)

Un UAV es una aeronave sin piloto a bordo que puede ser controlado de forma remota o volar de forma automática mediante planes de vuelo pre-programados. Los UAVs se han utilizado mayoritariamente con fines militares. Sin embargo, su enorme potencial ha conducido a ser explotados en un amplio rango de aplicaciones civiles. (Acosta, 2011)

En la actualidad los UAVs alojan dispositivos sensoriales que permiten coleccionar fotografías y videos de alta definición, los cuales mediante el proceso fotogramétrico digital pueden ser ortorectificados y así obtener mediciones aéreas de espacios urbanos o rurales, composición de mosaicos, cartografía base en escalas grandes.

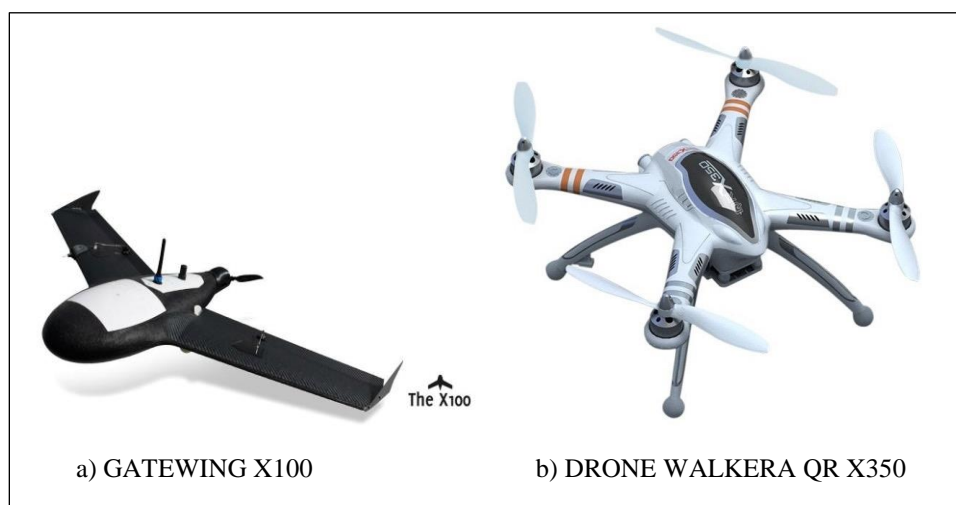


Figura 11. UAVs de (a) Ala fija y (b) Hélice.

2.5.2. Clasificación de los UAV

A la hora de establecer una clasificación para los UAV se pueden utilizar diferentes criterios. Tal vez el más simple sea el que se basa en el tipo de aeronave del UAV (Figura 12). De acuerdo a éste pueden distinguirse a aquellas de despegue vertical y las que no lo son, estando dentro de las primeras las de ala rotativa o hélice (helicópteros y quad-rotors entre otros), los de ala flexible (parapentes, ala delta) y los auto-sustentados (dirigibles y globos). Dentro de los de despegue no vertical, se encuentran los de ala fija (aeroplanos). (Barrientos, Cerro, Gutiérrez, Martín, Martínez, & Rossi, 2007)

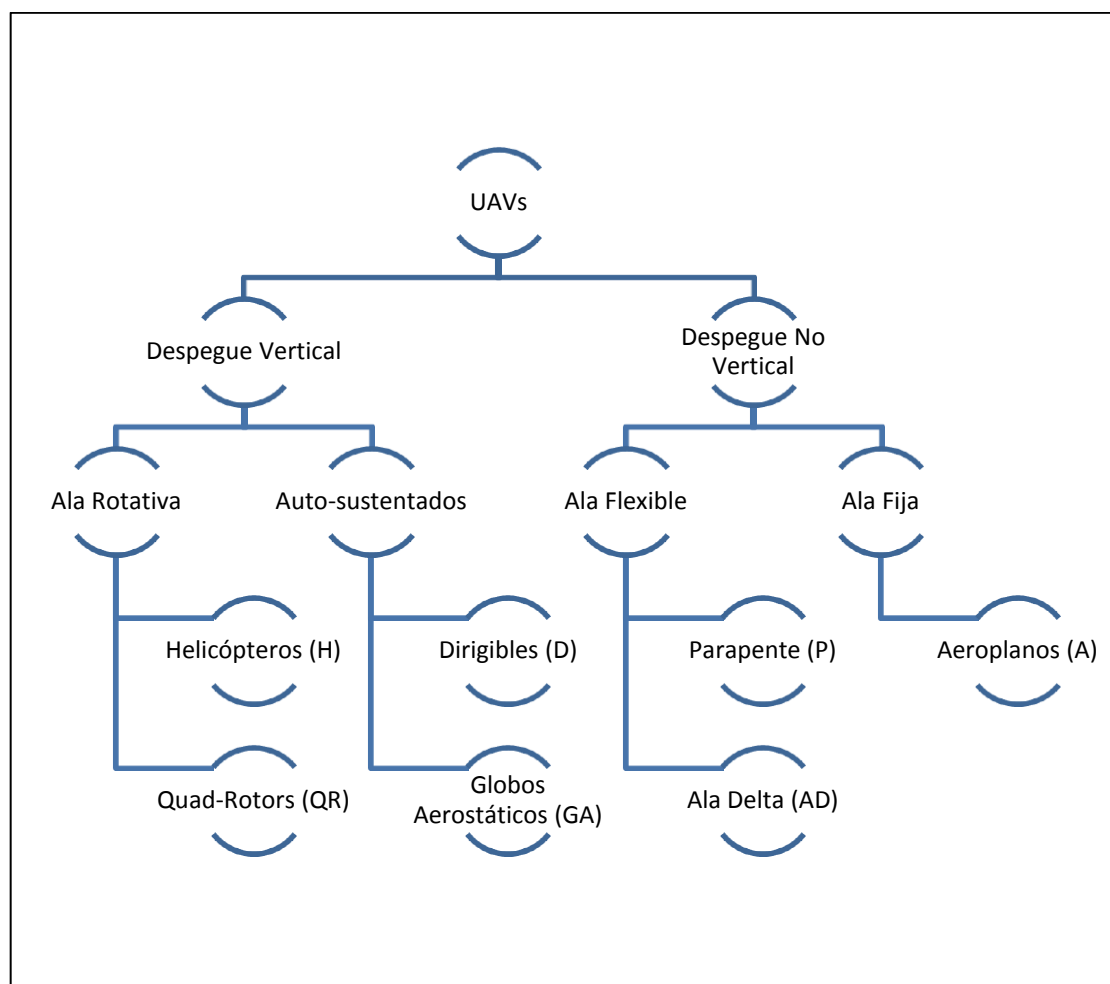


Figura 12. Clasificación de UAVs por el tipo de Aeronave y Despegue del equipo.

Fuente: (Barrientos, Cerro, Gutiérrez, Martín, Martínez, & Rossi, 2007)

La Asociación Internacional de Vehículos Aéreos no Tripulados (AUVSI, Por sus siglas en Ingles) clasifica los UAVs por sus capacidades como:

- Alcance
- Altitud
- Autonomía
- Carga Máxima al despegar

Hay que indicar que esta clasificación abarca todas las aplicaciones de los UAV, tanto civiles como militares, siendo estas últimas la mayoría. La mayor parte de los UAV actuales se encuentran dentro de la categoría Mini y Alcance Medio como se puede observar en la Tabla 1, siendo, el vehículo más frecuentemente utilizado el aeroplano.

Tabla 1.

Clasificación de los UAV por sus capacidades de vuelo.

Categoría	Acrónimo	Alcance (km)	Altitud de vuelo (m)	Autonomía (horas)	Carga máxima en despegue (kg)	Tipo de aeronave
Micro	μ(Micro)	< 10	250	1	< 5	H,A,otros
Mini	Mini	< 10	150 300 ^a	< 2	< 30	H,A, P, Otros
Alcance cercano	CR	10 a 30	3.000	2 a 4	150	H,A,P,Otros
Alcance corto	SR	30 a 70	3.000	3 a 6	200	A,Otros
Alcance medio	MR	70 a 200	5.000	6 a 10	1.250	A, Otros
Altitud baja Penetración profunda	LADP	> 250	50 9.000 ^a	0,5 a 1	350	A
Autonomía media	MRE	> 500	8.000	10 a 18	1.250	A,H
Autonomía alta Altitud baja	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30	A
Autonomía alta Altitud media	MALE	> 500	14.000	24 a 48	1.500	A,H
Autonomía alta Altitud alta	HALE	> 2000	20.000	24 a 48	12.000	A
Combate	UCAV	aprox. 1500	10.000	aprox. 2	10.000	H,A
Ofensivo	LETH	300	4.000	3 a 4	250	A
Señuelo	DEC	0 a 500	5.000	< 4	250	A,H
Estratosférico	STRATO	> 2000	Entre 20.000 y 30.000	> 48	ND (no disponible)	A
Exo-estratosférico	EXO	ND	> 30.000	ND	ND	A

Fuente: Adaptado de (Bento, 2008)

2.5.3. Aplicaciones

Si bien fue en el sector militar donde surgieron los UAV y el que ha impulsado su desarrollo, desde hace 15 años han surgido diferentes aplicaciones civiles, que han ampliado el interés, la investigación y el desarrollo de estos sistemas, a la vez que han originado nuevos requisitos en su operatividad, y generando un mayor espectro de sistemas. (Barrientos, Cerro, Gutiérrez, Martín, Martínez, & Rossi, 2007)

Algunos ejemplos concretos son misiones en la gestión en la lucha contra incendios, en servicios para agricultura, seguridad, arquitectura, etc.

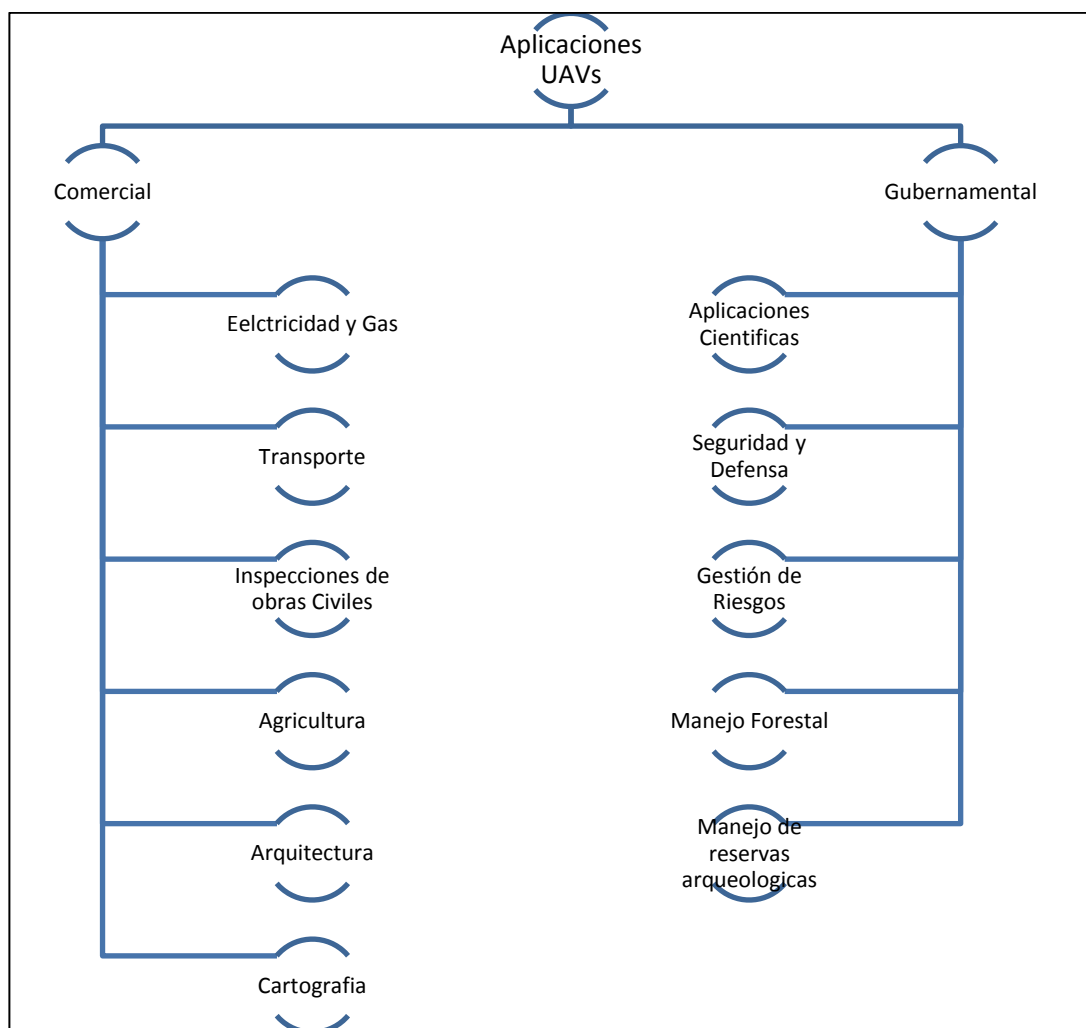


Figura 13. Aplicaciones UAV

2.6. TRIMBLE UAS UX5

El uso de sistemas aéreos no tripulados (UAS por sus siglas en inglés) para generar cartografía catastral usando técnicas fotogramétricas, proporciona una herramienta revolucionaria para la adquisición de datos. Trimble ha creado un UAS denominado “Aerial Imaging Solutions”, permitiendo la obtención de grandes cantidades de datos (varias Hectáreas) en tiempos inferiores a una hora. Además, de la integración de software de procesamiento de datos específico para UAVs, logrando la generación de productos fotogramétricos de alta calidad.

El sistema “UX5 Aerial Imaging Solution” de Trimble (Figura 14) es una herramienta ideal e innovadora que puede ser utilizada para la topografía, minería, industria de petróleo y gas, así como en aplicaciones ambientales (tales como monitorización de catástrofes naturales), mediciones topográficas, monitorización de progreso, cálculo de volúmenes, análisis de desastres y construcciones y muchas otras aplicaciones. (TRIMBLE, 2013)



Figura 14. UX5 Aerial Imaging Solution.

2.6.1. Fuselaje

El sistema “UX5 Aerial Imaging Solution” cuenta con una aeronave con las siguientes características:

- Tipo: Ala Fija
- Envergadura: 100 cm
- Peso: 2,5 Kg (5,5 lb)
- Dimensiones: 100 x 65 x 10 cm

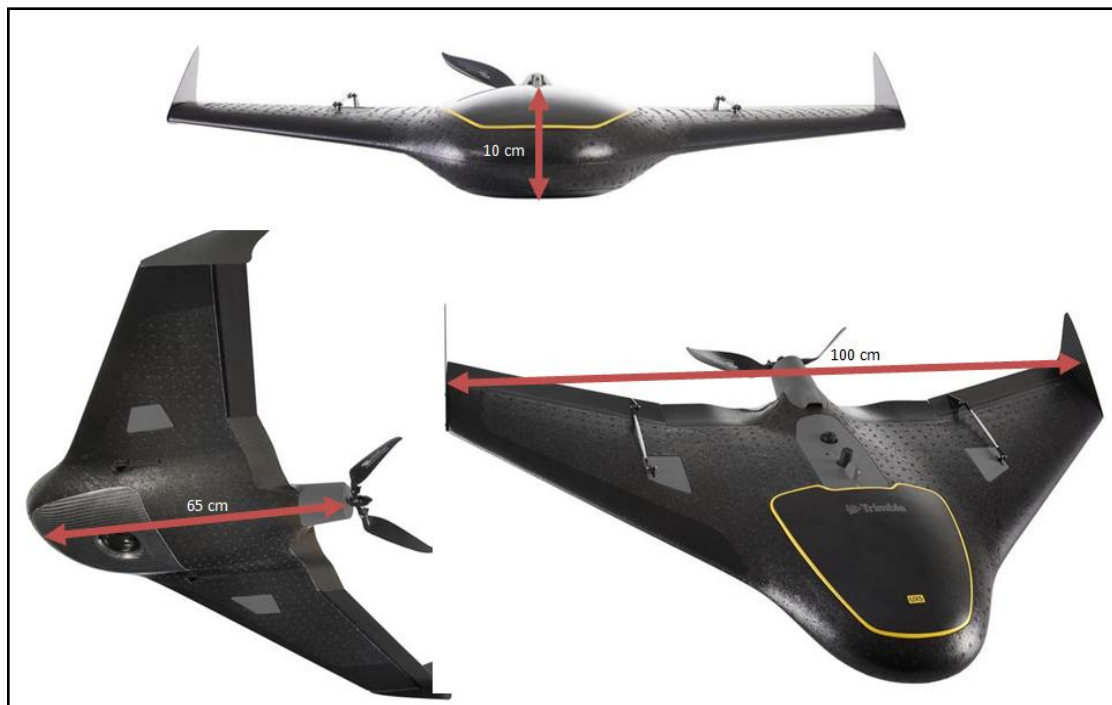


Figura 15. Dimensiones de la aeronave del sistema UX5.

2.6.2. Plan de Vuelo

Para la generación y control en tierra del sistema UX5 se cuenta con el software “Aerial Imaging Solution”, el mismo que funciona con una controladora y un radio modem USB que permite generar la configuración del plan de vuelo en el software de campo “Aerial Imaging”. Las configuraciones de vuelo se transmiten al e-Box (Cerebro)

del UAV, permitiendo que el vuelo sea totalmente automatizado, asegurando la calidad de toma de fotografías (Altura de vuelo constante, Traslapo de imágenes).

2.6.3. Características del sensor

Trimble ha seleccionado la cámara Sony NEX-5R debido a su sensor de gran tamaño APS-C (CMOS) que cuenta con 16,1 megapíxeles. Este tamaño de pixel, es importante ya que permite un fuerte aumento de la sensibilidad a la luz, rango dinámico y relación señal-ruido.



Figura 16. Tamaño del sensor de la cámara Sony NEX-5R.
Fuente: (TRIMBLE, 2013)

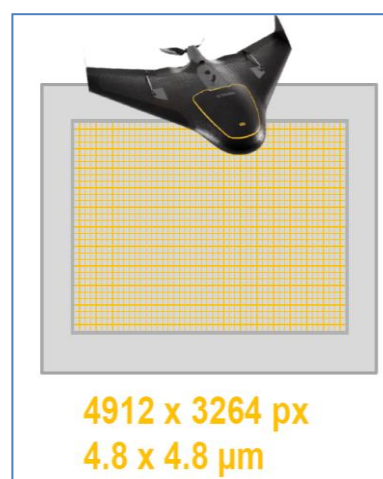


Figura 17. Tamaño del sensor de la cámara Sony NEX-5R.
Fuente: (TRIMBLE, 2013)

Desde un punto de vista fotogramétrico, la mayor ventaja de la cámara usada en el UX5 Trimble en comparación con el uso de cámaras compactas es la lente exterior. Un objetivo externo inherente ofrece una geometría interna más estable que resulta en una calibración de la cámara más fiable que la de un objetivo retráctil. Para el UX5, ha sido elegido un objetivo ligero Voigtlander de 15 mm de longitud focal fija con enfoque mecánico y anillo de apertura. (TRIMBLE, 2013)



Figura 18. Cámara Sony NEX-5R con lente Voigtlander de 15 mm de longitud focal.

El lente externo va montado en la parte frontal del sensor APS-C, la longitud focal expresada como 35 mm, que equivale a 22.5 mm en la cámara del UX5 genera un amplio campo de visión. Esto significa que, a una altura de vuelo de 150 m, el Trimble UX5 produce una huella de imagen de 235 m por 157 m, lo que resulta en una mayor precisión del MDS que se genera a partir de las fotos¹.

2.6.4. Software de procesamiento

Dentro de la fotogrametría tradicional se cuenta con distintos paquetes de software que permiten realizar el proceso fotogramétrico, entre los más conocidos se encuentran:

- ERDAS Imagine
- TNT Mips
- INPHO

El avance de la tecnología UAS generó una brecha tecnológica en cuestión de software, pues los programas existentes estaban diseñados para ajustar fotografías aéreas obtenidas con sensores mucho más grandes y aeronaves pilotadas de mediana y gran

¹ UAS Trimble. (s.f.). *Sistemas aéreos no tripulados de Trimble para topografía y cartografía*.

envergadura. Por lo que la empresa TRIMBLE observando la necesidad de contar con una herramienta para el procesamiento de las imágenes adquiridas con el UAV Trimble UX5, desarrollo en conjunto con INPHO una suite de procesamiento fotogramétrico, la misma que cuenta con los siguientes programas:

2.6.4.1. Trimble Business Center 3.40 (TBC)

Trimble Business Center es una aplicación de escritorio automatizada para el procesamiento y administración de datos geoespaciales obtenidos por datos GNSS, topográficos, fotografías aéreas y terrestres.²

El módulo de fotogrametría de Trimble Business Center hace que sea posible procesar misiones de vuelos fotogramétricos con imágenes aéreas. Obteniendo un flujo de trabajo automatizado que permite:

- Importar y visualizar imágenes de vehículos aéreos no tripulados de Trimble.
- Ajuste de bloque fotogramétrico con los puntos de unión generados automáticamente y los puntos de control terrestre medidos.
- Medición de puntos, tales como esquinas de edificios y bordes de aceras fotogramétricamente usando un "telescopio virtual".
- Creación automática de nubes de puntos (.LAS), mosaicos georreferenciados y ortorectificados (.TIFF) extraídos del Modelo digital de superficie (MDS) generado del ajuste de imágenes aéreas.

² TRIMBLE. (2014). *Notas Técnicas Software Trimble Business Center*.

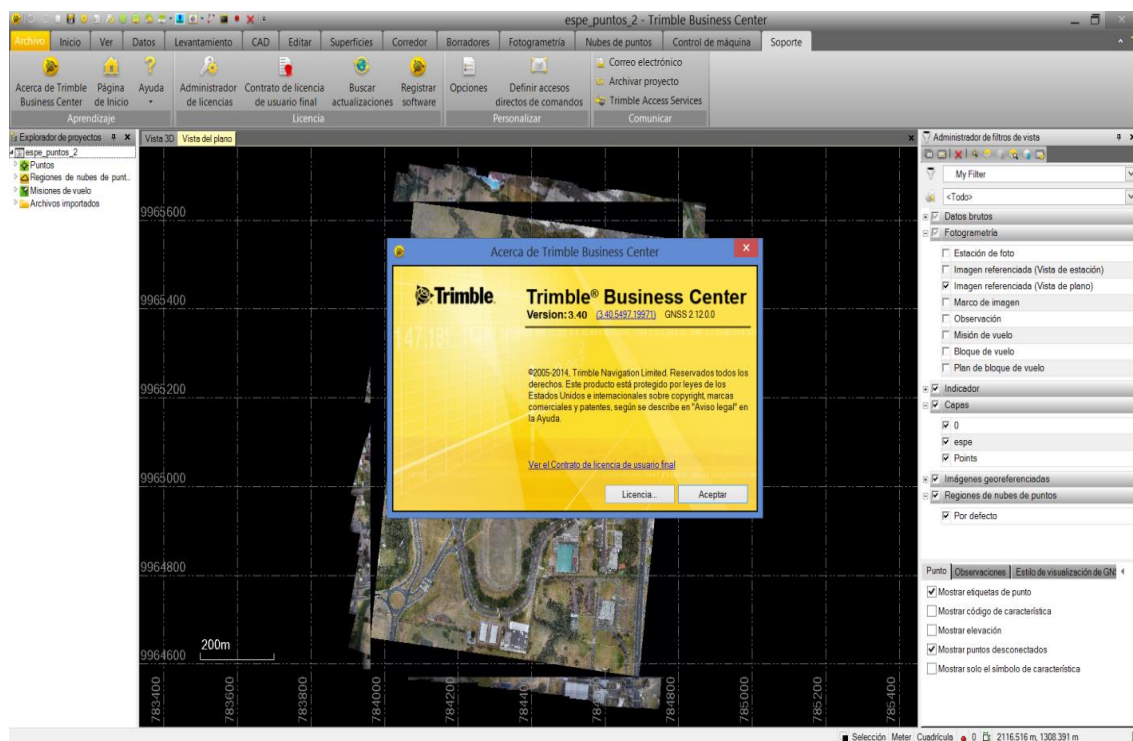


Figura 19. Interfaz de Software Trimble Business Center V 3.40.

2.6.4.2. Inpho UAS Master 6.0

UAS Master de Inpho es un software fotogramétrico específicamente creado para procesar proyectos de UAVs. Esta aplicación implementa un flujo de trabajo simple que permite especificar los parámetros del vuelo de una manera simplificada (Figura 20), además, incorpora nuevos algoritmos provenientes del mundo de la visión artificial que producen resultados automáticos de gran precisión en la generación de mosaicos y MDS. Estos algoritmos se han optimizado para su utilización en proyectos de UAVs junto con observaciones GPS (con una precisión recomendada de al menos ± 10 cm) y dotan al bloque de gran estabilidad. También cuenta con avanzadas herramientas interactivas de edición y control de calidad del proyecto. UAS Master se puede utilizar prácticamente con todos los UAVs del mercado independientemente de su tecnología: ala fija, helicópteros, etc. (GTB Ibérica, 2014)

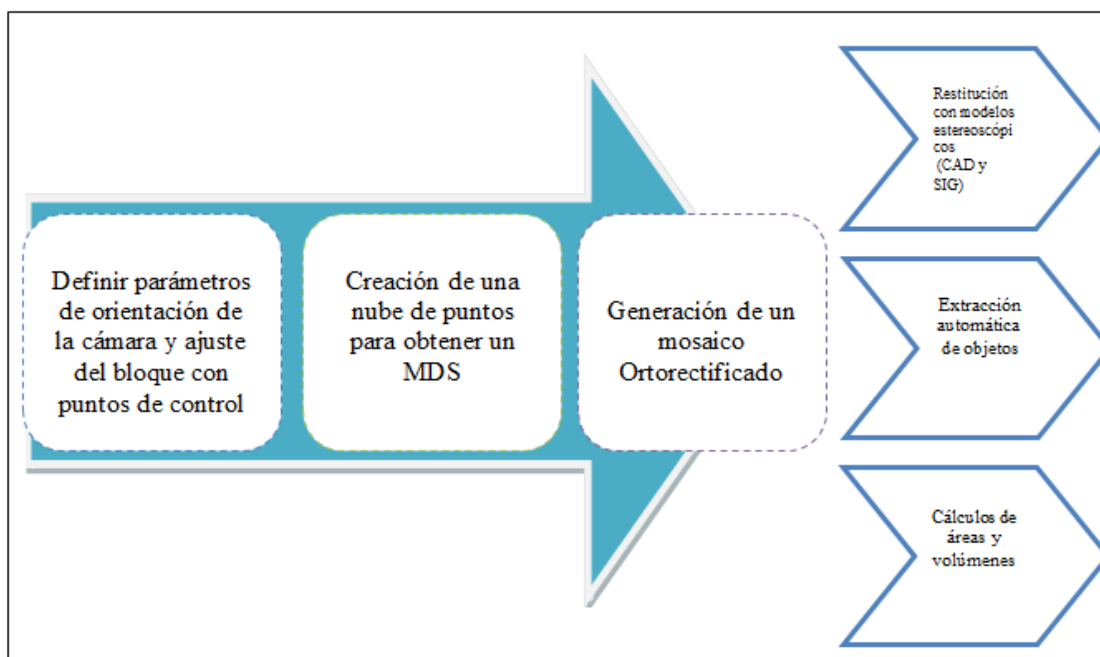


Figura 20. Flujo de trabajo en el software UAS Master.

2.6.5. Legislación

El desarrollo de la tecnología UAS alrededor del mundo ha provocado una serie de discusiones para poder definir los lineamientos para la operación segura de este tipo de dispositivos. En la actualidad son pocos los países que cuentan con una legislación adecuada para regular el uso de UAVs en su espacio aéreo.

Es normal que países como los Estados Unidos de América (EEUU) u organizaciones como la Unión Europea (UE), sean pioneros en la creación de una normativa oficial.

En el caso de Norte América, La Administración Federal de Aviación (Federal Aviation Administration, FAA) en conformidad con la Sección 333 de La Normativa de la FAA reformada en 2012, autoriza conceder exenciones que limitan la operación comercial de Sistemas Aéreos No Tripulados para aplicaciones civiles mientras se

genera normas permanentes, proporcionando una vía segura y legal para el uso del espacio aéreo nacional de Estados Unidos.

América Latina no está exenta de esta realidad, al momento países como Argentina y Chile tienen proyectos legales que regulan la operación civil de UAVs, además en países como Colombia se están generando foros y discusiones que permitan generar una visión más amplia para poder formular una normativa adecuada del manejo de tecnología UAS.

En el ámbito nacional el desarrollo de aplicaciones civiles para los UAS en el Ecuador está iniciando, es por este motivo que en el presente trabajo se utilizó los parámetros establecidos por la FAA para la operación segura UAVs. Porque el UAS Trimble UX5 está autorizado a operar en espacio aéreo estadounidense desde el siete de Mayo del 2015, debiendo cumplir todos los requisitos de operación los mismos que se encuentran en la Exención No. 11110A. (ANEXO 1)

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Generalidades

La metodología del proyecto se definió en cuatro fases que abarcan en términos generales los pasos a seguir para alcanzar los objetivos de este trabajo, siendo:

- ✓ FASE 01 (Planificación)
- ✓ FASE 02 (Vuelo)
- ✓ FASE 03 (Procesamiento)
- ✓ FASE 04 (Validación de productos)

El flujo de trabajo se puede observar en la Figura 21.

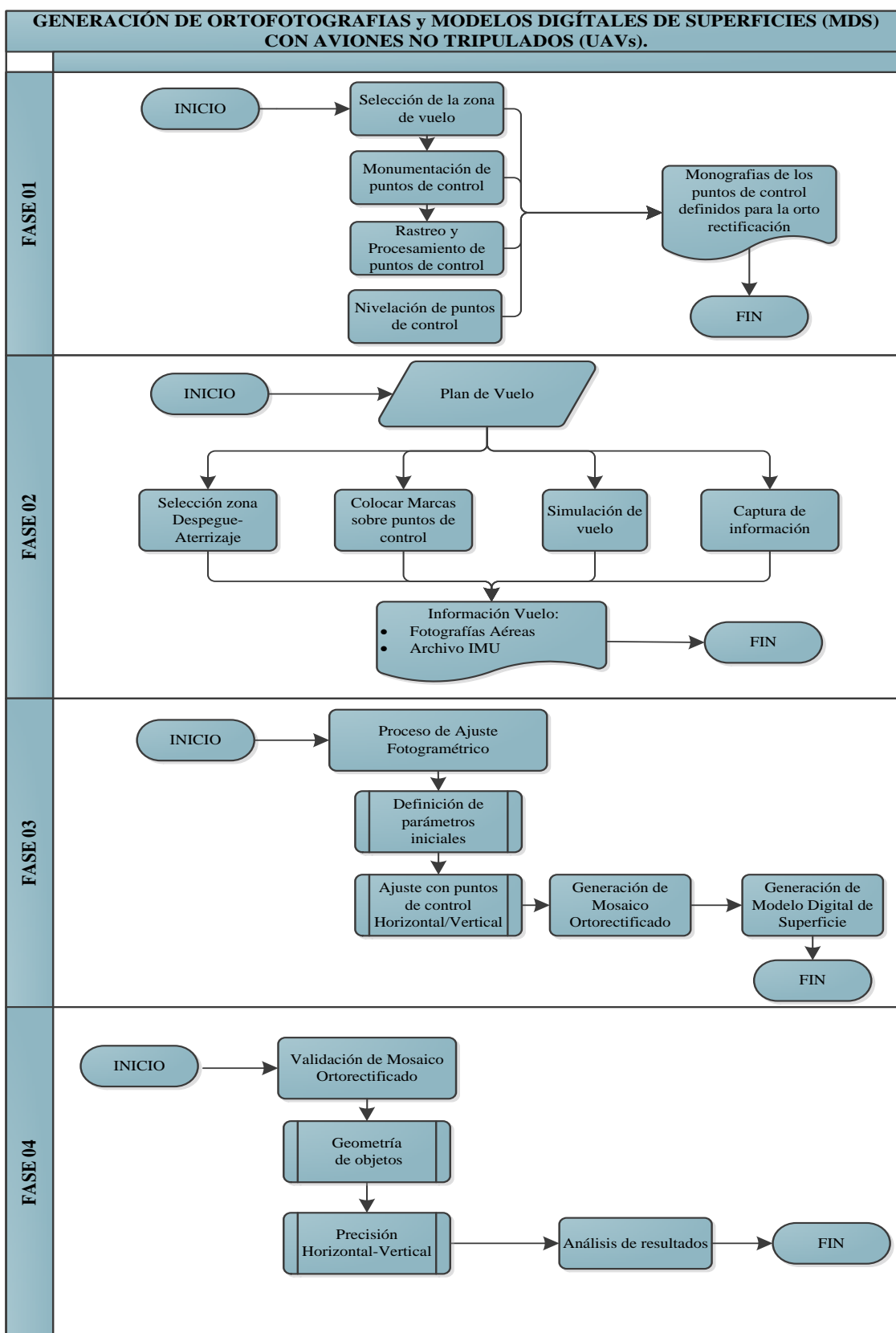


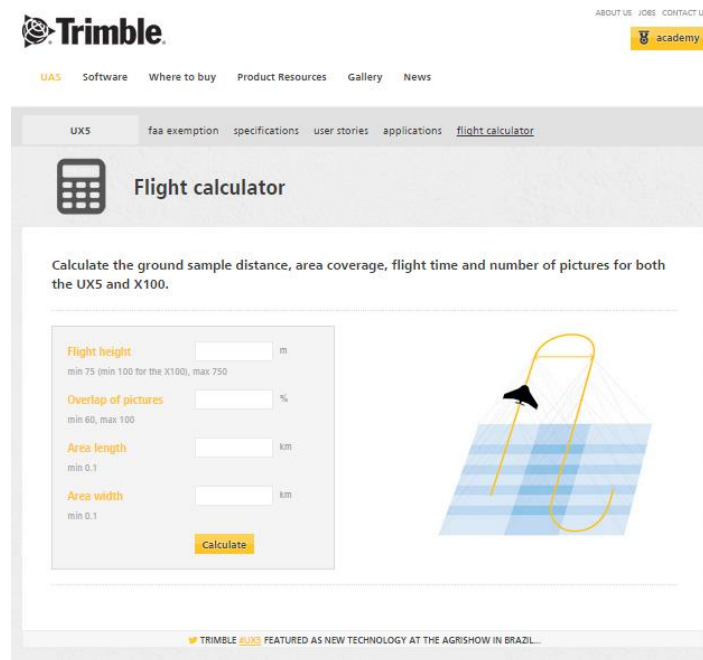
Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.

3.2. Planificación de Vuelo (FASE 01)

La planificación de vuelo es la primera fase para la obtención de productos fotogramétricos con tecnología UAV. el desarrollo óptimo de este procedimiento asegurara la calidad de los resultados finales, pues es aquí donde se genera todos los parámetros e infraestructura necesaria para el vuelo del UAS Trimble UX5.

3.2.1. Parámetros de vuelo

Los parámetros de vuelo son los valores necesarios para generar un plan de vuelo, entre ellos se encuentran el área a levantar, altura de vuelo, traslapo longitudinal y transversal, tamaño de pixel a obtener. Esta información es necesaria para el cálculo del tiempo de vuelo el cual no debe sobrepasar los 50 minutos. Para la definición de estos parámetros se utilizó la calculadora de vuelo online del sitio web oficial del UAS Trimble UX5. (Ver Figura 22)



The image shows a screenshot of the Trimble website's flight calculator tool. At the top, the Trimble logo is on the left, and navigation links for 'ABOUT US', 'JOBS', and 'CONTACT US' are on the right. Below the logo, there are links for 'UAS', 'Software', 'Where to buy', 'Product Resources', 'Gallery', and 'News'. The main content area is titled 'Flight calculator' and includes a calculator icon. The text below the title reads: 'Calculate the ground sample distance, area coverage, flight time and number of pictures for both the UX5 and X100.' The calculator form has four input fields: 'Flight height' (m, min 75, max 750), 'Overlap of pictures' (% min 60, max 100), 'Area length' (km, min 0.1), and 'Area width' (km, min 0.1). A yellow 'Calculate' button is at the bottom of the form. To the right of the form is a diagram of a drone flying over a grid, illustrating the flight path and overlap. At the bottom of the page, there is a small banner that says 'TRIMBLE UX5 FEATURED AS NEW TECHNOLOGY AT THE AGRISHOW IN BRAZIL...'.

Figura 22. Calculadora de vuelo online (<http://uas.trimble.com/calculator>).

Al definir el límite del área de estudio, se decidió fijar los siguientes parámetros para el desarrollo del vuelo. Tomando como base de cálculo la altura de vuelo, obteniendo el tamaño de pixel de la imagen.

Tabla 2.

Parámetros del vuelo ESPE.

<i>Altura de vuelo</i>	120 m
<i>GSD</i>	3,8 cm
<i>Traslapo Longitudinal</i>	82%
<i>Traslapo Transversal</i>	82%
<i>Tiempo de Vuelo</i>	38 min

3.2.2. Puntos de Control Horizontal /Vertical

Se determinó once puntos de control dentro del campus universitario distribuidos de forma tal que cubra el área de vuelo, para utilizarlos en la generación de la ortofotografía. Estos se monumentaron con mojoneros cilíndricos de 15 cm de diámetro obteniendo una red de puntos de alta precisión.

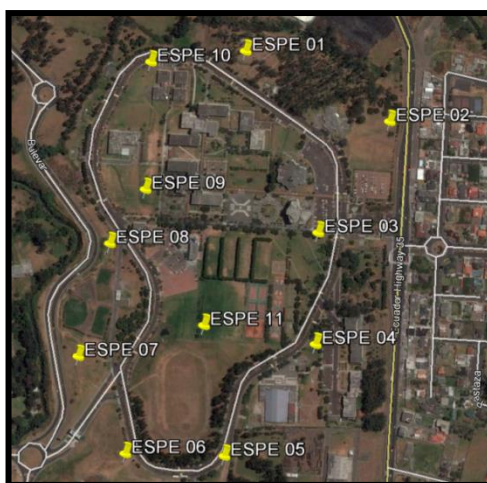


Figura 23. Ubicación Aproximada de la red de puntos de control para el vuelo ESPE.

3.2.2.1. Rastreo GNSS

El rastreo de los puntos de control se realizó el 23 de septiembre del 2014, correspondiente al día GPS 266. Para realizar el posicionamiento de los puntos se utilizó la infraestructura de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) utilizando la estación EPEC(Figura 24), la cual se encuentra dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 24. Estación de monitoreo continuo GNSS-MET EPEC.

Para realizar el rastreo GNSS se contó con cuatro receptores (Figura 25):

- Dos Trimble 5800 (L1/L2)
- ProMark 120 (L1)
- ProMark 200 (L1/L2)

Se estableció observar cada punto un mínimo de una hora, con un intervalo de registro de 30 segundos, estableciendo el marco de referencia SIRGAS ECUADOR,

para la obtención de coordenadas a la época de referencia 2014.00, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.

Resultado del procesamiento de los puntos de control del vuelo ESPE enlazadas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR época de referencia 2014.0.

<i>Nombre</i>	<i>Este(m)</i>	<i>Norte(m)</i>	<i>Altura Elipsoidal (m)</i>
espe-01	784442.029	9965483.131	2535.495
espe-02	784708.252	9965365.326	2518.768
espe-03	784565.680	9965137.598	2525.155
espe-04	784555.119	9964929.516	2529.823
espe-05	784390.697	9964722.932	2521.493
espe-06	784200.094	9964744.836	2522.547
espe-07	784120.974	9964909.731	2513.772
espe-08	784178.457	9965127.975	2511.544
espe-09	784254.974	9965220.369	2518.108
espe-10	784261.378	9965466.173	2517.662
espe-11	784350.157	9964965.616	2516.594

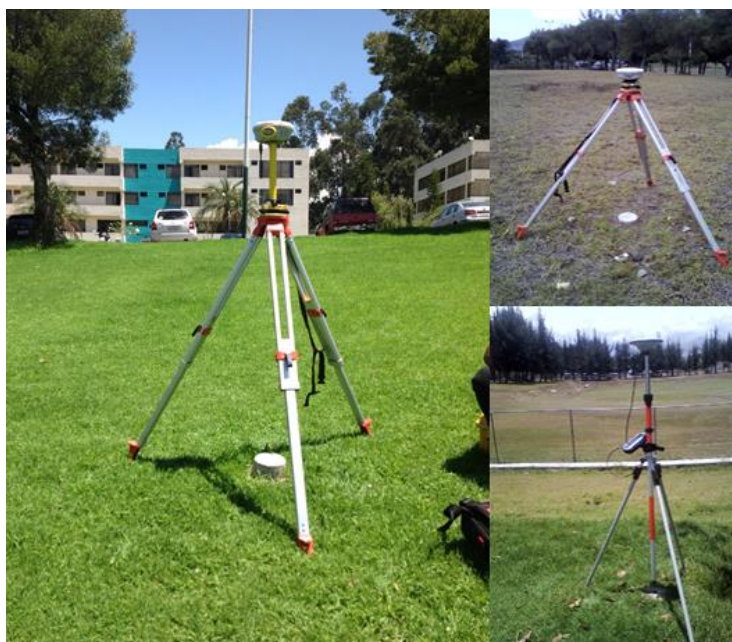


Figura 25. Rastreo de la red GNSS para puntos de control fotogramétrico.

3.2.2.2. Nivelación

Para la obtención de la altura nivelada de la red de puntos de control, se utilizó uno de los vértices de la red nacional de nivelación ubicado en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (Figura 26). Este punto servirá como referencia para el cálculo de la altura nivelada de los puntos de control fotogramétrico, obteniendo así cotas referidas al DATUM vertical del Ecuador el mismo que se encuentra en la provincia de Santa Elena, en el mareógrafo de La Libertad.

CONTROL HORIZONTAL			
Datum Horizontal: ITRF 2000		Epoca de referencia: 2002.80	
Coordenadas Geográficas:		Coordenadas UTM:	
Latitud (° ' ")	S 00 18 47.9652	Zona:	17 S
Longitud (° ' ")	W 078 26 36.7838	Norte (m):	9965333.584
Altura Elipsoidal (m):	2522.848	Este (m):	784559.601
CONTROL VERTICAL:			
Datum Vertical: NIVEL MEDIO DEL MAR		Mareógrafo:	
Línea Nivelación:	Código de la Línea:	Fecha de determinación:	Z N E
		20-08-2009	
Elevación (m):	Tipo Nivelación:	Orden:	
2495.5450	GEOMETRICA	TERCERO	

Figura 26. Monografía del punto de control vertical PE28129-X.

El ajuste del anillo de nivelación se realizó con una nivelación geométrica de ida y vuelta, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.

Resultado del ajuste de la nivelación de la red de control para el vuelo ESPE.

<i>Nombre</i>	<i>Altura Nivelada(msnm)</i>
espe-01	2506.911
espe-02	2493.454
espe-03	2497.272
espe-04	2501.900
espe-05	2493.148
espe-06	2493.856
espe-07	2486.829
espe-08	2483.891
espe-09	2491.067
espe-10	2489.902

3.3. Vuelo (FASE 02)

El vuelo se realizó en la ciudad de Sangolquí, utilizando el sistema fotogramétrico Trimble UX5.

Esta fase metodológica del proyecto, trata la configuración y preparación del vuelo con el software de campo “Aerial Imaging”, el cual es parte del Sistema Trimble UX5. Este programa permite generar el plan de vuelo el mismo que tendrá como parámetros iniciales los obtenidos en la Fase 01 como lo muestra la Tabla 03. Además, permitirá realizar una simulación del vuelo, logrando manipular la dirección de las líneas de vuelo, cálculo del tiempo de la maniobra de giro para la entrada y salida de las líneas en función de las condiciones meteorológicas del sitio, para optimizar la eficiencia del

UAV. Además, se colocan las marcas sobre los puntos de control para su identificación en el ajuste de la misión de vuelo.

3.3.1. Aerial Imaging

El software de campo “Aerial Imaging”, es parte del control en tierra del UAS Trimble UX5. Tiene una interfaz basada en la visualización de imágenes satelitales de Google Earth, ayudando al operador o piloto del vehículo realizar los ajustes adecuados para el correcto funcionamiento de la aeronave.

Este procedimiento se realiza en el lugar establecido previa inspección, para realizar el despegue (Take Off) y aterrizaje (Landing), es importante aclarar que la dirección en la que se realizara cada maniobra está sujeta a la dirección y velocidad de viento de la zona de estudio.



Figura 27. Elaboración del plan de vuelo en la zona definida como Despegue/Aterrizaje.

El procedimiento es el siguiente:

- Delimitación del área a sobrevolar

Para delimitar la aérea de estudio dentro del programa “Aerial Imaging” es necesario crear un proyecto, asignando un nombre que lo identifique, posterior a esto se visualiza el mapa de fondo donde se identifica el área a levantar. La delimitación se realiza tecleando los vértices que forman el polígono del sitio sobre la imagen de fondo, además se ingresa los parámetros definidos en la Fase 01 en la parte derecha de la ventana. (Figura 28)

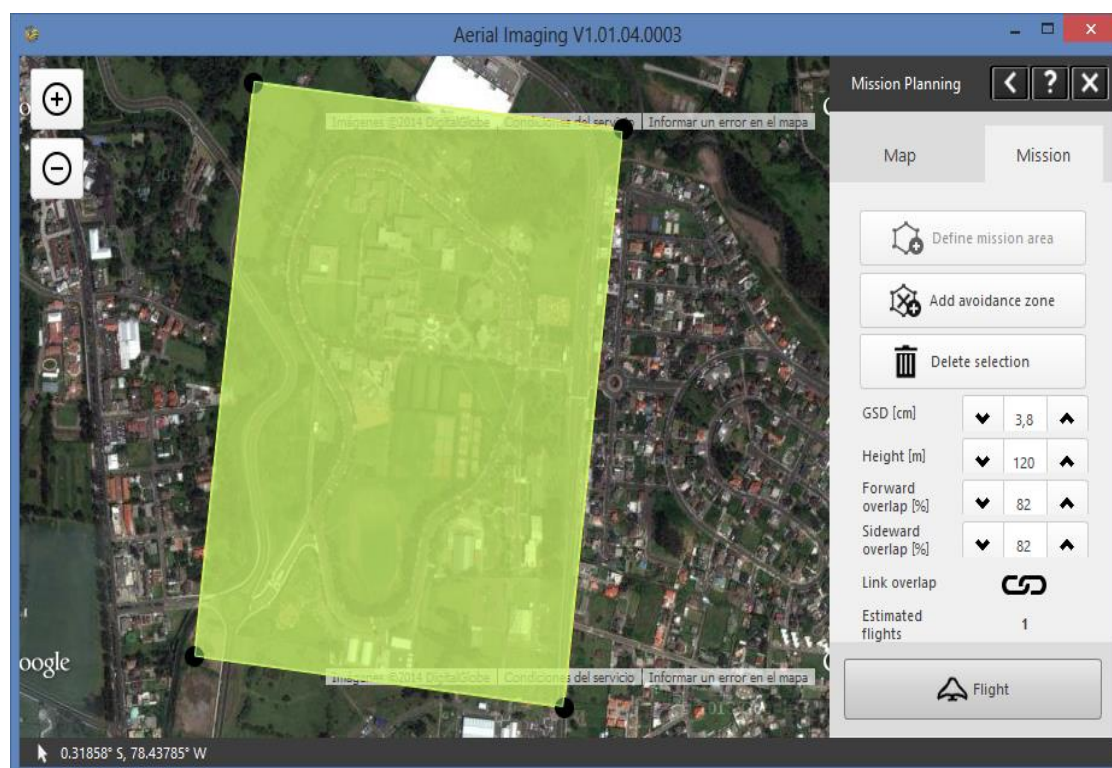


Figura 28. Delimitación y parametrización del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

- Definir líneas de vuelo

Una vez delimitada la zona a sobrevolar, presionamos el botón “Flight”, abriendo un nuevo menú, donde se configura la posición y orientación de las líneas de vuelo con el límite del sitio. Es importante que la dirección de las líneas de vuelo sea perpendicular a la dirección del viento. Se voló en este proyecto en dirección sur-este; además, se observa en el lado superior derecho de la pantalla el tiempo de vuelo, área de cobertura los cuales fueron determinados con los parámetros iniciales, ingresados en el paso anterior. (Figura 29)

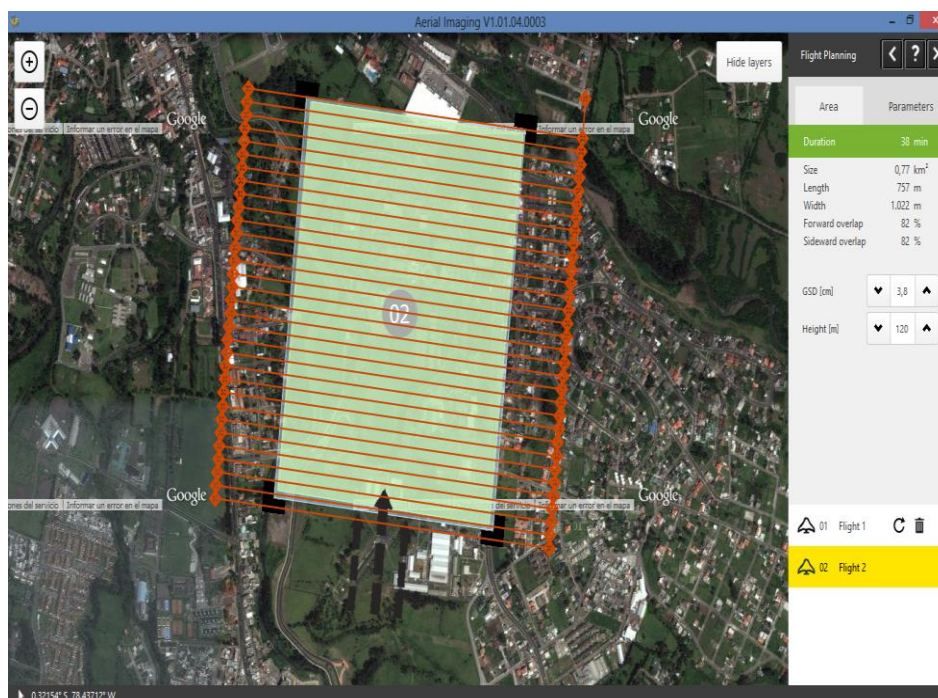


Figura 29. Delimitación y parametrización del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

- Aterrizaje/Despegue

La selección del sitio de despegue y aterrizaje es una de las opciones más críticas de la preparación del vuelo, anteriormente se definió que el viento sopla en dirección sur-

este. El punto de despegue es el primero en configurar, se teclea en la pestaña “Parámetros”, se visualiza las opciones para la configuración del aterrizaje, se marca el punto de aterrizaje ubicándose en el terreno, ya que la controladora donde opera el software tiene un GPS integrado, se recomienda realizar un recorrido lineal en dirección opuesta al viento para definir la dirección del despegue.

El aterrizaje se lo realiza de manera similar que el despegue, utilizando la posición de la controladora de campo y definiendo la dirección de entrada del vehículo en dirección contraria a la del viento predominante. El procedimiento de aterrizaje debe cumplir varios parámetros, los cuales están descritos en “La Guía de Usuario Solución UX5”³. Finalizado el proceso, se podrá visualizar los puntos de despegue en amarillo y aterrizaje de rojo con su respectiva dirección, como se muestra en la Figura 30.

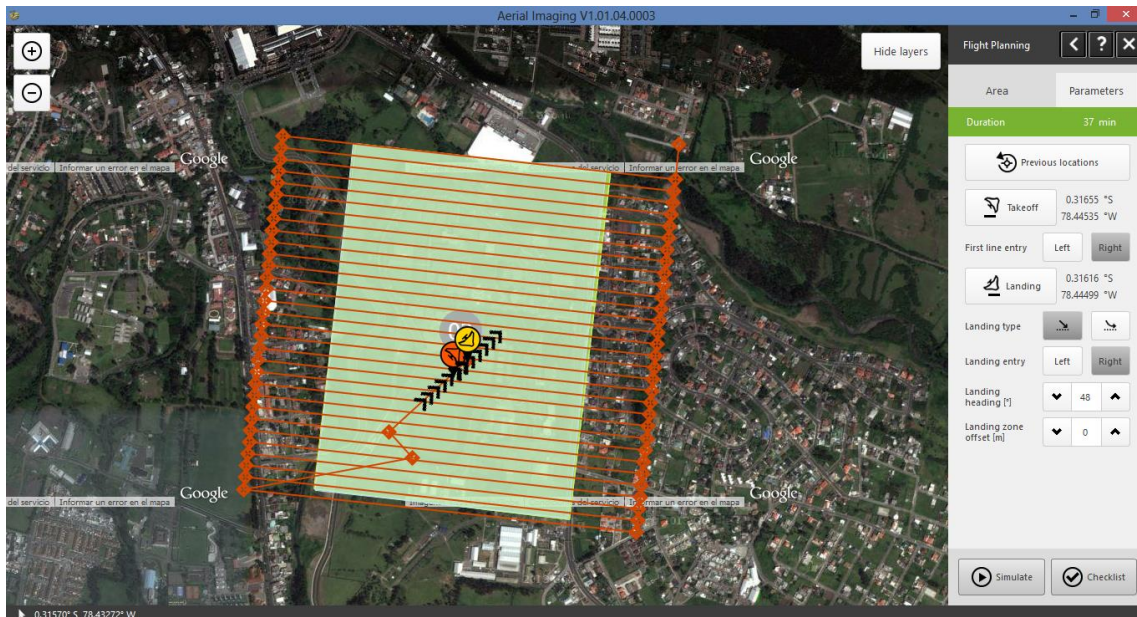


Figura 30. Puntos de despegue y aterrizaje del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

³ TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. (2015). *Guía de Usuario Solución Trimble UX5*.

- Simulación

Al finalizar todas las configuraciones necesarias en el software “Aerial Imaging”, se realiza una simulación del vuelo, la misma que permitirá observar las condiciones óptimas del vuelo, para poder realizar un seguimiento adecuado del vehículo, permitiendo tomar una decisión más apropiada en caso de que las condiciones del sitio se alteren en el momento de la ejecución. No es necesario terminar la simulación del vuelo completa, línea por línea, es suficiente observar el comportamiento en las líneas iniciales y continuar con la maniobra de aterrizaje, como se puede observar en la Figura 31.

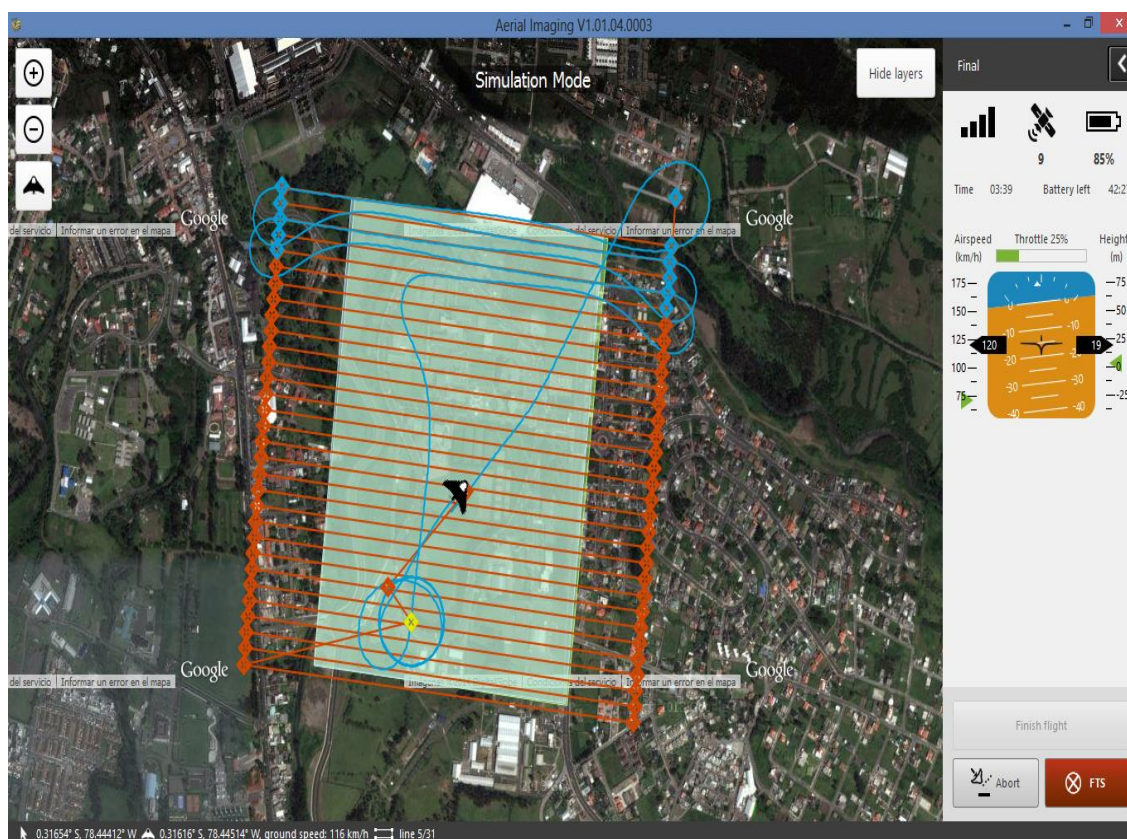


Figura 31. Simulación del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

- Checklist

El software de campo “Aerial Imaging” cuenta con una lista de chequeo que permitirá que el piloto ensamble todos los accesorios necesarios para el vuelo y compruebe su funcionamiento antes del despegue. El detalle de la lista se encuentra en el capítulo cuarto de la “La Guía de Usuario Solución UX5”⁴.

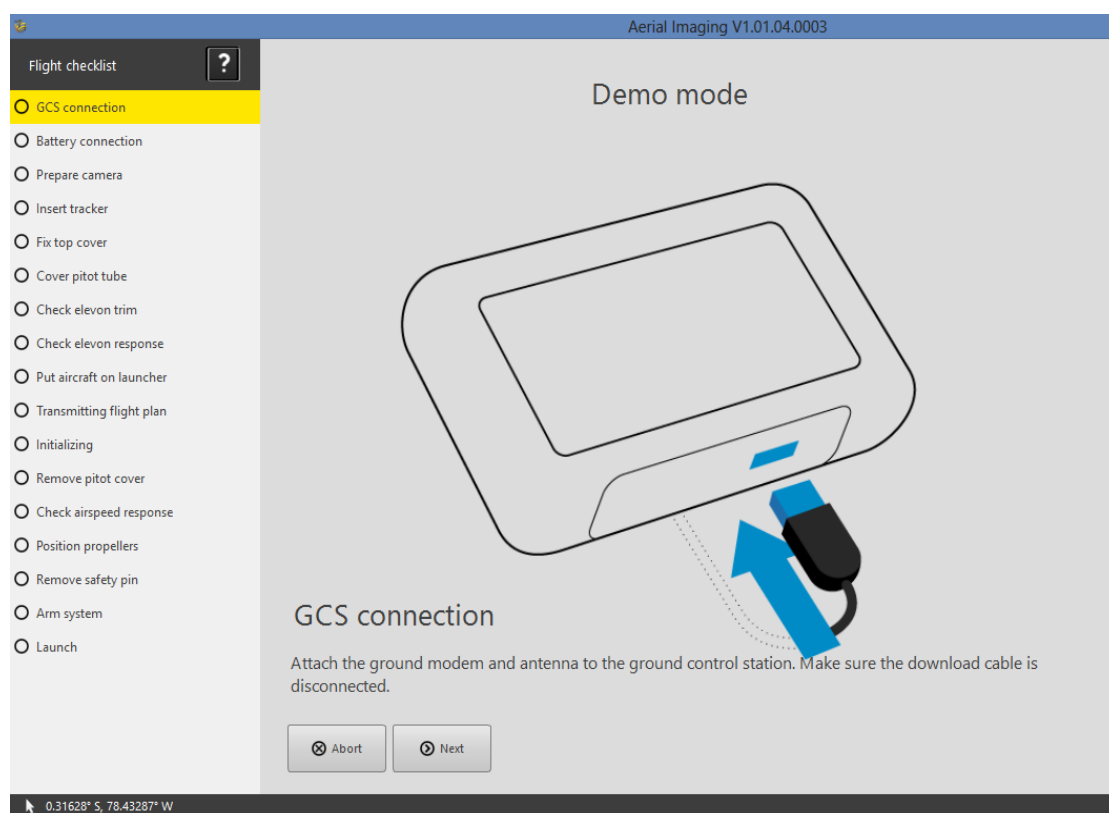


Figura 32. Checklist del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

Una vez realizado y superado cada ítem del Checklist, la controladora transfiere el plan de vuelo al e-Box del UAV. A este procedimiento se lo llama “Arm System”. (Figura 33)

⁴ (TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 2015, pág. 70)

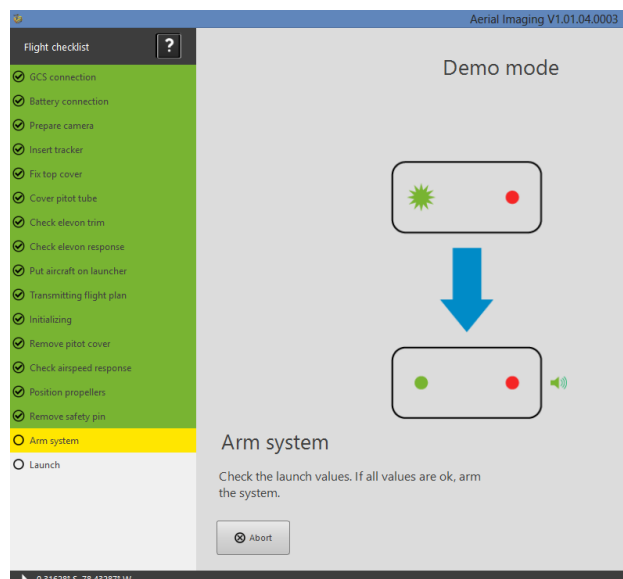


Figura 33. “Arm System” del plan de vuelo ESPE en el software de campo “Aerial Imaging”.

3.3.2. Descargar información

El procedimiento para la descarga de datos se realiza instantes después del aterrizaje. La información se encuentra en la memoria del e-Box., para obtener la información se debe completar el Checklist Post-vuelo⁵, el mismo que permitirá comprobar que la captura de información está completa. Las imágenes capturadas se encuentran en la tarjeta SD de la cámara, se deben copiar en una carpeta con el nombre del proyecto en la memoria de la controladora de campo, para realizar la exportación de los archivos necesarios para el procesamiento fotogramétrico en los distintos paquetes de software con los que el UAS Trimble UX5 cuenta.

3.4. Procesamiento de datos

El ajuste fotogramétrico de la información capturada con el UAS Trimble UX5 se realizará en dos programas:

⁵TRIMBLE NAVIGATION LIMITED, 2015

- Trimble Business Center V3.4 (TBC)
- INPHO UAS Master V6.0

Antes de iniciar el procesamiento es necesario verificar los siguientes archivos:

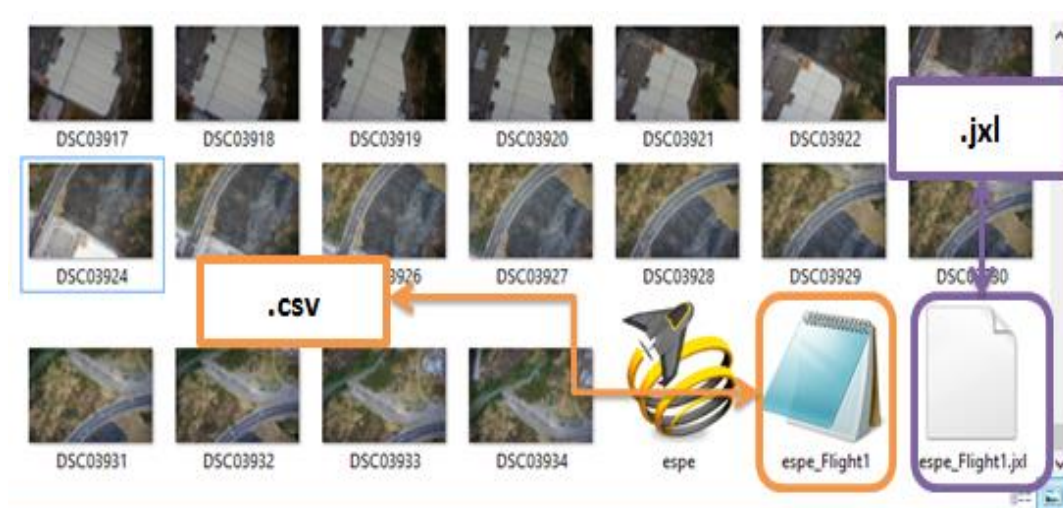


Figura 34. Archivos necesarios para iniciar el ajuste fotogramétrico.

- Fotografías Aéreas Brutas

El número de escenas a procesar, se lo conoce al finalizar el vuelo y debe coincidir con el conteo de fotos del software “Aerial Imaging”.

- Archivo .csv

El archivo con extensión .csv es indispensable para el procesamiento fotogramétrico en el software INPHO UAS Master, el archivo contiene el ID de cada fotografía junto con, la coordenada del centro de exposición, además de las correcciones angulares debido al movimiento del vehículo (Yaw/kappa, Pitch/phi, Roll/Omega). También conocido como el archivo IMU⁶.

⁶ Unidad de medición inercial o IMU (del inglés *Inertial Measurement Unit*)

- Archivo .jxl

El archivo con extensión **.jxl** es necesario para realizar el ajuste en TBC, siendo un formato de archivos nativo de trimble, en donde está grabada la información del vuelo (límite del aérea de estudio, altura de vuelo, correcciones IMU de cada fotografía).

3.4.1. Módulo Fotogramétrico “Trimble Business Center”

El procesamiento de las imágenes y la generación del ortomosaico y su Modelo digital de Superficie se realizó en el software Trimble Business Center (TBC), en el módulo fotogrametría. Este paquete está diseñado para generar soluciones fotogramétricas del UX5, el detalle completo del procedimiento se encuentra descrito en el ANEXO 2.

- Ajuste Automático

El modulo fotogramétrico del software TBC 3.30, realiza un ajuste del vuelo con los puntos de los centros de exposición de cada fotografía para realizar la aéreo triangulación; los puntos fueron tomados en el vuelo con un recetor GPS L1 en DGPS logrando una precisión de +- 1,5 m.

El software utiliza los puntos de centros de exposición para reconstruir el bloque fotogramétrico, este trabajo es automático ya que el vuelo genera un archivo resumen del trabajo con extensión .jxl nativa del software donde se encuentra la información necesaria para la orientación interna de cada fotografía.

Una vez reconstruido el bloque fotogramétrico con el archivo .jxl se realiza un ajuste automático del trabajo, el cual genera puntos en común en todas las imágenes del proyecto los mismos que sirven de enlace entre las fotos para generar el mosaico orto rectificado posteriormente. Es necesario recalcar que el ajuste automático genera un ortomosaico y un MDS a priori cuya precisión geométrica y de posición se pretende evaluar en este documento.

- **Ajuste con Puntos de Control (GCP)**

Para realizar el ajuste fotogramétrico con puntos de control (GCP) se ingresa las coordenadas y cota nivelada de cada punto para realizar el pinchado de cada marca sobre las fotografías, logrando ajustar el bloque al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR y como DATUM vertical el punto “La Libertad” que es la referencia vertical para el Ecuador. Al pinchar los puntos de control en todas las fotos necesarias, se ajusta el bloque a coordenadas verdaderas obteniendo como resultado un mosaico ortorectificado y un MDS enlazados al marco de referencia.

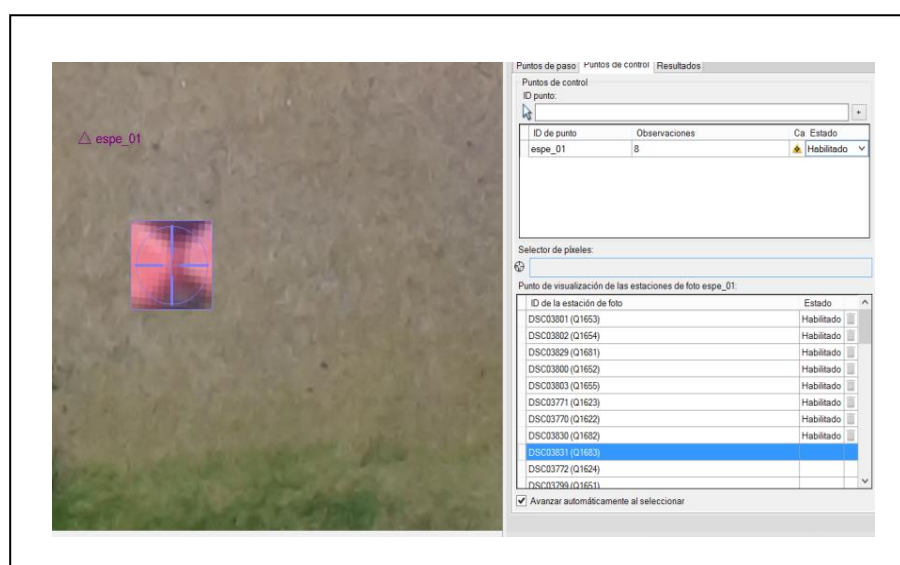


Figura 35. Proceso de pinchado de puntos de control (GCP) en software TBC 3.30

3.4.2. Ajuste de vuelo INPHO UAS Master

El procedimiento a seguir, en el software UAS Master es más complejo que al utilizar TBC, se debe cumplir con parámetros básico que permitirán configurar el ajuste de manera ordenada, a continuación se presenta una descripción general del proceso, para mayor detalle se puede observar el ANEXO 3.

La primera configuración a realizar en el UAS Master, es la generación de un proyecto y la definición de un sistema de referencia, esta configuración ayudará a identificar de manera general el tipo de coordenadas a obtener en los productos finales (mosaico y MDS).

El siguiente paso es ingresar toda la información necesaria para el procesamiento fotogramétrico, para ello el software cuenta con un listado de los archivos necesarios en el ajuste (Figura 36). Los cuales son:

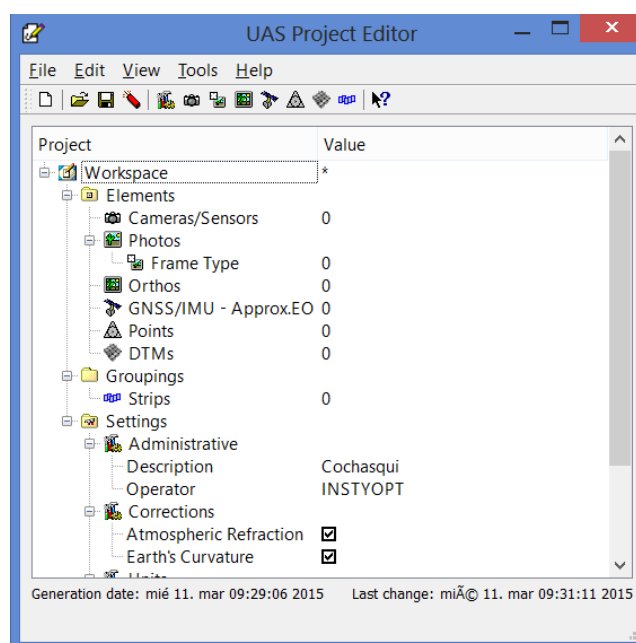


Figura 36. Listado de archivos necesarios para el procesamiento de datos UAV en el Software INPHO UAS Master V6.0.

- Cámara

La opción a configurar dentro del listado es la Cámara/Sensor, para ello es necesario generar un archivo de calibración de la cámara, en el cual se podrá obtener información de las características del objetivo, como, la distancia focal, tamaño del sensor y las distorsiones lineales del lente que se utiliza. En nuestro caso podemos acceder a este archivo directamente en el catálogo de sensores del UAS Master (Figura 37), porque este software fue creado para el ajuste de soluciones del UAS trimble UX5.

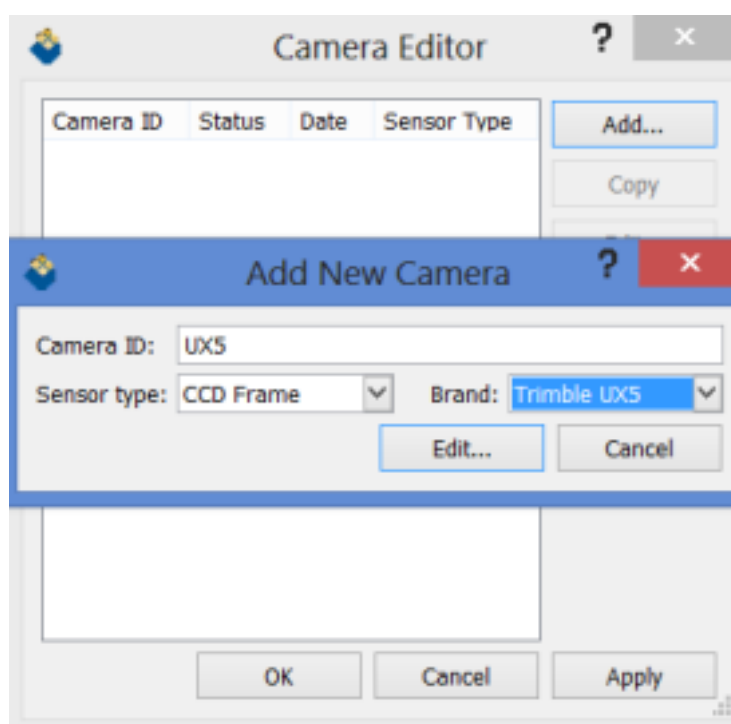


Figura 37. Selección del sensor del UAS Trimble UX5 para el procesamiento de datos UAV en el Software INPHO UAS Master V6.0.

- Fotos

Es necesario ingresar todas las fotos obtenidas en el levantamiento UAV, además de identificarlas con una numeración única que debe concordar con el nombre de cada escena en el archivo IMU.

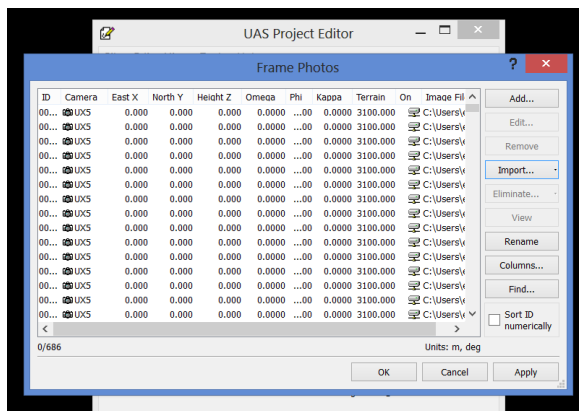


Figura 38. Importación de fotografías aéreas del UAS Trimble UX5 en UAS Master.

- GNSS/IMU

El archivo GNSS/IMU es el archivo **.csv**, obtenido en la descarga de datos. La información que contiene es fundamental en el ajuste, se compone de siete columnas donde se observa el ID de cada fotografía, Latitud, longitud, altitud, Yaw/Kappa, Pitch/Phi, Roll/Omega (Figura 39).

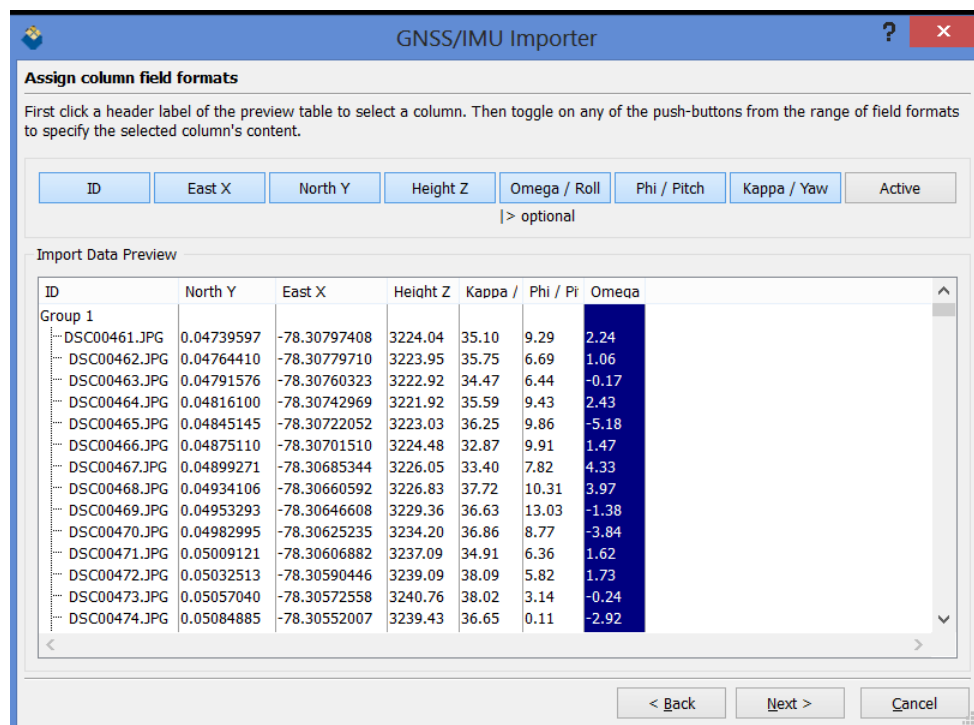


Figura 39. Importación del Archivo GNSS/IMU en formato **.csv** en UAS Master.

- Puntos de Control

Una vez calculadas las coordenadas y cotas de los vértices que servirán como control en el ajuste fotogramétrico, se debe estructurar un archivo **.csv** donde debe estar incluida la siguiente información: ID punto, Norte, Este, Elevación. Para realizar la importación en UAS Master.

- Strips

Cuando todos los archivos de datos no procesados están ingresados al software de procesamiento UAS Master, se genera los Strips (Modelos fotogramétricos, y Líneas de vuelo) los cuales colocaran cada escena en su posición al momento de la captura en función del GNSS/IMU, este procedimiento en fotogrametría tradicional se lo conoce como la orientación interior.

Esta etapa del procesamiento en INPHO UAS Master finaliza con la generación de Strips (Figura 40).

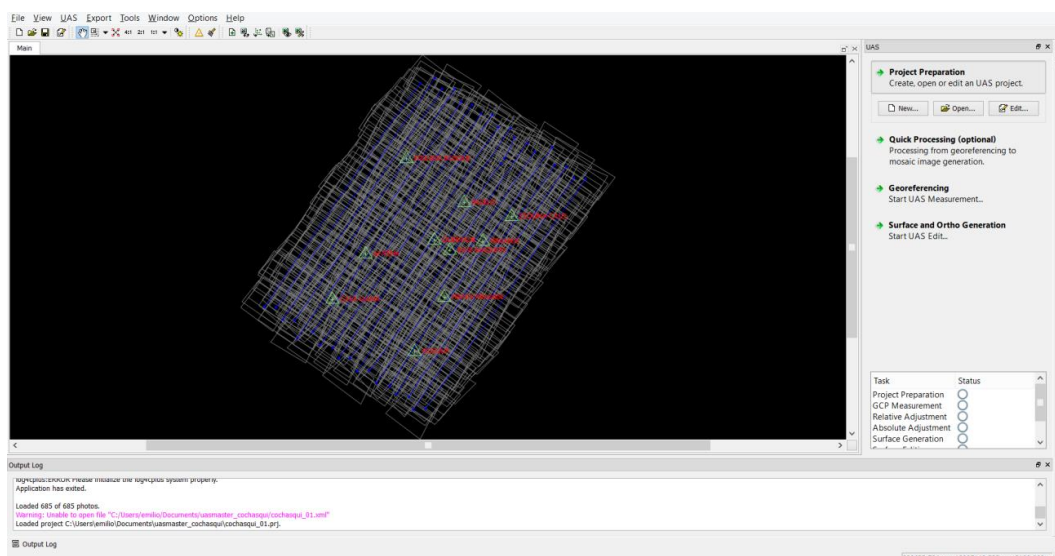


Figura 40. Visualización de la generación de Strips en el Software UAS Master.

El siguiente paso en el procedimiento de ajuste en el software UAS Master es la orientación externa, para ello está el módulo “Georeferencing”, es aquí donde se enlazan aproximadamente las fotos cercanas a los puntos de control para el pinchado de cada uno de ellos.(Figura 41)

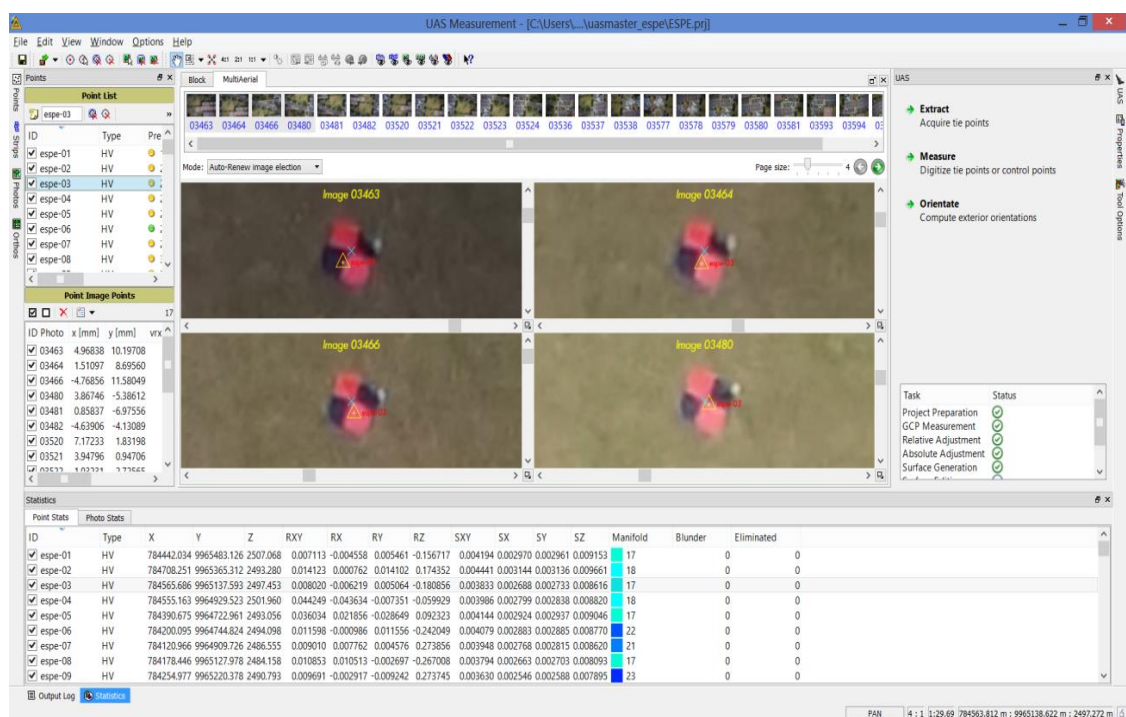


Figura 41. Módulo “Georeferencing” en el Software UAS Master.

Luego se realiza un primer ajuste, generando puntos de paso (Tie Points), para finalizar la georeferenciación de las fotografías aéreas, se aplican las orientaciones y distorsiones del sensor ajustando cada fotografía a sus condiciones reales sobre el terreno.

Para verificar la calidad del procesamiento, en la parte inferior se pueden observar los residuales del ajuste fotogramétrico. (Figura 42)

Statistics															
Point Stats		Photo Stats													
ID	Type	X	Y	Z	RXY	RX	RY	RZ	SXY	SX	SY	SZ	Manifold	Blunder	EI
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-01	HV	784442.034	9965483.126	2507.068	0.007113	-0.004558	0.005461	-0.156717	0.004194	0.002970	0.002961	0.009153	17	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-02	HV	784708.251	9965365.312	2493.280	0.014123	0.000762	0.014102	0.174352	0.004441	0.003144	0.003136	0.009661	18	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-03	HV	784565.686	9965137.593	2497.453	0.008020	-0.006219	0.005064	-0.180856	0.003833	0.002688	0.002733	0.008616	17	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-04	HV	784555.163	9964929.523	2501.960	0.044249	-0.043634	-0.007351	-0.059929	0.003986	0.002799	0.002838	0.008820	18	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-05	HV	784390.675	9964722.961	2493.056	0.036034	0.021856	-0.028649	0.092323	0.004144	0.002924	0.002937	0.009046	17	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-06	HV	784200.095	9964744.824	2494.098	0.011598	-0.000986	0.011556	-0.242049	0.004079	0.002883	0.002885	0.008770	22	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-07	HV	784120.966	9964909.726	2486.555	0.009010	0.007762	0.004576	0.273856	0.003948	0.002768	0.002815	0.008620	21	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-08	HV	784178.446	9965127.978	2484.158	0.010853	0.010513	-0.002697	-0.267008	0.003794	0.002663	0.002703	0.008093	17	0
<input checked="" type="checkbox"/>	espe-09	HV	784254.977	9965220.378	2490.793	0.009691	-0.002917	-0.009242	0.273745	0.003630	0.002546	0.002588	0.007895	23	0

Figura 42. Resultado de los residuales del ajuste de la misión de vuelo en el módulo “Georeferencing” en el Software UAS Master.

En el módulo “Surface and Ortho Generation”, el usuario puede generar los productos fotogramétricos según sus necesidades (Figura 43), dentro de este módulo debemos seguir el siguiente flujo de trabajo:

- ✓ Surface: esta herramienta me permite generar un Modelo Digital de Superficie (MDS), es el primer proceso a ejecutar.
- ✓ Orthos and Mosaic: Una vez generado el MDS, y su correspondiente nube de puntos (.las) se crea un mosaico ortorectificado verdadero. Se recomienda generar la ortofoto de la misión de vuelo antes de la edición del MDS a Modelo digital de Terreno (MDT), ya que podría generar vacíos o incoherencia en los resultados finales.

Los Productos generados en esta metodología no sufrieron ninguna edición para su validación, pero el software UAS Master es capaz de editar, interpolar la nube de puntos del MDS, para llegar a tener un MDT; existe un módulo de restitución en 3D (Figura 44), basado en el principio de la marca flotante, haciendo más fácil la edición del MDS.

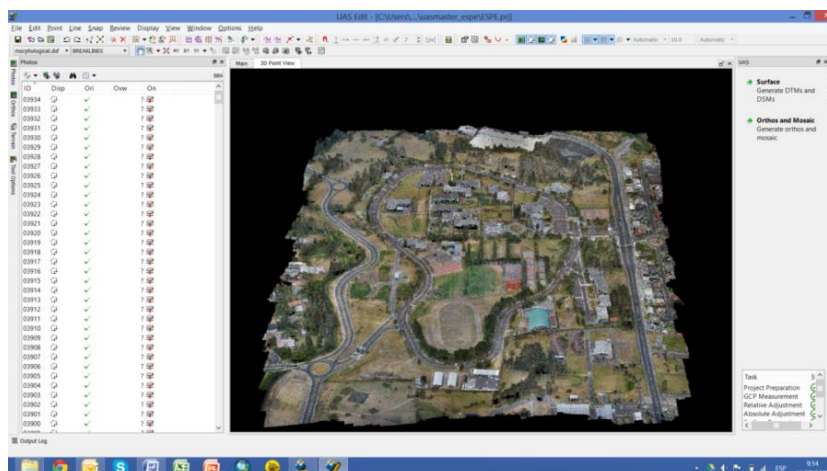


Figura 43. Módulo “Surface and Ortho Generation” en el software UAS Master.

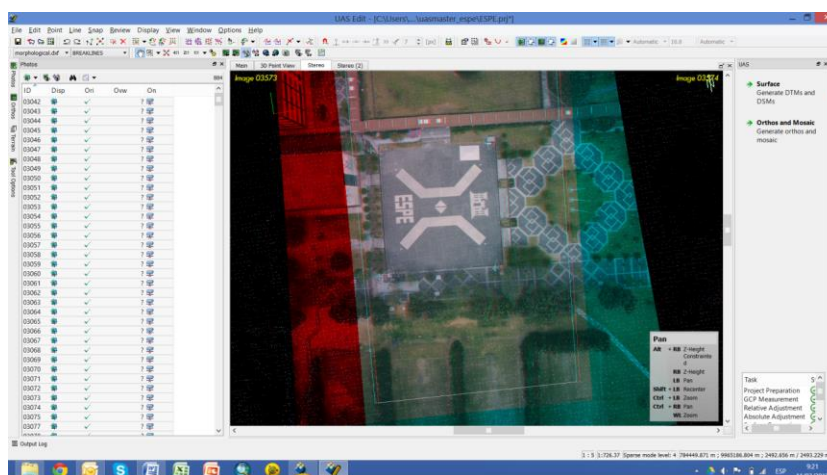


Figura 44. Herramienta para restitución estereoscópica en el Software UAS Master.

3.5. Validación de los productos fotogramétricos

La validación de los mosaicos ortorectificados evalúa tres aspectos:

- ✓ Control Horizontal
- ✓ Control Vertical
- ✓ Geometría de objetos

Para evaluar cada uno de estos aspectos, se levanta puntos de validación en lugares foto identificables, para su posterior comparación.

3.5.1. Control Horizontal

Para comprobar que los productos del UAV tienen la precisión necesaria para trabajar en escalas grandes, se tomó una muestra de 70 puntos (Figura 45), levantados con GPS de precisión en el campus universitario para montarlos sobre la fotografía y verificar el ajuste del mosaico con respecto al ajuste dado por los puntos de control en el procesamiento.



Figura 45. Distribución de los 70 puntos de validación sobre el mosaico ortorectificado.

3.5.2. Control Vertical

Para la validación del MDS, se realizó una nivelación geométrica, en dos líneas de nivelación en sentido longitudinal y transversal; utilizando la red de puntos de control como nodos de enlace al DATUM vertical nacional del Ecuador. Simultáneamente se calculó la posición horizontal de los puntos de validación con GPS en método RTK (Real Time Kinematic), pues el tamaño de pixel del MDS es de 0,20 cm. Para determinar la diferencia entre las cotas niveladas de las obtenidas en el MDS se extraen los valores utilizando herramientas de análisis raster del software ArcGis, ya que se cuenta con una licencia académica en el laboratorio de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente.

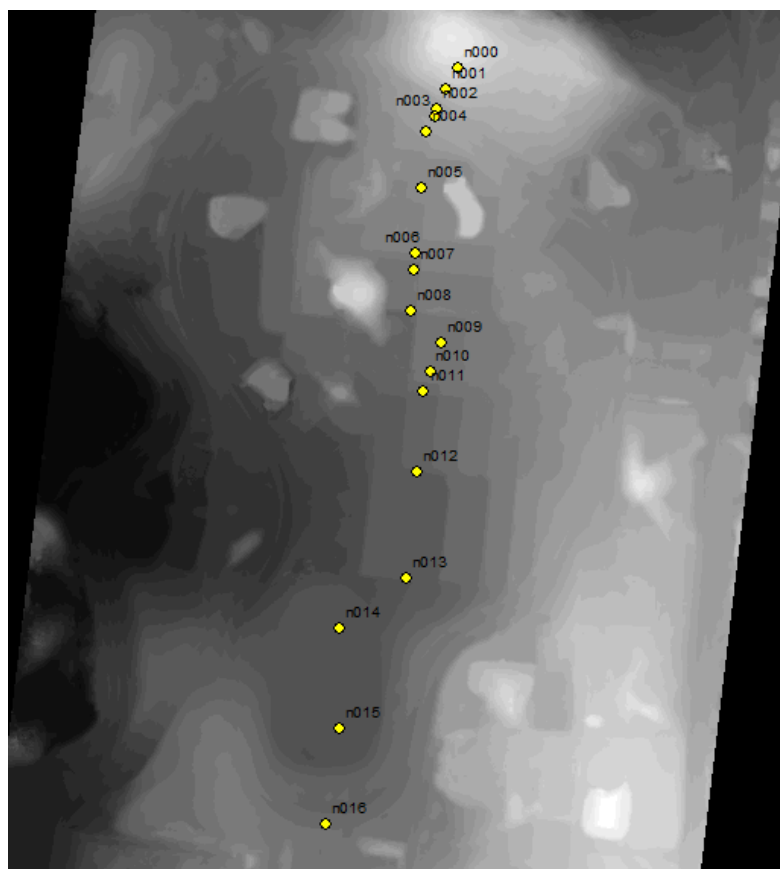


Figura 46. Línea de nivelación longitudinal para la validación del MDS.

3.5.3. Geometría de objetos

Para verificar la geometría de los objetos en los mosaicos rectificadas, se midió distancias y áreas sobre el mosaico automático y sobre el mosaico con puntos de control, para comparar con medidas realizadas en campo.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Validación Horizontal

El objetivo de este trabajo es validar el orto mosaico rectificado, producto de las fotografías aéreas obtenidas por el UAV de marca Trimble modelo UX5 para su uso en generación de información geoespacial para escalas grandes (1:1000 hasta 1:500).

Las tolerancias máximas permisibles para generar cartografía en el Ecuador, se encuentra en la Norma Ecuatoriana A2 para REALIZAR CARTOGRAFÍA TOPOGRÁFICA A CUALQUIER ESCALA, indicando, que la precisión para el control horizontal de productos cartográficos debe cumplir:

“La posición del noventa por ciento (90%) de los puntos bien definidos, no diferirán de la posición verdadera en más de dos décimas de milímetro (0,2 mm), a la escala del mapa” (IGM Ecuador, 2006)

En cumplimiento con las especificaciones técnicas, se calculó la precisión que debe cumplir la cartografía en escalas grandes, obteniendo los siguientes valores que se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.

Tolerancia de cartografía para escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.

Escala	Tolerancia Horizontal
5000	100 cm
1000	20 cm
500	10 cm

La precisión de la cartografía es el valor máximo de error aceptable en la cartografía, pero, en el presente estudio se desea validar el mosaico fotogramétrico como insumo para generar información espacial, para ello se debe cumplir con una precisión igual a un tercio de la tolerancia de la cartografía, obteniendo como resultado los valores de la Tabla 6.

Tabla 6.

Tolerancia máxima del mosaico ortorectificado para generar cartografía a escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.

Escala	Tolerancia Horizontal
5000	33,3 cm
1000	6,66 cm
500	3,33 cm

Además, la resolución del mosaico rectificado debe garantizar la digitalización del objeto mínimo a mapear, el cual según el IGM debe reflejar todos los detalles planímetros del terreno y construcciones que puedan ser observados⁷, con una dimensión mínima o mayor de quince decimas de milímetro (1,5 mm) a la escala del mapa como se puede ver en la **Tabla 7**.

Tabla 7.

Objeto mínimo a mapear para escalas grandes, basado en la Norma A2 del IGM Ecuador.

Escala	Objeto mínimo a mapear	
	Distancia	Área
5000	7,5 m	56,25 m ²
1000	1,5 m	2,25 m ²
500	0,75 m	0,56 m ²

⁷ IGM Ecuador. (17 de Mayo de 2006). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA REALIZAR CARTOGRAFÍA TOPOGRÁFICA A CUALQUIER ESCALA*

En el proceso de validación, se comparó la posición de setenta puntos sobre la fotografía aérea generada automáticamente y el mosaico ajustado al marco de referencia con puntos de control y las coordenadas obtenidas con el posicionamiento preciso con técnicas GNSS. (ANEXO 4)

Para determinar la escala máxima de los productos fotogramétricos generados automáticamente, se realizó la comparación entre los puntos GNSS y puntos del mosaico generado automáticamente, obteniendo la diferencia en sus coordenadas. (Tabla 8)

Tabla 8.

Diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.

ID	DIFERENCIA (GCP-FotoAuto) (m)		ID	DIFERENCIA (GCP-FotoAuto) (m)		ID	DIFERENCIA (GCP-FotoAuto) (m)	
	NORTE	ESTE		NORTE	ESTE		NORTE	ESTE
1	0,317	0,255	25	0,678	0,103	49	0,816	0,331
2	0,376	0,171	26	0,703	0,13	50	0,876	0,232
3	0,407	0,254	27	0,726	0,095	51	1,245	0,531
4	0,407	0,4	28	0,856	0,004	52	1,361	0,814
5	0,462	0,516	29	0,697	0,11	53	1,208	1,035
6	0,28	0,235	30	0,572	0,119	54	1,264	1,239
7	0,227	0,057	31	0,585	1,198	55	1,06	1,323
8	0,235	0,081	32	0,77	1,034	56	0,945	1,538
9	0,333	0,207	33	0,929	1,034	57	1,152	1,342
10	0,402	0,097	34	1,054	1,059	58	0,841	1,626
11	0,382	0,263	35	0,185	1,334	59	0,596	1,794
12	0,355	0,357	36	0,019	1,345	60	0,61	1,536
13	0,26	0,449	37	0,277	1,527	61	0,797	0,99
14	0,23	0,442	38	0,384	1,688	62	0,495	0,996
15	0,107	0,174	39	0,904	0,011	63	0,554	1,242
16	0,067	0,093	40	0,822	-0,095	64	0,552	1,027
17	0,28	0,048	41	0,703	-0,185	65	0,355	1,081
18	0,397	0,037	42	0,699	-0,275	66	0,335	1,007
19	0,494	0,092	43	0,829	-0,196	67	0,184	0,989
20	0,421	0,008	44	0,92	-0,26	68	0,215	0,842
21	0,306	0,065	45	1,064	-0,083	69	0,53	1,316
22	0,203	0,009	46	1,255	0,513	70	0,818	-0,639
23	0,278	0,167	47	1,122	0,504			
24	0,545	0,094	48	1,017	0,589			

La diferencia en posición de los puntos de validación GNSS y los obtenidos sobre el mosaico ajustado con puntos de control (GCP) se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9.

Diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.

ID	DIFERENCIA(GCP-FotoGCP)(m)		ID	DIFERENCIA(GCP-FotoGCP)(m)		ID	DIFERENCIA(GCP-FotoGCP)(m)	
	NORTE	ESTE		NORTE	ESTE		NORTE	ESTE
1	0,000	0,000	25	0,003	-0,004	49	-0,012	-0,008
2	0,019	-0,027	26	0,000	0,000	50	-0,001	-0,005
3	0,077	-0,005	27	0,000	0,000	51	0,010	-0,010
4	0,084	-0,090	28	-0,018	-0,034	52	0,016	-0,003
5	0,051	-0,038	29	-0,019	-0,053	53	-0,013	-0,005
6	-0,055	0,018	30	0,000	0,000	54	0,009	-0,007
7	-0,078	0,027	31	0,000	0,000	55	0,001	0,008
8	-0,049	-0,001	32	0,025	0,019	56	0,002	-0,015
9	0,000	0,000	33	0,000	0,000	57	-0,008	0,001
10	0,000	0,000	34	0,000	0,000	58	0,004	0,002
11	0,000	0,000	35	0,001	-0,034	59	-0,002	-0,016
12	-0,025	0,015	36	0,015	-0,032	60	-0,007	-0,011
13	-0,015	0,025	37	-0,031	0,029	61	-0,006	-0,021
14	-0,032	-0,025	38	0,000	0,000	62	-0,005	0,019
15	-0,014	-0,034	39	-0,001	0,002	63	0,004	-0,003
16	0,025	-0,008	40	0,002	-0,002	64	0,004	0,026
17	0,000	0,000	41	0,005	0,000	65	0,000	-0,009
18	0,034	-0,031	42	-0,008	0,005	66	-0,001	-0,009
19	0,000	0,000	43	0,000	-0,001	67	-0,011	-0,003
20	0,000	0,000	44	0,006	-0,002	68	0,009	0,010
21	0,083	0,007	45	0,006	-0,003	69	0,003	0,007
22	-0,035	-0,053	46	-0,010	0,006	70	0,001	0,017
23	0,027	-0,063	47	0,001	0,004			
24	0,000	0,000	48	0,000	0,004			

Además, se analizó la distancia que existe entre los puntos en su posición en el terreno (GCP GNSS) y en los mosaicos rectificadas (Automático; Con puntos de control), como se muestra en la Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente.

Tabla 10.

Diferencia en distancia entre los puntos de validación GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.

ID	DISTANCIA	ID	DISTANCIA	ID	DISTANCIA
	SIN GCP(m)		SIN GCP(m)		SIN GCP(m)
1	0,407	25	0,686	49	0,88
2	0,413	26	0,715	50	0,906
3	0,48	27	0,732	51	1,353
4	0,571	28	0,856	52	1,586
5	0,692	29	0,706	53	1,59
6	0,365	30	0,584	54	1,77
7	0,234	31	1,333	55	1,695
8	0,249	32	1,29	56	1,805
9	0,392	33	1,389	57	1,769
10	0,414	34	1,494	58	1,831
11	0,464	35	1,347	59	1,89
12	0,503	36	1,345	60	1,652
13	0,519	37	1,552	61	1,27
14	0,498	38	1,731	62	1,112
15	0,204	39	0,904	63	1,36
16	0,114	40	0,828	64	1,166
17	0,284	41	0,727	65	1,138
18	0,398	42	0,751	66	1,062
19	0,502	43	0,852	67	1,006
20	0,421	44	0,956	68	0,869
21	0,312	45	1,068	69	1,419
22	0,203	46	1,356	70	1,039
23	0,324	47	1,23		
24	0,553	48	1,175		

Tabla 11.

Diferencia en distancia entre los puntos de validación GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.

ID	DISTANCIA	ID	DISTANCIA	ID	DISTANCIA
	CON GCP		CON GCP		CON GCP
1	0,000	25	0,005	49	0,014
2	0,033	26	0,000	50	0,005
3	0,077	27	0,000	51	0,014
4	0,123	28	0,039	52	0,017
5	0,063	29	0,056	53	0,014
6	0,058	30	0,000	54	0,011
7	0,083	31	0,000	55	0,009
8	0,049	32	0,031	56	0,015
9	0,000	33	0,000	57	0,008
10	0,000	34	0,000	58	0,004
11	0,000	35	0,034	59	0,016
12	0,030	36	0,036	60	0,013
13	0,029	37	0,043	61	0,022
14	0,041	38	0,000	62	0,020
15	0,036	39	0,003	63	0,005
16	0,026	40	0,003	64	0,027
17	0,000	41	0,005	65	0,009
18	0,046	42	0,010	66	0,009
19	0,000	43	0,001	67	0,011
20	0,000	44	0,006	68	0,014
21	0,083	45	0,007	69	0,007
22	0,063	46	0,012	70	0,017
23	0,069	47	0,004		
24	0,000	24	0,004		

Se realizó el análisis estadístico de los resultados para definir la escala óptima de trabajo para los productos fotogramétricos, se obtuvo las estadísticas descriptivas de los valores obtenidos al comparar la posición de cada punto de validación versus su posición en los productos fotogramétricos con un nivel de confianza de 99%.

Los resultados de comparar los GCP GNSS con la posición del mosaico automático nos indica que, la posición media de la fotografía aérea automática es de 0,605 m en Norte y 0,593 en Este. Además se tiene una desviación estándar de 0,337 m en Norte y 0,536 m en Este ,como muestra la Tabla 12. El mosaico ajustado con puntos de control tiene una media en la diferencia posicional Norte/Este de 0.014 m y 0,013 m respectivamente, con una desviación estándar de 0,021 m en Norte y 0,017 m. al Este. (Tabla 13)

Tabla 12.

Estadística descriptiva de los datos obtenidos al realizar la diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GCP GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente.

<i>NORTE AUTO (m)</i>		<i>ESTE AUTO (m)</i>	
Media	0,605	Media	0,593
Error típico	0,040	Error típico	0,064
Mediana	0,553	Mediana	0,379
Desviación estándar	0,337	Desviación estándar	0,536
Rango	1,342	Rango	1,790
Mínimo	0,019	Mínimo	0,004
Máximo	1,361	Máximo	1,794
Nivel de confianza (99,0%)	0,107	Nivel de confianza (99,0%)	0,170

Tabla 13.

Estadística descriptiva de los datos obtenidos al realizar la diferencia en posición Este/Norte de los puntos de validación entre los datos GCP GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control.

<i>NORTE GCP(m)</i>		<i>ESTE GCP (m)</i>	
Media	0,014	Media	0,013
Error típico	0,003	Error típico	0,002
Mediana	0,005	Mediana	0,006
Desviación estándar	0,021	Desviación estándar	0,017
Rango	0,084	Rango	0,090
Mínimo	0,000	Mínimo	0,000
Máximo	0,084	Máximo	0,090
Nivel de confianza (99,0%)	0,007	Nivel de confianza (99,0%)	0,005

La distancia entre los puntos de validación y los GCP GNSS sobre los diferentes productos mostro que el mosaico automático tiene una media de 0,875 m, mientras la fotografía con puntos de control tiene 0,012 m de distancia promedio.(Tabla 14)

Tabla 14.

Estadística descriptiva de los datos obtenidos al calcular la distancia entre los datos GNSS y los obtenidos sobre el mosaico fotogramétrico ajustado automáticamente y con puntos de control.

<i>DISTANCIA CON GCP (m)</i>	
Media	0,021
Error típico	0,003
Mediana	0,012
Desviación estándar	0,025
Rango	0,123
Mínimo	0
Máximo	0,123
Nivel de confianza (99,0%)	0,008
<i>DISTANCIA SIN GCP (m)</i>	
Media	0,933
Error típico	0,059
Mediana	0,875
Desviación estándar	0,496
Rango	1,776
Mínimo	0,114
Máximo	1,89
Nivel de confianza (99,0%)	0,157

4.2. Geometría de objetos

Para verificar la geometría de los objetos en los mosaicos rectificadas, se procedió a medir distancias y áreas sobre el mosaico automático y sobre el mosaico con GCP (Figura 47). Al comparar las mediciones realizadas se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 15.

Resultado de la diferencia entre las medidas obtenidas sobre la fotografía ajustada con puntos de control y la fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.

Objeto	Distancia Fotografía (m)		Diferencia
	Con GCP	Sin GCP	
1	4,076	4,077	-0,001
2	11,168	11,179	-0,010
3	28,101	28,112	-0,011
4	7,787	7,787	-0,001
5	7,813	7,813	0,000
6	7,878	7,870	0,008
7	7,686	7,681	0,005
8	11,982	11,986	-0,004
Media			0,005

Tabla 16.

Resultado de la diferencia entre las medidas de área obtenidas sobre la fotografía ajustada con puntos de control y la fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.

Objeto	Área Fotografía (m ²)		Diferencia
	Con GCP	Sin GCP	
9	55,073	55,227	-0,154
10	584,986	585,786	-0,800

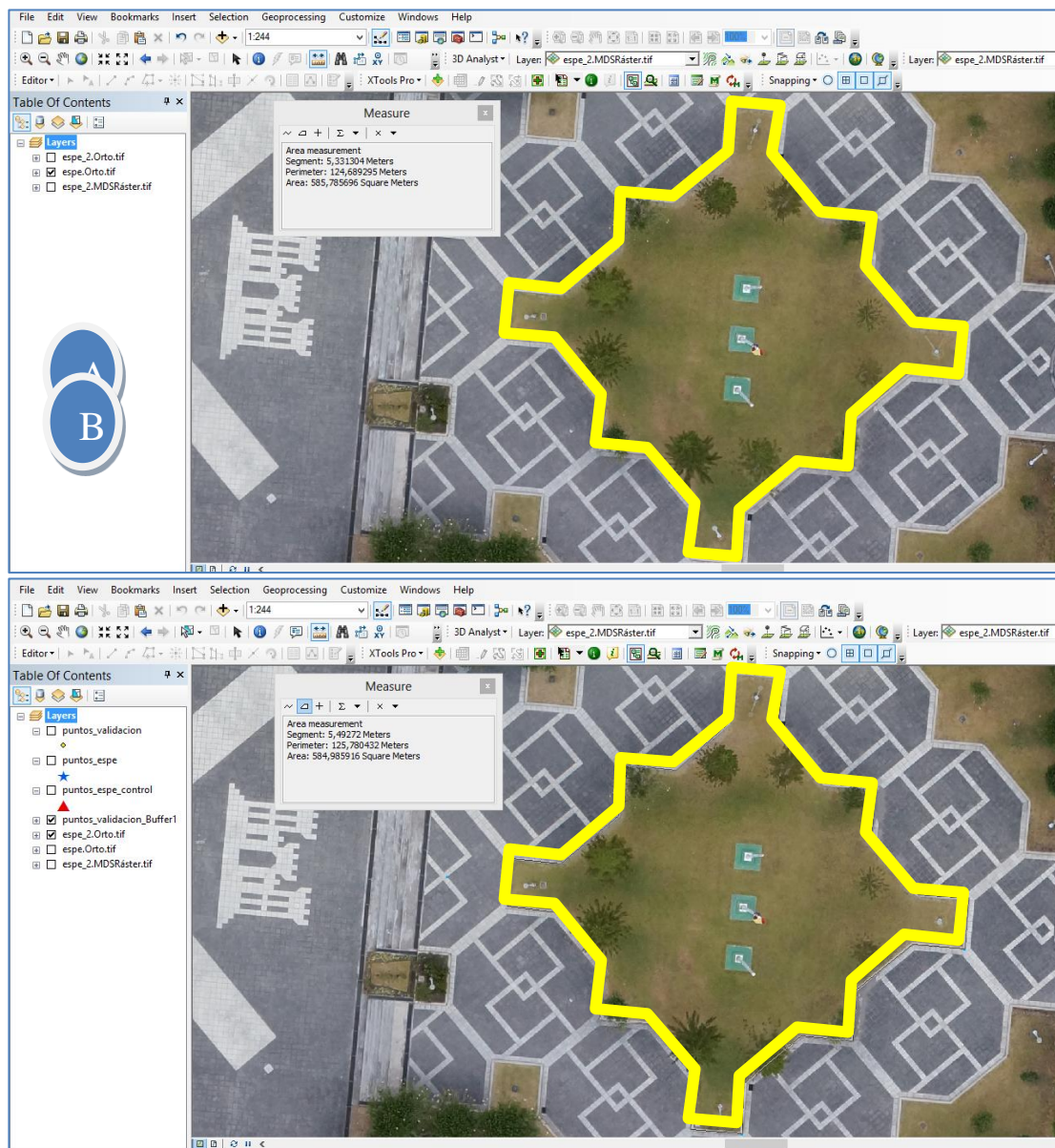


Figura 47. Medida de área del objeto N° 10 sobre (A) Fotografía ajustada con puntos de control (B) Fotografía ajustada automáticamente con coordenadas de centros de exposición de cada foto.

4.3. Validación Vertical

Para evaluar el control vertical, se debe definir la tolerancia en posicionamiento vertical; para esto, se utilizó la normativa IGM⁸, la cual exige que el noventa por ciento (90%) de los puntos bien definidos no deban diferir de la posición real del terreno en función de la escala en más de un décimo (1/10) del intervalo de curva de nivel, como indica la Tabla 17.

Tabla 17.

Precisión altimétrica en función al intervalo de curva para escalas grandes.

Escala	Intervalo de Curva	Precisión Altimétrica
1/500	50 cm	5 cm
1/1000	1 m	10 cm
1/2000	2 m	20 cm
1/5000	5 m	50 cm
1/10000	10 m	100 cm

Fuente: (IGM Ecuador, 2006)

Se evaluó 35 puntos, los cuales conformaban dos líneas de nivelación enlazadas a la red de nivelación nacional, mediante nivelación geométrica de segundo orden con una precisión de $8 \text{ mm} \sqrt{K}$, realizada anteriormente para determinar la red de puntos de control para el vuelo fotogramétrico, los resultados de la evaluación se presenta en la Tabla 18 que representa la línea de nivelación 001 (Figura 48) y la Tabla 19 representa la línea de nivelación 002 (Figura 50).

⁸ IGM Ecuador. (17 de Mayo de 2006). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA REALIZAR CARTOGRAFÍA TOPOGRÁFICA A CUALQUIER ESCALA*

Tabla 18.

Diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 001.

Línea 001			
ID	COTA	COTA	DIFERENCIA
	Nivelada	MDS	Hn
n001	2503,872	2503,894	-0,023
n002	2500,364	2500,391	-0,027
n003	2499,878	2499,955	-0,076
n004	2499,365	2499,445	-0,080
n005	2496,785	2496,768	0,018
n006	2495,585	2495,514	0,072
n007	2492,895	2492,809	0,086
n000	2507,969	2508,002	-0,033
n008	2492,622	2492,580	0,042
n009	2493,240	2493,210	0,030
n010	2493,170	2493,149	0,021
n011	2492,051	2492,050	0,001
n012	2489,325	2489,237	0,088
n013	2488,833	2488,770	0,063
n014	2487,668	2487,636	0,032
n015	2487,393	2487,438	-0,045
n016	2491,898	2492,021	-0,123

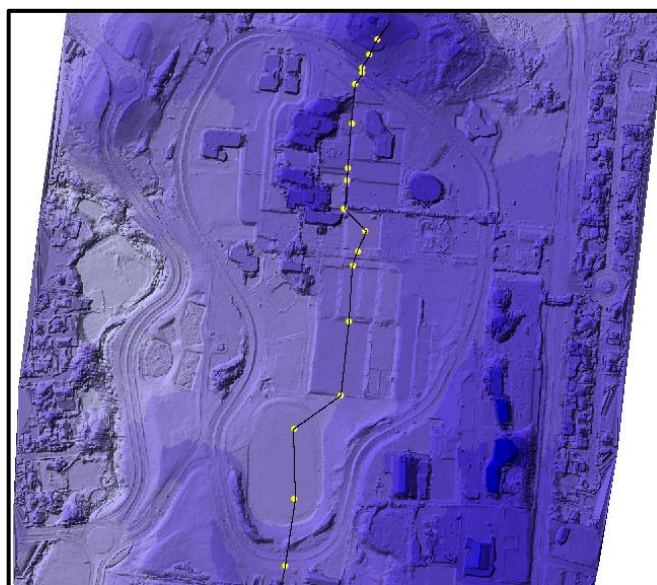


Figura 48. Línea de nivelación 001 sobre el MDS del vuelo ESPE.

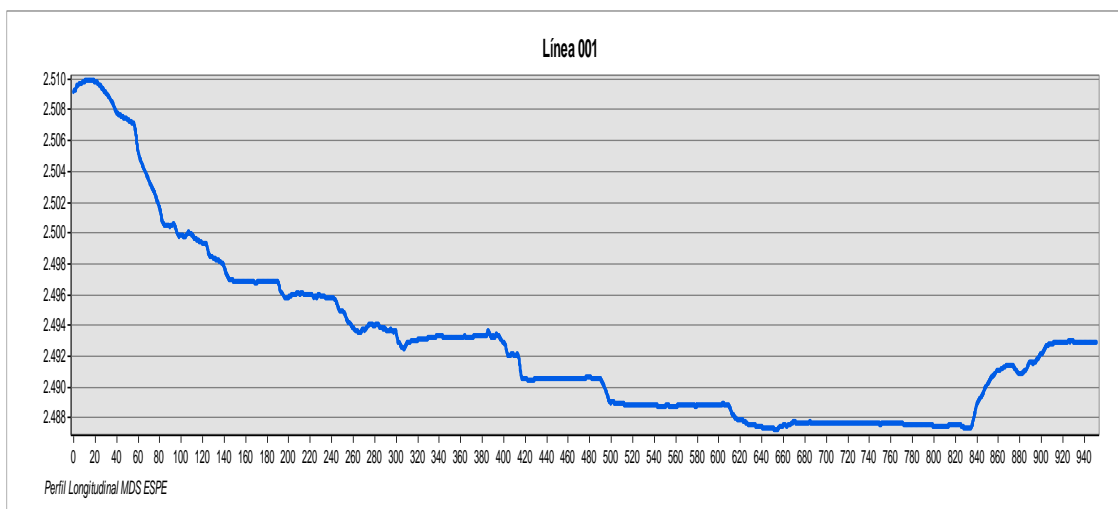


Figura 49. Perfil longitudinal de la Línea de nivelación 001 sobre el MDS del vuelo ESPE.

Tabla 19.

Diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 002.

Línea 002			
ID	COTA Nivelada	COTA MDS	DIFERENCIA Hn
n001	2498,415	2498,492	-0,077
n002	2498,208	2498,226	-0,018
n003	2498,051	2498,052	-0,002
n004	2496,906	2496,902	0,004
n005	2496,582	2496,575	0,008
n006	2496,288	2496,243	0,045
n007	2495,181	2495,129	0,052
n008	2494,838	2494,765	0,073
n009	2493,270	2493,148	0,122
n010	2491,216	2491,073	0,143
n011	2491,176	2491,038	0,138
n012	2495,565	2495,576	-0,011
n013	2490,885	2490,732	0,153
n014	2488,894	2489,023	-0,129
n015	2487,159	2487,001	0,158
n016	2486,150	2486,016	0,134
n017	2485,803	2485,754	0,049
n018	2485,840	2485,685	0,155
n019	2485,309	2485,210	0,100

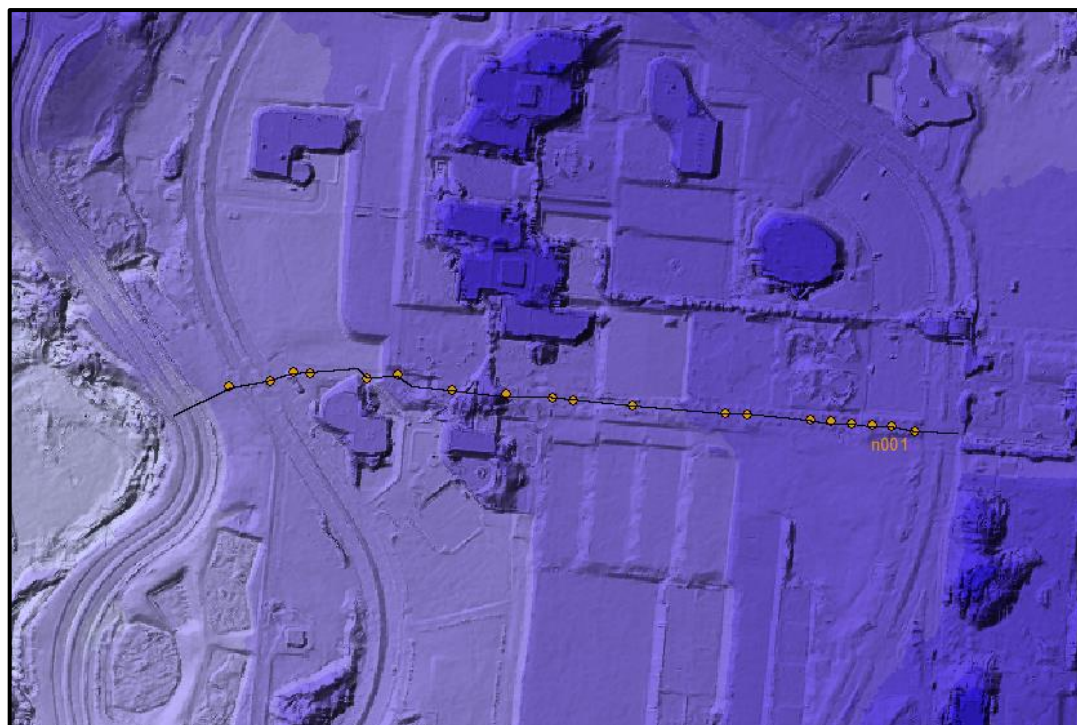


Figura 50. Línea de nivelación 002 sobre el MDS del vuelo ESPE.

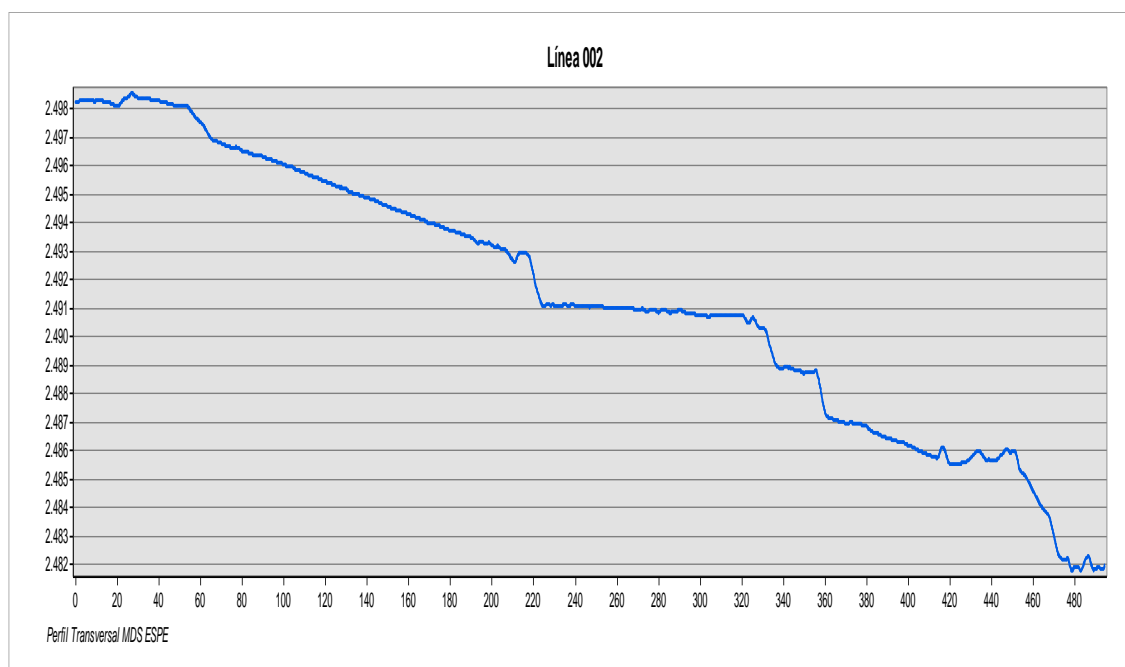


Figura 51. Perfil longitudinal de la Línea de nivelación 002 sobre el MDS del vuelo ESPE.

Se realizó el análisis estadístico de las diferencia de altura existentes entre los valores obtenidos a partir de una nivelación y los extraídos del MDS, para definir su comportamiento y establecer para que escala de trabajo es funcional este producto fotogramétrico. Los resultados de cada línea se muestran en la **Tabla 20** y **Tabla 21** respectivamente.

Tabla 20.

Análisis estadístico de la diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 001.

<i>Línea 001</i>	
<i>Diferencia Hn (m)</i>	
Media	0,051
Error típico	0,008
Mediana	0,042
Desviación estándar	0,033
Mínimo	0,001
Máximo	0,123
Nivel de confianza (99,0%)	0,023

Tabla 21.

Análisis estadístico de la diferencia entre los valores de altura nivelada y altura calculada sobre el MDS de la Línea 002.

<i>Línea 002</i>	
<i>Diferencia Hn (m)</i>	
Media	0,083
Mediana	0,077
Desviación estándar	0,058
Mínimo	0,002
Máximo	0,158
Suma	1,568
Nivel de confianza (99,0%)	0,038

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Después del análisis y validación de los mosaicos ortorectificados, resultantes de la toma de fotografía aérea con el UAV de la marca TRIMBLE modelo UX5, se obtuvo imágenes ajustadas al marco de referencia SIRGAS-ECUADOR época 2014.0, capaces de generar cartografía en escalas grandes.

La escala de trabajo máxima para el mosaico ajustado automáticamente es 1/6000; pues en la validación se observó una precisión media en las componentes de la coordenada Este de 0,605 m y Norte de 0,593 m y una distancia entre la posición real de cada punto y la obtenida sobre el mosaico de 0,933 m cumpliendo la tolerancia de 1,2 m que exige la normativa.

Para generar cartografía a escala 1/500, se debe obtener una precisión horizontal no mayor a 3,33 cm, por lo que se puede realizar sobre el mosaico fotogramétrico ajustado con puntos de control el levantamiento de información para esta escala de trabajo, ya que al validar la posición de la fotografía aérea se obtuvo una precisión horizontal media de 1,4 cm en la componente Norte y 1,3 cm en la componente Este. También se pudo observar que la distancia promedio entre los puntos de validación GNSS y los del mosaico fue de 2,1 cm; cumpliendo con la tolerancia necesaria exigida por las normas del IGM.

La escala de trabajo óptima para generar cartografía base con tecnología UAS es 1/1000, pues los puntos en su componente vertical no cumplieron con la tolerancia para escalas más grandes. Este resultado se debe a la cantidad de desniveles existentes en el área de estudio y la mala distribución de los puntos de control en altura.

La unidad mínima de mapeo para escala 1/500 es de 0,56 m², igual a un objeto de 0,75 m x 0,75 m. Los mosaicos obtenidos tienen una resolución de 4 cm por pixel, permitiendo la digitalización de objetos con dimensiones de 25 cm x 25 cm, triplicando el nivel de detalle máximo para escala 1/500.

Además se consiguieron dos productos adicionales del procesamiento fotogramétrico, el primero es un modelo digital de superficie (MDS) con una resolución espacial de 0,20 m, generado con alturas niveladas de la red de puntos de control fotogramétrico.

Comparando las alturas obtenidas en la nivelación geométrica de segundo orden y el MDS, se pudo concluir que existe una diferencia media en altura para la Línea 001 de 5,1 cm y la Línea 002 tiene un promedio de 8,3 cm; obteniendo una media general de 6,7 cm; valor que sobrepasa la tolerancia para generar curvas de nivel para cartografía base a escala 1/500, pero se definió como escala de trabajo máxima 1/1000.

5.2.Recomendaciones

La tecnología UAS, permite desarrollar nuevas metodología de trabajo para la obtención de información geoespacial, es por ello que se recomienda seguir en el proceso de validación de los productos fotogramétricos en diferentes aplicaciones, ya que representan una opción viable para realizar estudios locales que abarquen un área de estudio considerable, permitiendo optimizar tiempo. Es necesario realizar un estudio de costos para determinar la factibilidad de la tecnología UAV con respecto a la topografía convencional.

Se recomienda realizar un procesamiento con mayor número de puntos de control en altura para mejorar la precisión del MDS y la Nube de puntos para alcanzar una escala de trabajo más grande.

Es necesario realizar un análisis en el procesamiento de los datos, para definir la cantidad mínima de puntos de control necesarios para obtener un ajuste óptimo en la componente horizontal.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. H. (11 de Enero de 2011). *Aprobación Operacional de vuelo para un UAS*. Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de Universidad Politécnica de Catalunya:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/12465/1/memoria.pdf>
- Atlas Global de la Región de Murcia . (2015). *Capítulo I*. Recuperado el 3 de Feb de 2015, de Cartografía :
<http://www.atlasdemurcia.com/index.php/secciones/3/cartografia-actual-topografica-ortofotos-satelite/2/>
- Barrientos, A., Cerro, J. d., Gutiérrez, P., Martín, R. S., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y Aplicaciones*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid:
<http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- Bento, M. d. (Enero-Febrero de 2008). *Unmanned Aerial Vehicles: An Overview*. Recuperado el 20 de Febrero de 2015, de Inside GNSS:
<http://www.insidegnss.com/auto/janfeb08-wp.pdf>
- Cisneros, D. (2013). *RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR - REGME CENTRO DE PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS DEL ECUADOR - CEPGE*. Quito: IGM.
- García, J. D. (20 de Abril de 2010). *Fotogrametría Digital*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de Universidad de Jaén-Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría:
http://coello.ujaen.es/Asignaturas/fotodigital/descargas/FD_tema1.pdf

- GTB Ibérica. (2014). *UAS Master de Trimble*. Recuperado el 4 de Marzo de 2015, de <http://www.gtbi.net/wp-content/plugins/gallery/uploads/pdf/9201415204144.pdf>
- IGM Ecuador. (17 de Mayo de 2006). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA REALIZAR CARTOGRAFÍA TOPOGRÁFICA A CUALQUIER ESCALA*. Recuperado el 28 de Abril de 2015, de INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR ECUADOR:
http://www.inigemm.gob.ec/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1&Itemid=86
- ITRF. (Abril de 2014). *International Terrestrial Reference Frame*. Recuperado el 02 de Febrero de 2015, de http://itrf.ign.fr/trs_trf.php?page=1
- Lahoz, J. G. (2014). *EL MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL*. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA MASTER DE GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.
- Leiva, C. (2003). *Determinación de Parámetros de Transformación entre los Sistemas*. Sangolqui.
- Perez, J. A. (2001). *Apuntes de fotogrametría II*. Recuperado el 6 de Febrero de 2015, de Universidad de Mérida:
http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria_analitica/ApuntesFotogrametria2.pdf
- Rovira, O. V. (Julio de 2011). *Modelización de aeronaves no tripuladas con*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica :
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/12919/1/memoria.pdf>

- Sánchez, J. A. (2006). *INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos.
- Sanchez, L. (2004). *Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA – SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Bogota: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Santacruz, A. G. (2010). *Transformación entre el Sistema PSAD56 y los Marcos de Referencia ITRF utilizando los modelos de Helmert y de velocidades de placas tectónicas VEMOS*". Sangolqui.
- Service International Earth Rotation. (2013). *IERS*. Recuperado el 02 de Febrero de 2015, de <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRS/itrs.html>
- SIRGAS. (01 de Noviembre de 2011). *Realizaciones SIRGAS*. Recuperado el 04 de Febrero de 2015, de <http://www.sirgas.org/index.php?id=53>
- SIRGAS. (11 de Enero de 2015). *SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*. Recuperado el 03 de Febrero de 2015, de <http://www.sirgas.org/index.php?id=64>
- TRIMBLE. (2013). *TRIMBLE UX5 AERIAL IMAGING SOLUTION*. Recuperado el 15 de Octubre de 2014, de TRIMBLE SURVEY, WESTMINSTER, CO, EE.UU.: http://uas.trimble.com/sites/default/files/downloads/trimble_ux5_whitepaper_spanish.pdf
- TRIMBLE. (2014). *Notas Técnicas Software Trimble Business Center*. Obtenido de http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-499540/022543-256H-ESP_TrimBusCenter_TN_0114_LR.pdf

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. (2015). *Guía de Usuario Solución Trimble UX5*.

Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de TRIMBLE UAS:

<http://uas.trimble.com/media/downloads>

UAS Trimble. (s.f.). *Sistemas aéreos no tripulados de Trimble para topografía y cartografía*. Recuperado el 2 de 03 de 2015, de UAS Trimble:

<http://uas.trimble.com/sites/default/files/downloads/022543-577->

[esp_trimbleuas_bro_0613_lr.pdf](http://uas.trimble.com/sites/default/files/downloads/022543-577-esp_trimbleuas_bro_0613_lr.pdf)

Valero, J. L., Ribera, C. F., & Bellver, J. A. (2004). *Catastro y Valoración Catastral*.

Valencia: Ed. Univ. Politéc. Valencia.

Zurita, P. (2011). *INFORME TECNICO PARA LA ADOPCION DEL MARCO*

GEODESICO DE REFERENCIA NACIONAL SIRGAS – ECUADOR. Quito:

INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR-ECUADOR.

ANEXOS