



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS

**MAESTRÍA EN GEOMÁTICA CON MENCIÓN EN
ORDENAMIENTO TERRITORIAL V2**

**Evaluación de Método de Corrección Geométrica de
Fotografía Aérea escala 1:1.000 capturada por vehículos
aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de
cuarto orden.**

**Tesis de Posgrado de Magister Geomática con Mención en
Ordenamiento Territorial**

Autor: Juan Pablo Rivera Yela

Director: Ing. Diego Pacheco.

Cuenca, Ecuador

2016

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a mi Familia, por apoyarme en todo momento y circunstancia de la vida; sin ellos no podría conseguir los logros que he podido alcanzar. Agradezco principalmente a Elvita, gracias a ella soy el hombre que soy, te amo Mamá. A mi hermana María Eugenia por apoyarme cuando más lo necesitaba, a Susana por todo el amor, a Mauricio, Enrique y Tania por ser mis amigos, confidentes y apoyo. A todos mis sobrinos y sobrinas por su amor y juegos.

Por supuesto y no menos importante, dedico este trabajo a mi esposa Lisseth, que gracias a su amor, paciencia y comprensión me ha dado su apoyo en todo momento y me ha impulsado a cumplir objetivos en todo ámbito. Te amo

Además dedico este esfuerzo y trabajo a mi hijo Juan Javier, que para él es todo este esfuerzo, para que nunca te falte nada... sobretodo amor. Te amo hijo.

AGRADECIMIENTOS

Hay muchas personas e instituciones que debo agradecer, entre estas: Omar Delgado por ser un verdadero maestro y guía, quien supo formarme en el tema de Geomática; a la empresa INSIGMA Cia Ltda, en especial a mi amigo y hermano Carlos Cabrera, quien me impulso a no contentarme con un pregrado, sino me incentivó a superarme. A la empresa DRONEXT Cia Ltda, en especial a Diego Ríos y Lisseth Cure, quienes confiaron en mí para la ejecución de esta investigación. Además debo agradecer a Diego Pacheco, Paul Ochoa, y Chester Sellers que con sus valiosos consejos supieron mejorar la presente investigación.

Y por último agradezco a quien me involucro en este mundo tan apasionante de la Geomática, él fue mi amigo y guía, quien con sus charlas interminables supo sembrar en mí la curiosidad por investigar. Él decía... “hay que caminar sobre espaldas de gigantes...”, gracias Eugenio Molinet por ser quien fue, y ser quien es todavía.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 2.	METODOLOGÍA.....	6
2.1	Descripción del Sitio de Estudio.....	6
2.2	Descripción del Trabajo de Campo.....	7
2.3	Fase de Laboratorio.	17
CAPÍTULO 3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
3.1	Post – procesamiento de Red Geodésica de 4to Orden o GCP	19
3.2	Procesamiento Vuelo	23
3.2.1	Modelo 1: Calibración de la Ortofoto con GCP´s post-procesados por programa GNSS Solution.....	26
3.2.2	Modelo 2: Calibración de la Ortofoto con GCP´s post-procesados por programa Trimble Business Center con 6 GCP.....	29
3.2.3	Modelo 3: Calibración de la Ortofoto con GCP´s post-procesados por programa Trimble Business Center con 4 GCP.....	31
3.2.4	Modelo 4: Calibración de la Ortofoto con GCP´s post-procesados por programa GNSS Solutions con 4 GCP.	33
3.2.5	Comparación visual entre Modelos.....	35
3.2.6	Comparación visual con ortofoto del proyecto SIGTIERRAS.....	36
3.3	Comparación de los resultados de los Modelos obtenidos con las Especificaciones Técnicas del IGM.....	38
3.3.1	Con las Especificaciones técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a Cualquier Escala (Primer Borrador) año 2006.	38
3.3.2	Con las Especificaciones técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador) año 2008.	39
3.3.3	Otros Resultados.....	41
CAPÍTULO 4.	CONCLUSIONES.....	43
CAPÍTULO 5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Coordenadas Medidas y Post – procesadas con Programa GNSS Solutions</i>	_____	20
Tabla 2.	<i>Datos Completos (6 Puntos) procesados con el programa TBC</i>	_____	22
Tabla 3.	<i>Cuatro Puntos de Control procesados con el programa TBC</i>	_____	23
Tabla 4.	<i>Lista de comprobación de actividades a realizar para la toma de Fotografía aérea.</i>	__	38
Tabla 5.	<i>Sumatoria de Errores de Post-procesamiento de Datos para Modelo 3</i>	_____	40

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Fotografías del procedimiento de colocación y medición de los GCP de la red Geodésica a) Colocación del GCP Antes de la Medición. b) Colocación del GCP Antes de la Medición. c) Marca del GCP lista para Medición. d) Medición del GCP con el DGPS _____	8
Imagen 2. Marcas de suelo en los GCP medidos. a) Detalle de Marcas de Tierra Punto 1. b) Detalle de Marcas de Tierra Punto 1. _____	16
Imagen 3. Ejecución del vuelo. a) Preparación del Drone para el Vuelo. b) Comprobación del Plan del Vuelo. c) Medición de altura y velocidad del viento. d) Despegue del dron. _____	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Ubicación del sitio de estudio</i>	6
Figura 2	<i>Tiempo estación Cuenca (REGME) con respecto al tiempo de levantamiento en el sitio de estudio.</i>	9
Figura 3	<i>Post - procesamiento de los datos levantados.</i>	10
Figura 4	<i>Ingreso de puntos de Levantamiento de Red Geodésica de 4to Orden</i>	10
Figura 5	<i>Procesamiento de datos con el programa Trimble Business Center</i>	11
Figura 6	<i>Calculo de diferencias entre distintos Datum: SIRGAS 95 y WGS84</i>	12
Figura 7	<i>Plan de Vuelo en Programa eMotion 2</i>	14
Figura 8	<i>Visualización de plan de vuelo en Google Earth</i>	14
Figura 9	<i>Distribución de la Red Geodésica de 4to Orden o GCP.</i>	15
Figura 10	<i>Resultado del post-procesamiento del TBC para los GCP's de la red geodésica de 4to orden.</i>	21
Figura 11	<i>Errores de Información de satélite para P1</i>	21
Figura 12	<i>Errores de Información de satélite para P2</i>	22
Figura 13	<i>Inicio de proceso de calibración de datos obtenidos del Drone</i>	24
Figura 14	<i>Combinación de datos y calibración de fotos y datos de GPS y sensor de altura</i>	24
Figura 15	<i>Pasos de calibración de fotografías aéreas.</i>	25
Figura 16	<i>Reporte de calidad de productos de Pix4DMapper datos GNSS Solutions (6 GCP)</i>	27
Figura 17	<i>GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregido Modelo 1</i>	28
Figura 18	<i>Reporte de Calidad de Productos de Pix4DMapper, Datos TBC (6 GCP)</i>	29
Figura 19	<i>GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregida Modelo 2</i>	30
Figura 21	<i>GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregida Modelo 3</i>	32
Figura 22	<i>Reporte de calidad de productos de Pix4DMapper, Datos GNSS Solutions (4 GCP)</i>	33
Figura 23	<i>GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregida Modelo 4</i>	34
Figura 24	<i>Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 1.</i>	35
Figura 25	<i>Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 2.</i>	36
Figura 26	<i>Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 4</i>	36
Figura 27	<i>Comparación visual de precisión entre ortofoto del SIGTIERRAS y el Ortofotomosaico de la presente investigación</i>	37
Figura 28	<i>Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales</i>	40
Figura 29	<i>Nube de Puntos (Formato LAS)</i>	41
Figura 30	<i>Modelo Digital de Superficie</i>	42

EVALUACIÓN DE MÉTODO DE CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE FOTOGRAFÍA AÉREA ESCALA 1:1.000 CAPTURADA POR VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS ESTABLECIENDO UNA RED GEODÉSICA DE CUARTO ORDEN.

Resumen

La presente investigación evalúa la calidad y precisión del levantamiento de fotografía aérea con nuevas herramientas tecnológicas. Para ello se realizó el levantamiento de fotografía a escala 1:1.000 de un área de 30 hectáreas por medio de un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV por sus siglas en inglés), más conocido como Drone; esto en la ciudad de Paute, provincia de Azuay (sierra sur del Ecuador). Para ello se estableció una red geodésica de cuarto orden o GCP (Ground Control Point) para corregir los errores de posicionamiento del drone, con programas especializados. Con esta información se procesaron los datos del levantamiento de fotografía aérea y se compararon con las especificaciones técnicas generales para realización de cartografía topográfica a cualquier escala, y con las Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales, para dadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM). Se pudo comprobar que el ortofotomosaico realizado con el drone cumple con las especificaciones técnicas mencionadas tanto en su precisión horizontal como vertical.

Palabras Clave: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) , Drone, Instituto Geográfico Militar (IGM), Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), Sistema de Posicionamiento Global con Diferencial (DGPS), Ground Control Point (GCP)

EVALUATION OF THE AERIAL PHOTOGRAPHY GEOMETRIC CORRECTION METHOD SCALE 1: 1000 CAPTURED BY UNMANNED AERIAL VEHICLES, BY ESTABLISHING A FOURTH ORDER GEODESIC NETWORK.

ABSTRACT

This research carried out in the city of Paute, Azuay province (southern Ecuador, mountain region) evaluates the quality and precision of aerial photography with new technological tools. In order to achieve this, a picture at a 1: 1000 scale of a 30-hectare area was taken through an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) better known as Drone, which required establishing a fourth order geodetic network or GCP (Ground Control Point) to correct drone positioning errors through specialized programs. With this information, the data of aerial photography survey were processed and compared with the general technical specifications for implementing topographic maps of any scale, as well as with the Technical Specifications for Digital Orthophotography provided by the Military Geographic Institute of Ecuador (IGM, as per its Spanish acronym). It was found that the orthophotomosaic made with the drone meets the technical specifications both in horizontal and vertical accuracy.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Drone, Military Geographical Institute (IGM), GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador (REGME), Differential Global Positioning System (DGPS), Ground Control Point (GCP)



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

GLOSARIO.

- **DGPS:** Sistema de Posicionamiento Global con Diferencial
- **GNSS:** Sistemas Satelitales de Navegación Global
- **DSM:** Modelo Digital de Superficie
- **GCP:** Groud Control Point
- **GLONASS:** Global Navigation Sputnik System
- **IGM:** Instituto Geográfico Militar
- **ITRF:** Marco de Referencia Terrestre Internacional
- **INEC:** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
- **EEUU:** Estados Unidos de Norte América
- **REGME:** Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador
- **RINEX:** Receiver Independent Exchange
- **SIRGAS:** Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
- **TBC:** Trimble Business Center
- **UAV:** Unmanned Aerial Vehicle
- **WGS84:** Sistema Geodésico Mundial de 1984

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) por sus siglas en inglés, se los define como un vehículo aéreo motorizado, que no lleva a bordo tripulante humano, y que por su propulsión se mantiene en sustentación. Puede volar autónomamente o ser manejado de forma remota; mantienen autonomía propia tanto en despegue, vuelo y aterrizaje, y son equipados con diversos sensores, y han sido diseñados para cumplir varios propósitos, entre estos civiles y militares. (Velasco, *et al*, 2012; Cuerno, 2015)

Los UAV's, o más conocidos como Drones, no son de invención reciente, se tienen registros de estas invenciones desde finales del siglo 19 e inicios del siglo 20 (Cuerno, 2015; Haluani, 2015). Los pioneros en su invención fueron los europeos, ya que ellos desarrollan modelos de aeronaves no tripulada a escala cuando investigaban los principios de la aeronáutica. Luego con el transcurrir de las décadas los UAV's fueron evolucionando, de prototipos a aplicaciones netamente militares, como aviones de reconocimiento militar o espías, hasta que en las décadas de 1990 y 2000 se realizaron bombardeos en guerras de los EEUU con la de Irak y Afganistán. (Cuerno, 2015)

Con el desarrollo y advenimiento de la tecnología (a partir de la última década), tanto de posicionamiento (DGPS, GLONASS), como el desarrollo de la fotografía digital, y sensores aeroportables (cada vez de menor peso y dimensiones), el desarrollo de los UAV's de diversos usos civiles y comerciales se ha masificado.

Es por esto que en el último quinquenio (2010 – 2015) se han desarrollado drones que capturan fotografía aérea y la georreferencian (X, Y), a más están equipados con sensores especializados que capturan alturas (Z), y generan modelos digitales de elevación, de superficies, que a su vez generan productos cartográficos como topografía a detalle, productos fotogramétricos; productos básicos para proyectos de ingeniería civil, planificación urbana, gestión de riesgos, entre otros. (Paredes y Noguera, 2015)

Ha existido mucho debate a nivel local y nacional sobre la exactitud y precisiones de los productos obtenidos en los levantamientos con UAV's; es por esto que el presente estudio pretende evaluar el Método de Corrección Geométrica (Georeferencial) de Fotografía Aérea capturada por un UAV, estableciendo una red Geodésica de cuarto orden en 30 hectáreas (aproximadamente) de la ciudad de Paute, cantón Paute de la provincia del Azuay; siguiendo las especificaciones técnicas generales para realización de cartografía topográfica a cualquier escala dadas por el IGM (2006).

Este estudio permite conocer si las precisiones y exactitud de los datos obtenidos con un UAV son los requeridos por el Instituto Geográfico Militar para este tipo de estudios.

Los levantamientos de fotografía aérea a detalle, utilizando la metodología tradicional de tomas con aviones tripulados, presentan varios limitantes, entre estos los elevados costos de toma de fotografía aérea tradicional, condiciones óptimas climáticas para vuelos tripulados, tramitología de permisos para vuelos, entre otros; en tanto que el levantamiento de fotografía aérea con drones representa costos menores, las condiciones de clima no son tan estrictas debido a las alturas de vuelo, los permisos de vuelo son menos complicados de obtener, mantienen mayores precisiones, ahorran tiempo en los levantamientos, entre otras (Coello y Ballesteros, 2014).

Por tanto la hipótesis de la presente investigación fue:

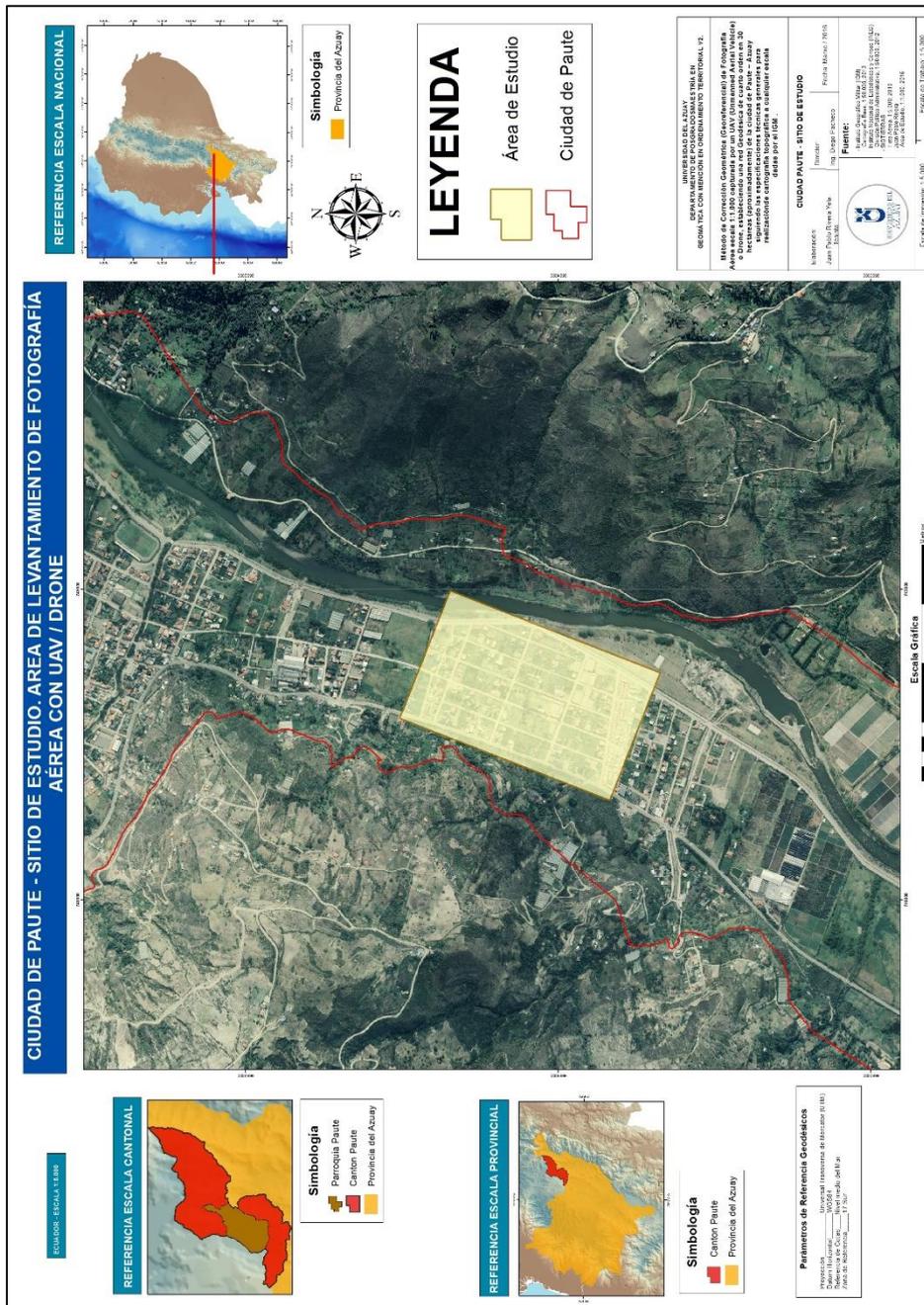
El levantamiento de fotografía aérea con UAV / Drone de 30 hectáreas (aproximadamente) a escala 1:1.000 de la ciudad de Paute cumple los estándares de calidad y precisión que requiere el IGM en sus "Especificaciones Técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a cualquier Escala (Primer Borrador)" y además con las "Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador); estableciendo una red geodésica de cuarto orden.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.

2.1 Descripción del Sitio de Estudio.

El sitio de estudio, se ubica al noroeste de la provincia del Azuay (sierra sur del Ecuador), en el cantón Paute, parroquia del mismo nombre, con mayor especificidad en la zona sur de la ciudad de Paute. La superficie levantada fue de 30 hectáreas (ha) de las aproximadamente 400 ha que presenta la ciudad. (INEC, 2011) (Figura 1)

Figura 1 Ubicación del sitio de estudio.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: INEC, 2011

2.2 Descripción del Trabajo de Campo.

2.2.1. Armado de la Red Geodésica de 4to Orden o Puntos de Control de Suelo (GCP)

Como primer paso se identificó la zona de la ciudad de Paute, que contenga una superficie aproximada de 30 ha (el tamaño elegido se basa en que con esta superficie se puede obtener una muestra representativa de la ciudad, a más que es un tamaño manejable por el volumen de información) para realizar las mediciones, además, que conste de zonas urbanas consolidadas, por consolidar, infraestructura vial, y lotes no baldíos (Figura 1).

Como segundo paso fue la adquisición de la memoria técnica de la estación Cuenca (CUEC) (Anexo 1) de la REGME, que, por su cercanía (28,7 km) al sitio de estudio fue la más indicada para usar los datos para el post-procesamiento. Para conseguir la información del día del levantamiento es necesario realizar la compra en el departamento de Geo-Márquetin del Instituto Geográfico Militar. Los datos de la estación se debieron transformar a formato RINEX, previo a su uso.

Luego, se realizaron las mediciones para la Red Geodésica de 4to Orden o Punto de Control de Suelo (GCP por sus siglas en inglés), ésta constó de 6 puntos. Con el uso de dos DGPS (Spectra Promark 120); mismos que estaban programados como móviles para que tomen los datos en modo Cinemático - Stop and Go, y almacenen sus datos para post-procesamiento, con un tiempo no menor a 30 minutos de lectura por cada punto. Una de las principales consideraciones que se debe tener, es que la antena esté a una altura fija (1,5 m de la superficie) y que este perfectamente nivelada (horizontal y vertical) con respecto al clavo de posicionamiento que fue instalado con anterioridad. (Pachas, 2009).

Imagen 1. Fotografías del procedimiento de colocación y medición de los GCP de la red Geodésica a) Colocación del GCP Antes de la Medición. b) Colocación del GCP Antes de la Medición. c) Marca del GCP lista para Medición. d) Medición del GCP con el DGPS



Fuente: Juan Pablo Rivera, 2016

2.2.2. Post – Procesamiento de Datos levantados para la Red Geodésica de 4to Orden o GCP.

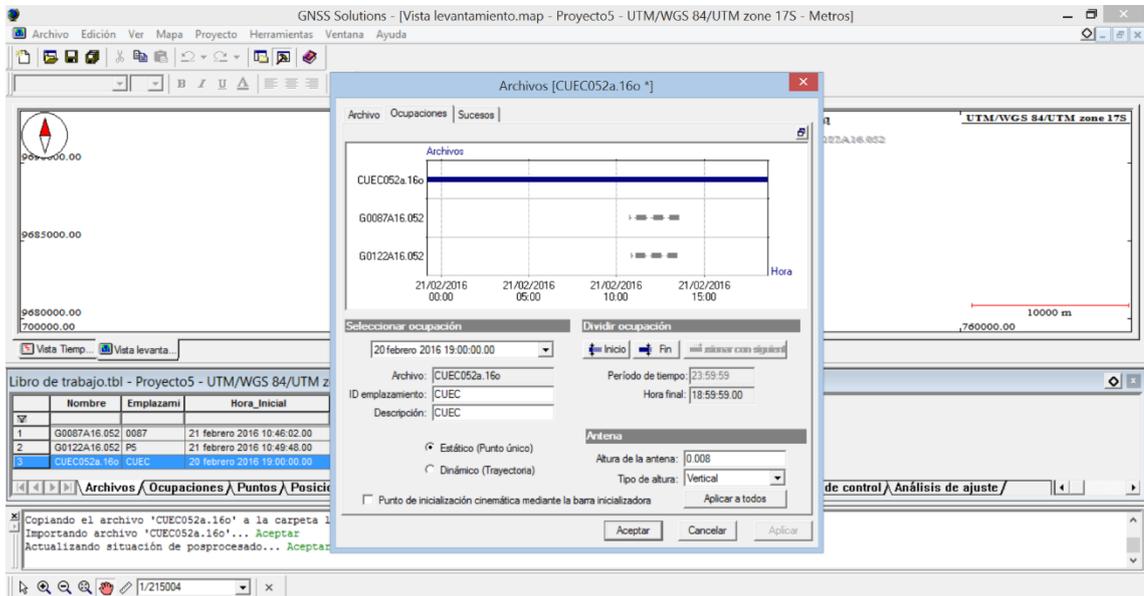
Luego de realizado el levantamiento de red geodésica en campo, se realizaron las correcciones de pos-procesamiento de los datos por medio del programa GNSS Solutions (programa propio del DGPS) y Trimble Business Center V3.4.

Procesamiento con programa GNSS Solutions.

Para el post-proceso de los datos, se debe considerar el día GPS de la estación Cuenca (CUEC), mismo que inicia desde las 19h00 del día 20/02/2016; y culmina a las 17h00 del día 21/02/2016, cubriendo de manera adecuada las horas de levantamiento o medición de la red geodésica de cuarto orden o GCP; misma que fue efectuada entre las 10h30 hasta 13h30 del

21/02/2016. En la Figura 2 se puede observar la ocupación del tiempo de la estación con referencia al tiempo empleado en el levantamiento.

Figura 2 Tiempo estación Cuenca (REGME) con respecto al tiempo de levantamiento en el sitio de estudio.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016
Fuente: GNSS Solutions, 2016

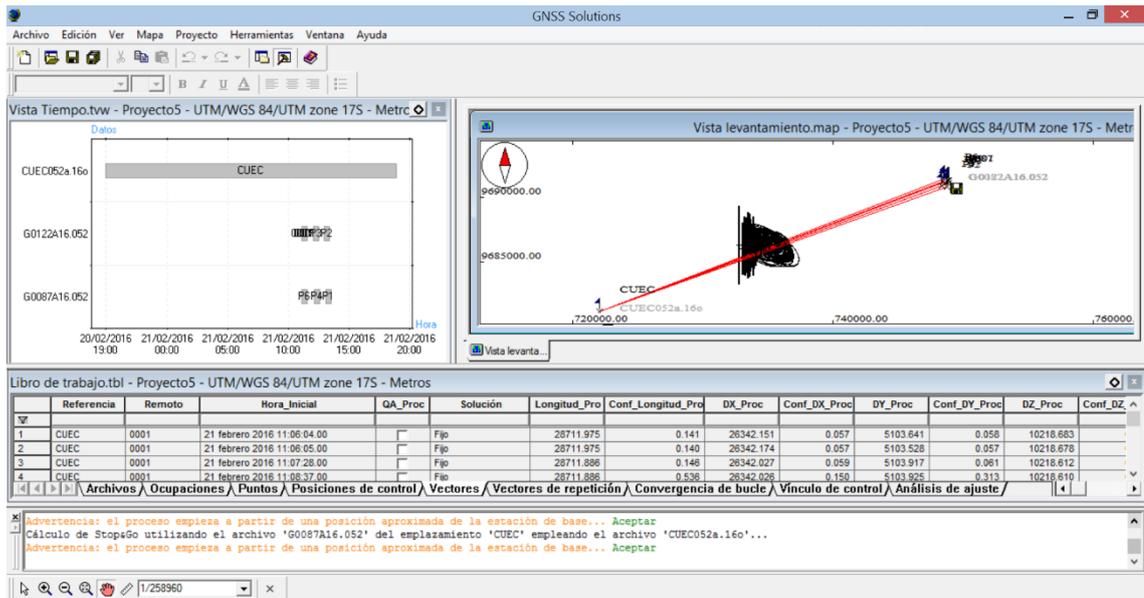
Se debe indicar que al crear un proyecto nuevo en este programa, es necesario calibrar los datos de Datum, y demás parámetros para que sean compatibles con los datos de los GCP y con los datos de la estación CUEC.

La estación CUEC presenta las siguientes coordenadas oficiales (IGM, 2014)

- **Latitud:** 9681111,501
- **Longitud:** 722037,597
- **ITRF:** 94
- **DATUM:** SIRGAS 95
- **ÉPOCA DE REFERENCIA:** 1995.4
- **ELIPSOIDE DE REFERENCIA:** GRS80

Se procedió a realizar el post-procesamiento de los datos de los DGPS con relación a la estación Cuenca. (Figura 3), en donde se dibujan y calculan los vectores de calibración desde la estación CUEC hacia los puntos levantados.

Figura 3 Post - procesamiento de los datos levantados.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

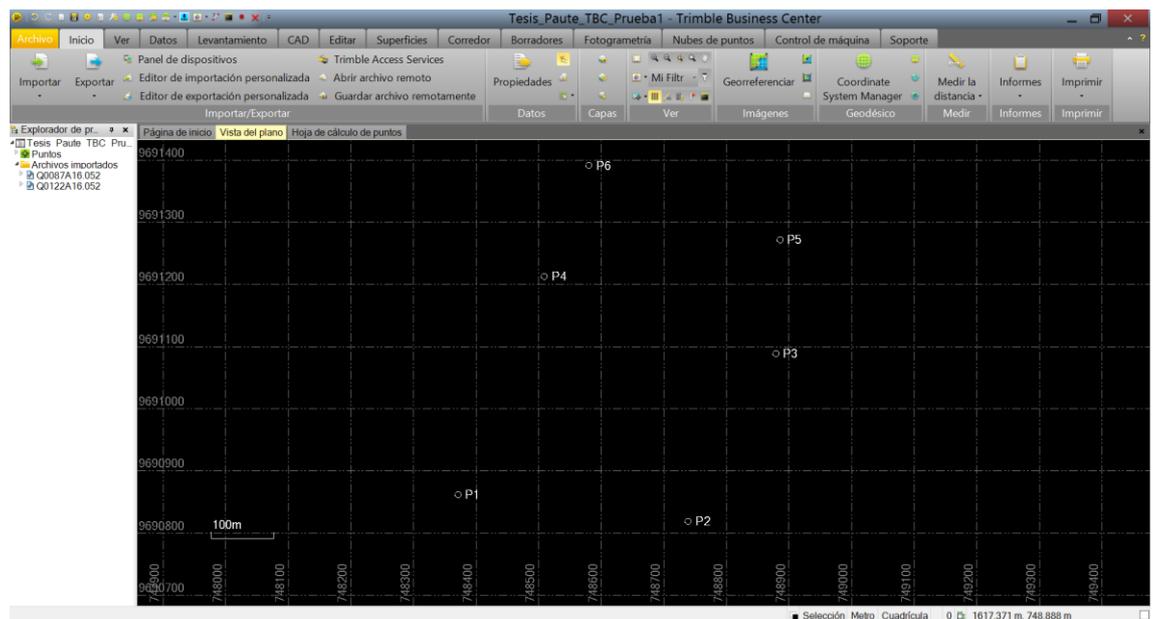
Fuente: GNSS Solutions, 2016

Luego de este paso, se procede a generar el reporte de procesamiento, en donde se obtienen las coordenadas corregidas y sus residuales. (Anexo 2)

Procesamiento con Programa Trimble Business Center (v. 3.4)

El procedimiento es similar al programa anterior, se adicionan los puntos, previo a la colocación adecuada del Datum, y el elipsoide de referencia. (Figura 4)

Figura 4 Ingreso de puntos de Levantamiento de Red Geodésica de 4to Orden

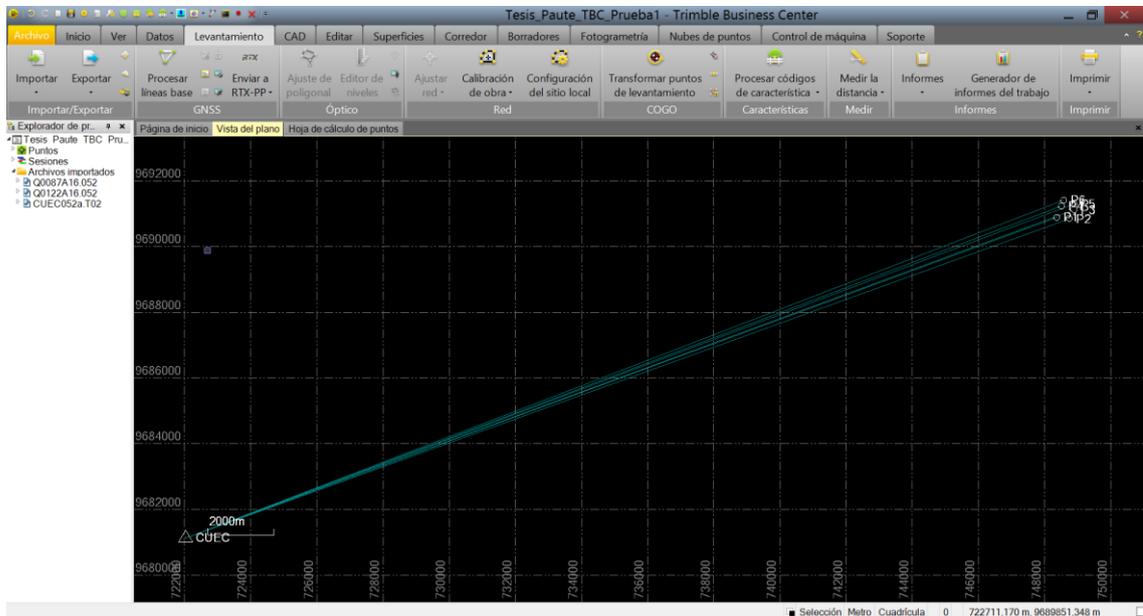


Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Trimble Business Center, 2016

Con un mecanismo similar al programa anterior, se realiza la corrección con los datos de la estación CUEC; de la misma manera se generan los vectores de corrección y se genera el reporte de corrección de los datos y sus residuales (Anexo 3).

Figura 5 Procesamiento de datos con el programa Trimble Business Center



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Trimble Business Center, 2016

Se debe anotar que tanto los DGPS, el Plan de Vuelo, el drone, y los parámetros de calibración de los programas empleados para el post-procesamiento de datos crudos de los DGPS (GNSS Solutions, Trimble Business Center), así como el de post-procesamiento del drone (Pix4DMapper) estaban con las siguientes coordenadas:

- **PROYECCIÓN:** UTM
- **DATUM:** WGS84
- **ZONA DE REFERENCIA:** 17 Sur

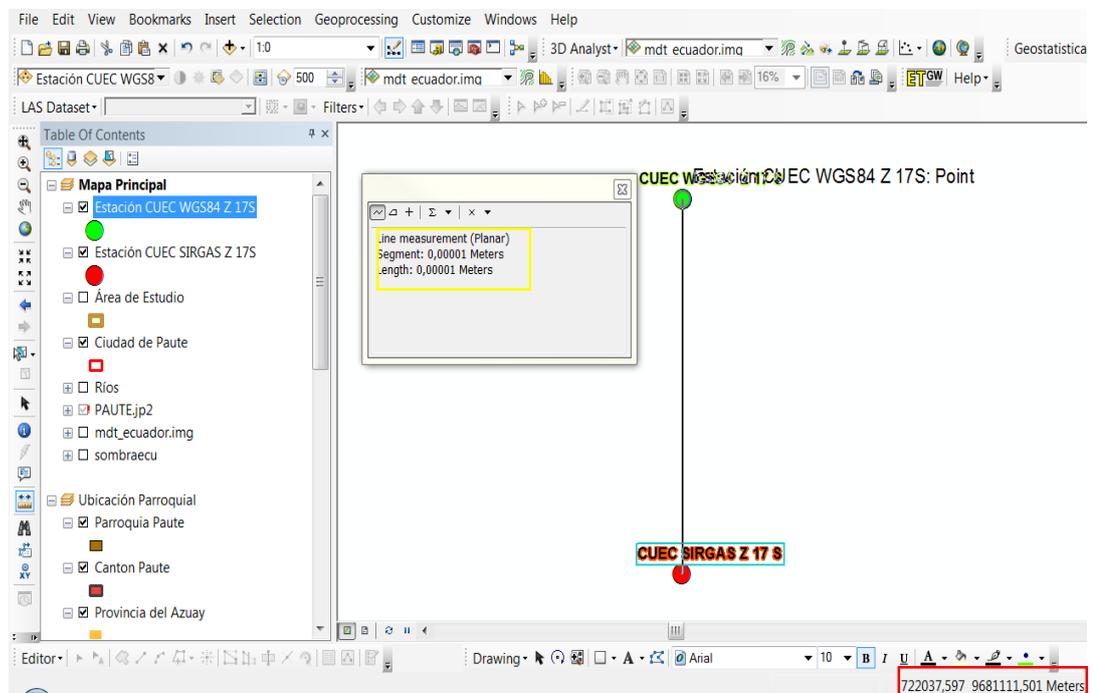
Si se observa, los datos oficiales de la estación REGME CUEC, con los datos programados en equipos y programas usados en la presente investigación; se notará que no coinciden; se puede pensar que al no estar en un mismo Datum, los post-procesamientos, generarían datos incorrectos o con errores de compatibilidad para el post-procesamiento.

Al analizar información referente a este tema, se pudo indagar que los datum WGS84 y SIRGAS 95 son los mismos (Drewes, 2014), esta homologación (si se lo podría nombrar de esta manera) se realizó en el año 2002.

Para confirmar que lo consultado es lo correcto, se realizó una práctica en el programa ArcGis 10.2; la cual consistió en definir las coordenadas UTM de la estación CUEC en el Datum SIRGAS 95 Z 17S; luego este mismo punto, proyectarlo en el mismo programa, pero con Datum WGS84 Z 17S, y realizar una medición de la diferencia entre estas dos proyecciones.

Como se observa en la Figura 6, no existen diferencias entre uno u otro datum, ya que al medir el punto de la estación CUEC en SIRGAS 95 con el mismo punto en WGS84, la diferencia es de 0,00001 m (recuadro en amarillo), y se observa en la parte inferior derecha de la Figura 6 (recuadro rojo), es el mismo juego de coordenadas que están descritas en la memoria técnica de la estación Cuenca dada por el IGM. (IGM, 2014) (Anexo 1)

Figura 6 Cálculo de diferencias entre distintos Datum: SIRGAS 95 y WGS84



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Juan Pablo Rivera, 2016

2.2.3. Planificación de vuelo

Un paso previo al vuelo es la planificación del mismo, el cual se lo realiza con el programa eMotion 2 propio del Drone (Ebee Ag) en donde se seleccionan los siguientes parámetros del vuelo:

- Tipo de cámara: WX RGB
- Radio de área de trabajo: 950 m a la redonda para que cubra el área de estudio
- Altura máxima del área de trabajo: como techo para que el Drone no sobrepase la

altura programada, 390 m para este vuelo.

- Definición del tamaño del pixel: 10 cm.
- Traslape lateral y longitudinal: del 75% en ambos casos, para densificar puntos y evitar sombras.
- Velocidad promedio del viento: 6 m/s; tomado de las estaciones meteorológicas más cercanas.
- Máximo tiempo de vuelo: 35 min.
- Ubicación del punto de despegue/aterrizaje y punto de Home (Casa): este lugar debe ser despejado por lo menos en 80 metros de largo por 30 metros de ancho, es decir sin obstáculos como edificios, casas, árboles, cables de alta tensión, antenas, entre otros, que puedan causar alguna colisión o accidente.
- Además se incluye un modelo digital de elevaciones el sitio de estudio para que el Drone calcule gradientes de altura para obtener siempre el mismo tamaño de pixel
- Dibujo del polígono de levantamiento: 30 ha
- Se realiza una simulación de vuelo para comprobar que todos los parámetros estén correctamente colocados (Emotion 2 Manual, 2015).

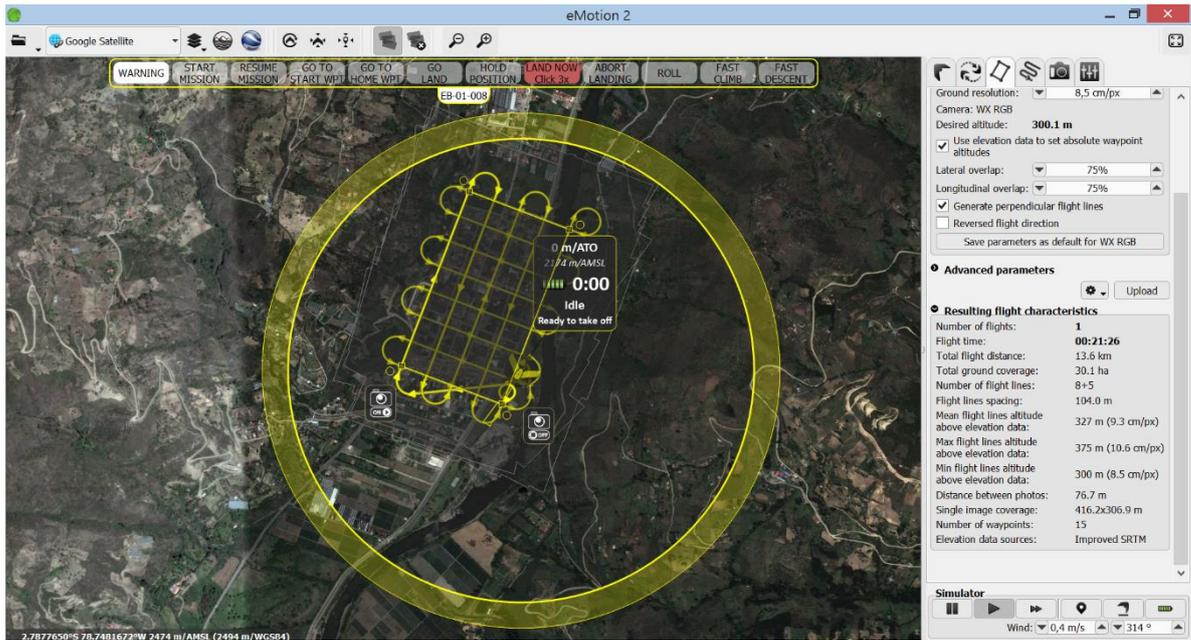
Las horas de vuelo óptimas son de 9H00 hasta 16H00, para evitar sombras por los crepúsculos, a más se debe constatar las condiciones meteorológicas como vientos fuertes y presencia de lluvias, en ese caso el Drone no podrá volar.

Con todas estas especificaciones técnicas, las características resultantes del plan de vuelo fueron:

- Número de Vuelos: 1
- Tiempo estimado del Vuelo: 21:26 minutos
- Distancia total del Vuelo: 13,6 km
- Cobertura total del Suelo: 30 ha
- Número de líneas de Vuelo: 8 transversales y 5 longitudinales
- Espacio entre líneas de vuelo: 104 m
- Distancia entre fotos: 76.7 m
- Cobertura de una sola foto: 416,2 x 306,9 m (127.731.72 m² o 12,77 ha)
- Número de Fotos: 99

A continuación en la Figura 7 se esquematiza el plan de vuelo.

Figura 7 Plan de Vuelo en Programa eMotion 2

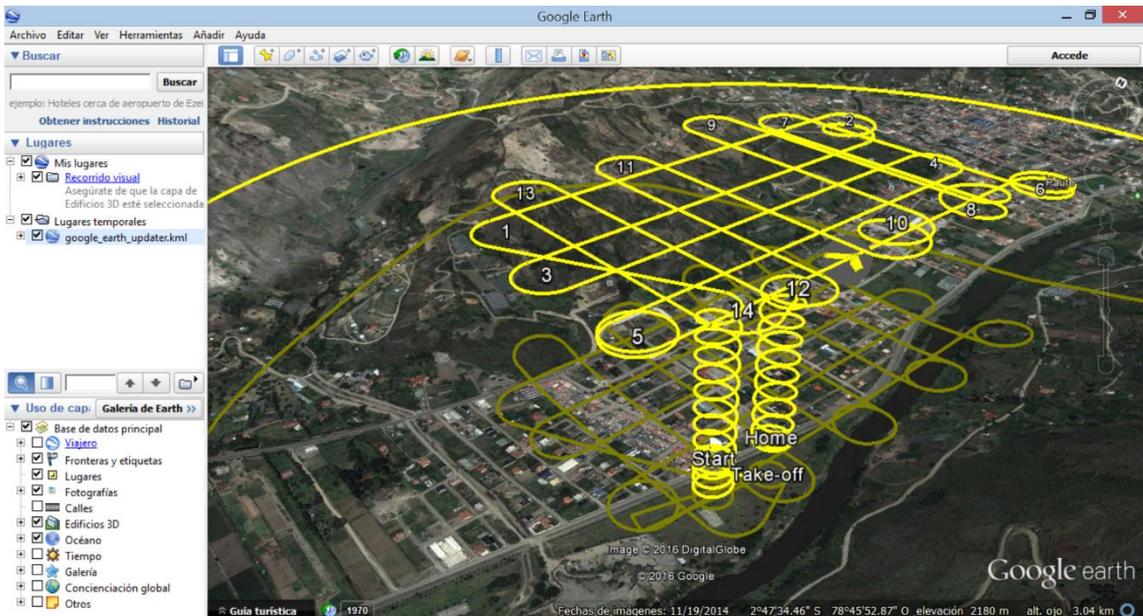


Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: eMotion 2, 2016

Este mismo plan de vuelo puede ser exportado a Google Earth para su visualización y verificación de que el dron no tendrá inconvenientes de colisión con las montañas aledañas (Figura 8)

Figura 8 Visualización de plan de vuelo en Google Earth



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

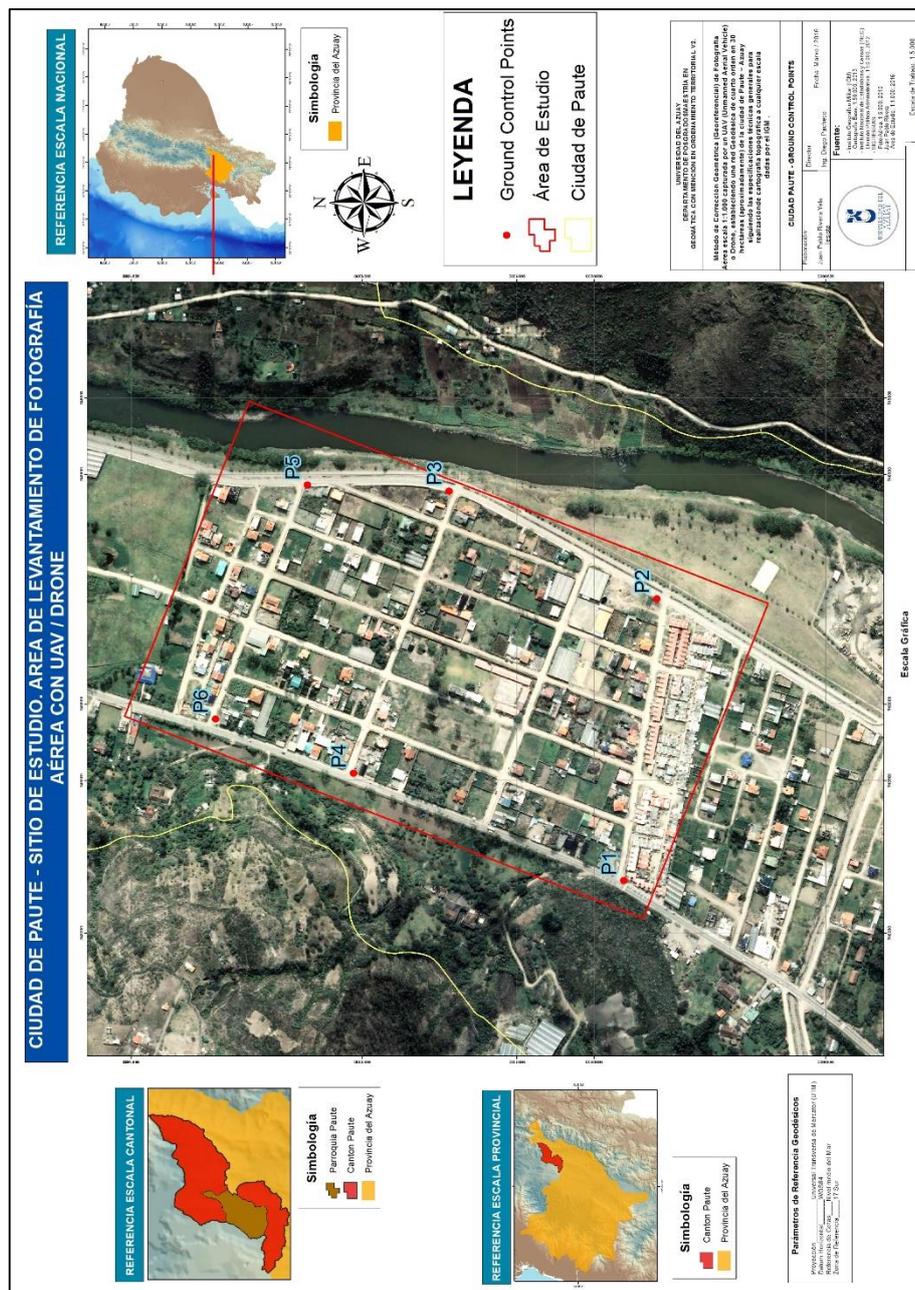
Fuente: Google Earth, 2016

2.2.4. Ejecución del Vuelo

Previo a la ejecución del vuelo, con la red geodésica de 4to orden o GCP establecida; se procedió a la colocación de Land-Marks (Marcas de Tierra o Suelo) en los 6 puntos de control previamente medidos. Estas marcas de tierra son 10 veces mayores al tamaño del pixel del levantamiento, para este caso el tamaño de pixel no será superior a los 10 cm, por tanto el tamaño de las marcas de tierra fueron de 1 m².

En la Figura 9 se puede observar la distribución de los GCP dentro del área de estudio

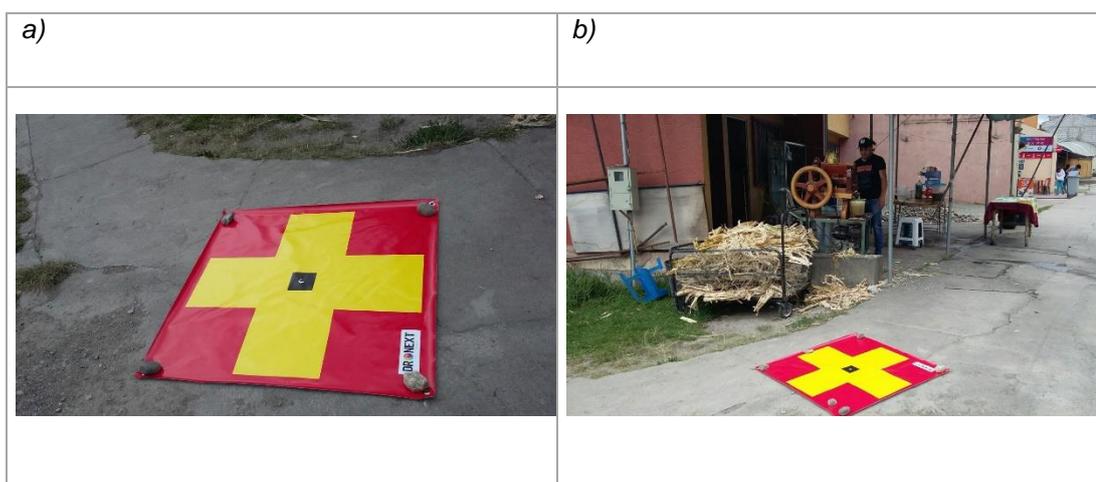
Figura 9 Distribución de la Red Geodésica de 4to Orden o GCP.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: SIGTIERRAS, 2010; Levantamiento de Campo, 2016

Imagen 2. Marcas de suelo en los GCP medidos. a) Detalle de Marcas de Tierra Punto 1. b) Detalle de Marcas de Tierra Punto 1.

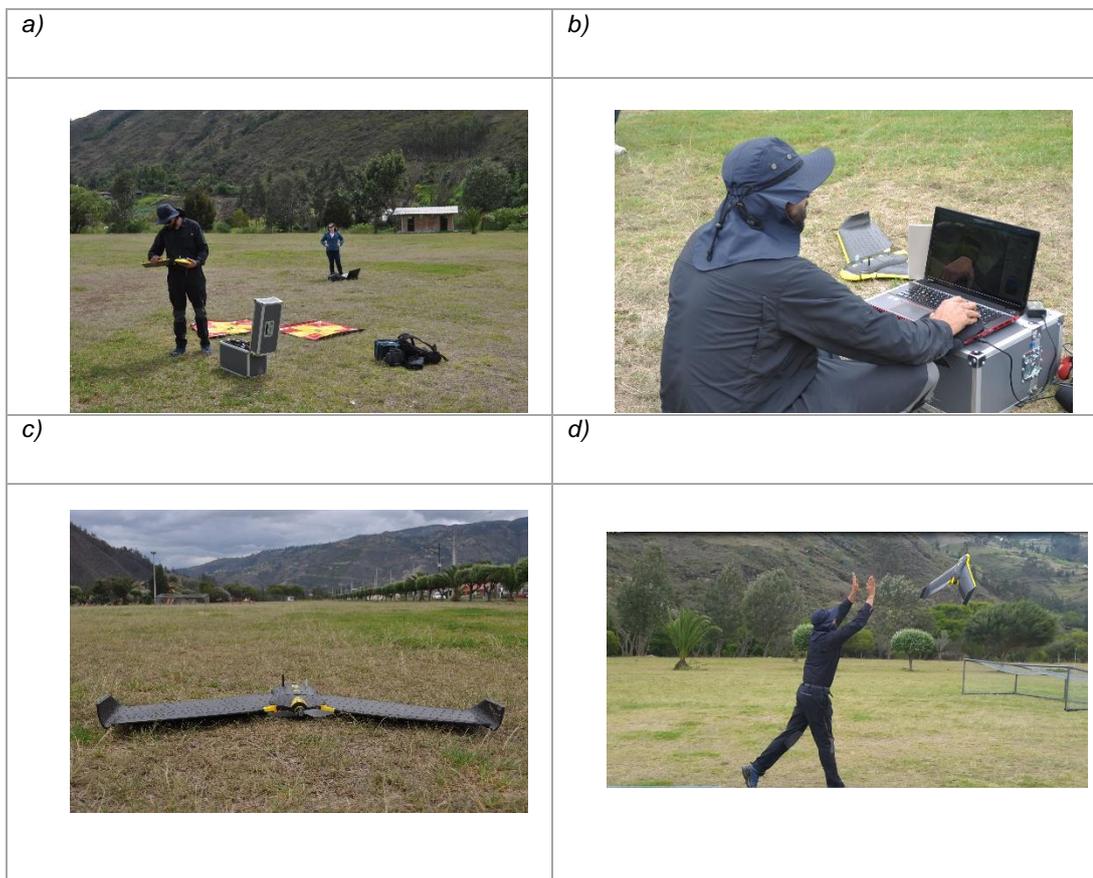


Fuente: Juan Pablo Rivera, 2016

Se debe anotar que las marcas de suelo tienen medidas exactas, cada lado de la cruz mide 30 cm y el punto central de color negro mide 10 cm de lado; a más que están orientadas hacia el norte.

Una vez colocadas las marcas de suelo en los GCPs medidos se procedió a armar el dron, y a comprobar que la planificación del vuelo este correcta; verificar que no existan obstáculos en la zona de despegue y aterrizaje, y corroborar que la dirección y velocidad del viento sean las adecuadas. A continuación en las fotografías que se presentan se esquematiza el vuelo.

Imagen 3. Ejecución del vuelo. a) Preparación del Drone para el Vuelo. b) Comprobación del Plan del Vuelo. c) Medición de altura y velocidad del viento. d) Despegue del drone.



Fuente: Juan Pablo Rivera, 2016

2.3 Fase de Laboratorio.

Para esta fase se utilizaron programas especializados como el Pix4Dmapper (2016), eMotion 2, propios del Drone, en donde se realizaron los siguientes procedimientos:

- a) Descarga de fotografías aéreas del drone con su respectivo archivo de posicionamiento georeferencial y altitudinal (de los sensores internos del UAV).
- b) Incorporación de los puntos de control de suelo (GCPs) de la red geodésica levantada.
- c) Generación de coincidencias entre puntos de control e imágenes procesadas.
- d) Reporte de calidad, en donde indica solapamiento entre fotos, puntos de enlace, varianza absoluta y relativa de la Geolocalización en X, Y, Z, generación de nube de puntos, generación de DSM (Modelo Digital de Superficies); Generación de Ortofotomosaico.(Pix4DMapper Pro User Manual, 2016)

Nota.- En el transcurso de la investigación, el programa Postflight terra 3D Professional Photogrammetry propio del Drone, presento una actualización, siendo

la nueva versión el Pix4DMapper, con la cual se realizaron todos los procesos de post-procesamiento. La nueva versión del programa contiene innovaciones en herramientas, que hacen al programa de fácil manejo; aunque mantiene una interfaz muy similar a la versión anterior.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Post – procesamiento de Red Geodésica de 4to Orden o GCP

Post – procesamiento con programa GNSS Solutions.

Los datos crudos recogidos por el receptor móvil deben ser procesados para determinar la relación diferencial existente entre los puntos ocupados durante la toma de datos. El resultado del procesamiento de datos brutos DGPS es un vector que define esta relación. El cálculo de estos vectores constituye la tarea del módulo de procesamiento de datos de GNSS Solutions. (GNSS Solutions, 2005)

Este módulo de procesamiento de datos analiza automáticamente la calidad de los archivos de datos crudos y ajusta los parámetros de procesamiento de una base fija, para generar el mejor vector posible, transfiriendo la mayor parte del esfuerzo de procesamiento del usuario al programa de procesamiento. En GNSS Solutions, el propio procesamiento de los datos se limita sencillamente a pulsar el botón Procesar, a sabiendas de que se obtendrá la mejor respuesta posible. (GNSS Solutions, 2005)

El producto principal del procesamiento de datos crudos o brutos GPS entre dos puntos es un vector que define la relación entre dichos puntos. Las coordenadas de los puntos son productos secundarios del vector procesado. Cuando un vector es procesado, se mantienen siempre fijas las coordenadas de un punto. A partir del vector procesado, se determinan las coordenadas para el punto desconocido. (GNSS Solutions, 2005)

Antes del ajuste, las coordenadas del punto se deducen exclusivamente de los vectores procesados hacia dicho punto. En el caso de puntos con múltiples vectores, las coordenadas mostradas se deducen del vector con las menores incertidumbres. Mediante el ajuste de los datos se consiguen coordenadas de puntos más precisos y fiables. (GNSS Solutions, 2005)

El programa GNSS Solutions, trabaja con el siguiente tipo de análisis de error típico

Error típico (desviación típica): El objetivo de toda medición es encontrar el valor verdadero. Dado que toda medición contiene un error, el valor verdadero no es observado nunca. A fin de validar las mediciones, se deduce estadísticamente un error estimado para cada medición. Una estimación del error típico indica que existe una probabilidad del 66% de que el valor verdadero de una medición se encuentre dentro del intervalo generado restando y sumando al valor medido la estimación del error. Por ejemplo, si una medición de 50,5 metros posee un error estimado de 0,1 metros al 95%, existirá una probabilidad del 95% de que el valor verdadero se encuentre entre 50,4 y 50,6 metros. El valor del 66% se deduce de la distribución normal. Para una variable distribuida según la normal, el error típico es el límite dentro del cual se encuentra el 66% de las muestras de la variable.

Con estas consideraciones, los datos obtenidos para los 6 GCP de la red geodésica de 4to orden fueron:

Tabla 1. Coordenadas Medidas y Post – procesadas con Programa GNSS Solutions

Xmedido	Ymedido	Zmedido	Código	Xprocesado	Yprocesado	Zprocesado	Xerror 95%	Yerror 95%	Zerror 95%
748371,405	9690861,140	2192,118	P1	748367,679	9690861,391	2202,527	0,158	0,145	0,192
748739,168	9690817,884	2187,836	P2	748736,337	9690818,142	2198,921	0,056	0,056	0,055
748879,706	9691088,865	2182,385	P3	748877,275	9691088,076	2197,817	0,051	0,055	0,062
748510,608	9691211,857	2182,857	P4	748509,008	9691212,009	2198,648	0,056	0,056	0,061
748885,875	9691271,398	2186,225	P5	748884,818	9691271,282	2196,808	0,056	0,056	0,057
748580,578	9691390,049	2187,382	P6	748579,751	9691389,844	2199,028	0,099	0,120	0,134
PROMEDIO							0,079	0,081	0,094

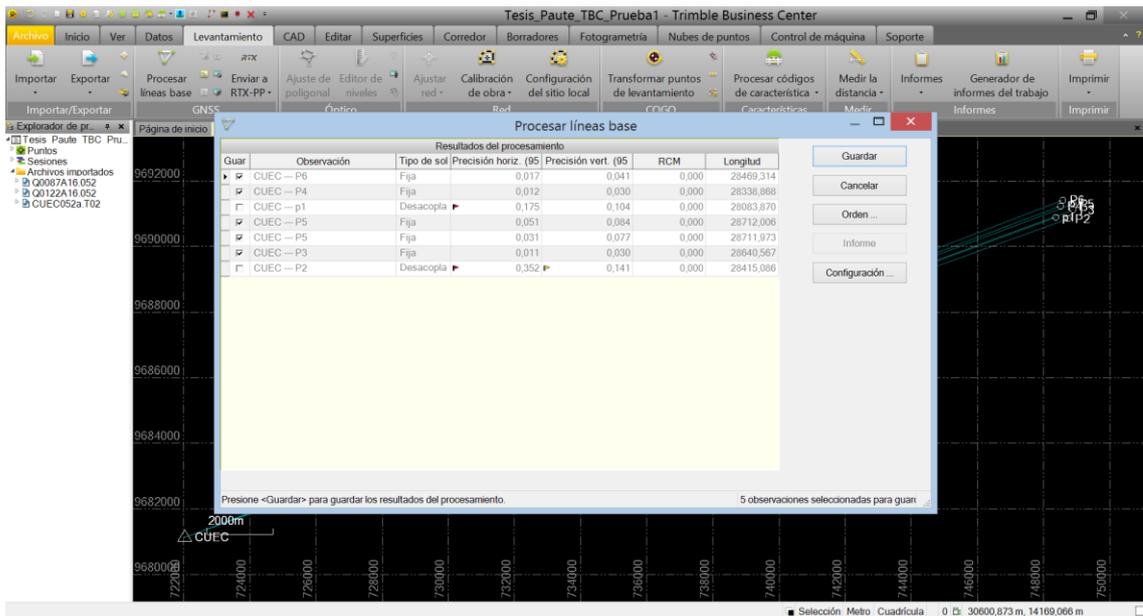
Fuente: Juan Pablo Rivera, 2016

Como se puede observar en la Tabla 1, los residuales de las coordenadas procesadas en cuatro de los 6 puntos, están por debajo de los 10 cm, con excepción del P1 que se encuentra en 0,158 en X; 0,145 en Y, y 0,192 en Z; P6 que tiene un error o incertidumbre de 0,099 en X; 0,120 en Y, y 0,134 en Z; estos errores pueden deberse posiblemente en fallos de lectura del DGPS, o en el momento de realizar el post-proceso con los datos de la estación CUEC los vectores de calibración calculan más error en estos dos puntos. Esto puede significar que al momento de realizar la calibración de la fotografía aérea, el modelo contenga errores superiores a los aceptados por el IGM (Anexo 2)

Post – procesamiento con programa Trimble Business Center (TBC) v3.4.

El post-procesamiento es muy similar al anterior programa; en primer lugar se coloca el datum, sistemas de coordenadas y demás datos requeridos al nuevo proyecto creado, luego se cargan los puntos levantados en campo por el DGPS (datos crudos), seguido de esto los datos de la estación base CUEC, si se aplica el post-procesamiento (TBC, 2014). En este caso, TBC, detecta dos puntos que sobrepasan el rango de error de 10 cm y para el análisis éstos datos “Desacoplan”, por lo que les anula del análisis ya que no entran dentro del 95% de confianza, estos puntos fueron P1 y P2 (Figura 10). (Anexo 3)

Figura 10 Resultado del post-procesamiento del TBC para los GCP's de la red geodésica de 4to orden.

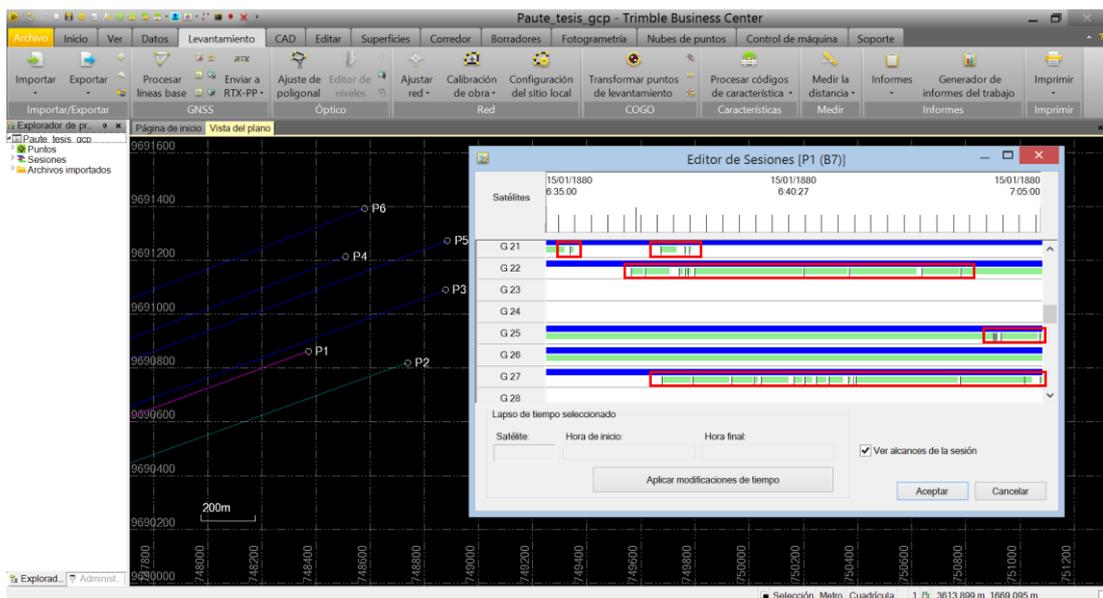


Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016
Fuente: Trimble Business Center, 2016

Se debe mencionar que P1 y P2 fueron tomados aproximadamente a las 13H00; este mayor error se pudo dar porque algunos de los satélites tuvieron brechas o cortes de información en sus datos, siendo este un indicio de pérdida de ciclo de la señal satelital, errores de gama no válida y otros problemas de perdida de señal (TBC, 2014)

En las Figuras 11 y 12, se muestran los errores mencionados para los puntos P1 y P2

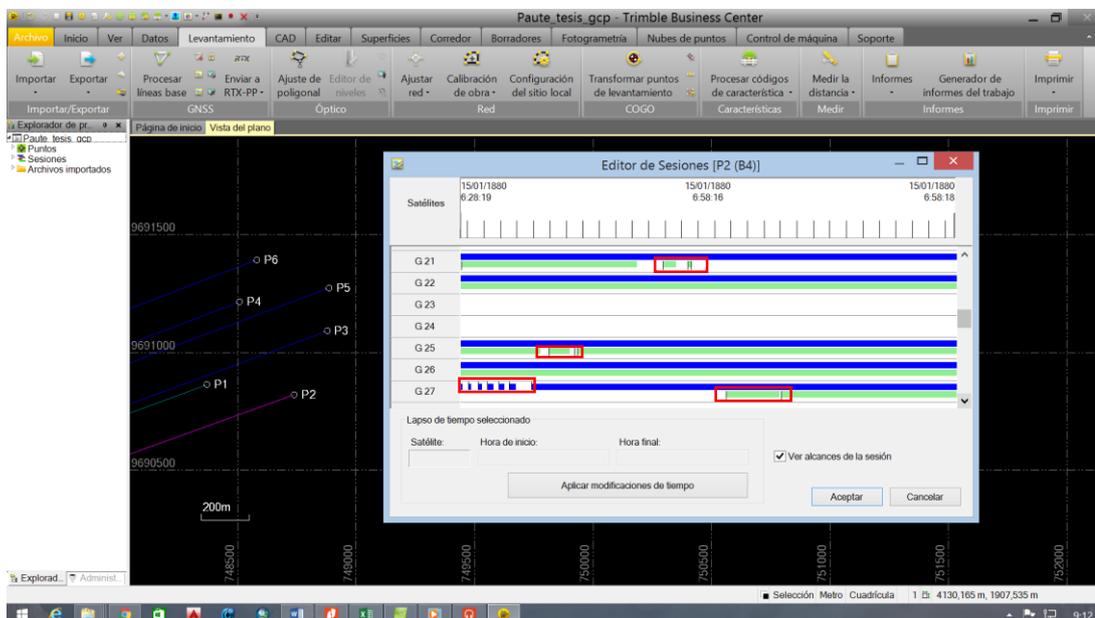
Figura 11 Errores de Información de satélite para P1



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016
Fuente: Trimble Business Center, 2016

En donde los colores verde y azul representan la continuidad de los datos emitidos por los satélites, en tanto que las líneas de color negro (dentro de los recuadros rojos) muestran la ruptura y la discontinuidad de datos que pudo dar origen a los errores en los puntos mencionados.

Figura 12 Errores de Información de satélite para P2



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Trimble Business Center, 2016

Para la presente investigación, y con objeto de comparación, se usaron los dos sets de datos, es decir los completos con 6 GCP y los depurados con 4 GCP procesados por el programa TBC v3.4.

Se tiene entonces las tablas donde se exponen los sets de datos que sirvieron para el análisis:

Tabla 2. Datos Completos (6 Puntos) procesados con el programa TBC

Xmedido	Ymedido	Zmedido	Código	Xprocesado	Yprocesado	Zprocesado	Xerror 95%	Yerror 95%	Zerror 95%
748371,405	9690861,140	2192,118	P1	748368,617	9690860,918	2202,940	0,175	0,104	0,114
748739,168	9690817,884	2187,836	P2	748737,146	9690818,031	2199,154	0,352	0,141	0,162
748879,706	9691088,865	2182,385	P3	748878,163	9691087,930	2197,994	0,011	0,03	0,033
748510,608	9691211,857	2182,857	P4	748509,091	9691211,808	2198,566	0,012	0,03	0,031
748885,875	9691271,398	2186,225	P5	748885,711	9691271,141	2196,943	0,026	0,04	0,047
748580,578	9691390,049	2187,382	P6	748580,254	9691390,243	2198,048	0,017	0,041	0,045
PROMEDIO							0,099	0,0643	0,072

Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Trimble Business Center, 2016

Los Puntos 1 y 2 presentan errores altos con respecto a los demás puntos debido a que las lecturas del DGPS sufrieron pérdida de señal (Figuras 11 y 12), esto provocó que al momento

del post-proceso sus residuales sean muy superiores a los otros GCP, por lo que podrían causar ruido en el post-proceso de la fotografía aérea.

Tabla 3. Cuatro Puntos de Control procesados con el programa TBC

Xmedido	Ymedido	Zmedido	Código	Xprocesado	Yprocesado	Zprocesado	Xerror 95%	Yerror 95%	Zerror 95%
748371,405	9690861,140	2192,118	P1	Desacopla	Desacopla	Desacopla	-	-	-
748739,168	9690817,884	2187,836	P2	Desacopla	Desacopla	Desacopla	-	-	-
748879,706	9691088,865	2182,385	P3	748878,163	9691087,930	2197,994	0,011	0,03	0,033
748510,608	9691211,857	2182,857	P4	748509,091	9691211,808	2198,566	0,012	0,03	0,031
748885,875	9691271,398	2186,225	P5	748885,711	9691271,141	2196,943	0,026	0,04	0,047
748580,578	9691390,049	2187,382	P6	748580,254	9691390,243	2198,048	0,017	0,041	0,045
PROMEDIO							0,017	0,035	0,039

Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Trimble Business Center, 2016

Al comparar los promedios de los errores de las tablas 1, 2 y 3; se puede observar que la que menor error o incertidumbre presenta son los datos del post-procesamiento del TBC con 4 GCP, ya que elimina los datos que mayor ruido presentan; y la media de sus coordenadas son las que menor residual muestran.

Como se puede notar, al comparar las coordenadas resultantes del post-proceso del Programa GNSS Solutions (propio del DGPS Promark 120) y del Trimble Business Center (TBC) v3.4, existen diferencia de 2 a 3 m; se debe indicar que el GNSS Solutions, fue creado en el año 2005, y hasta el momento no ha tenido actualizaciones; en cambio TBC es del año 2014; por lo que se puede deducir que sus algoritmos de cálculo y calidad de productos es mejor que el GNSS Solutions, pudiendo éstos datos tener mejor grado de confiabilidad (Delgado, Com. per, 2016)

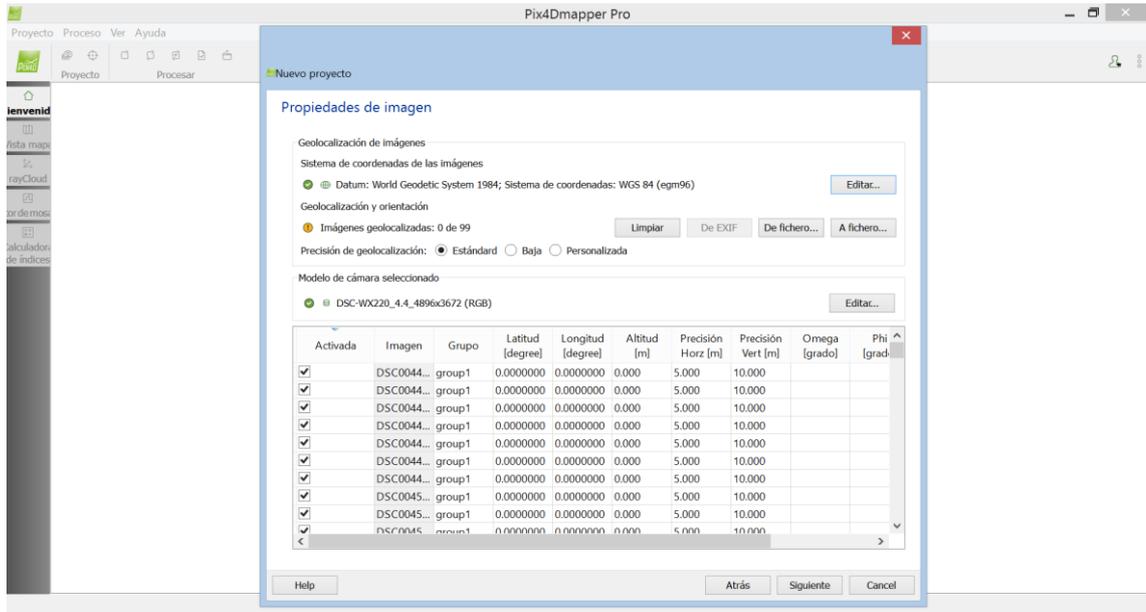
3.2 Procesamiento Vuelo

Para el procesamiento del vuelo se realizan los siguientes pasos:

Descarga de datos del vuelo realizado por medio del programa eMotion 2, en donde se descargan los fotogramas y posteriormente los datos de los sensores internos del drone, tanto los de posicionamiento como los de altura.

El siguiente paso es cargar en el Programa Pix4Dmapper la secuencia de las 99 imágenes del vuelo, calibrando al programa con el mismo datum y sistema de coordenadas que se ha estado trabajando. (Figura 13)

Figura 13 Inicio de proceso de calibración de datos obtenidos del Drone.

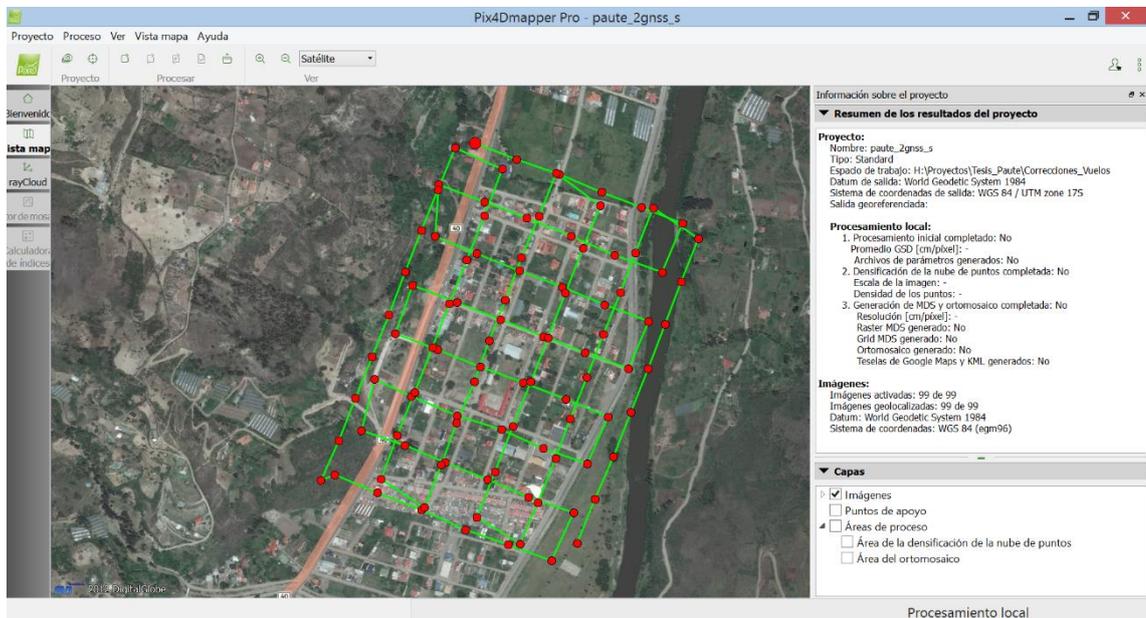


Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Pix4Dmapper; Levantamiento de Campo, 2016

A continuación, se carga el archivo de posicionamiento y de alturas para que combinen internamente fotos y datos. (Figura 14)

Figura 14 Combinación de datos y calibración de fotos y datos de GPS y sensor de altura



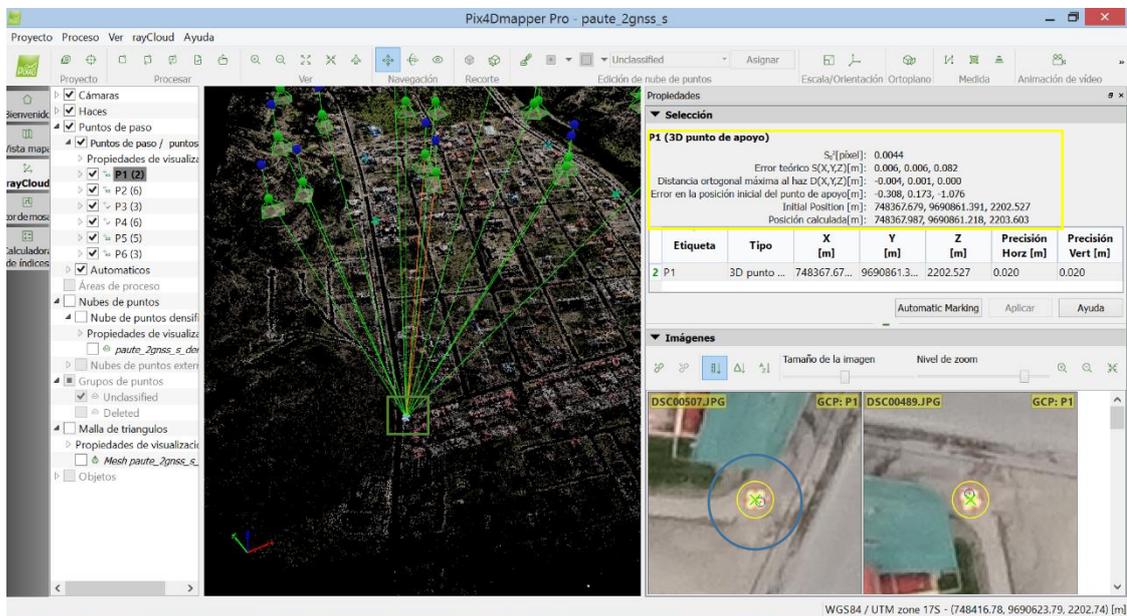
Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Pix4Dmapper; Levantamiento de Campo, 2016

Luego de este paso, se importan los puntos de DGPS post procesados, y se inicia la calibración manual con los GCP's (Puntos de control de suelo).

Se debe tener en cuenta que es necesario calibrar por lo menos dos fotografías para que el programa inicie el mecanismo de post-procesamiento. El mecanismo para el ajuste, es dar un clic sobre el punto de control en la nube de puntos (recuadro rojo), inmediatamente se despliega una pantalla donde aparecen las fotografías en las que el GCP de la red geodésica de 4to orden se encuentra, se realiza un zoom adecuado y se da un clic en el centro del GCP (representado por una cruz amarilla en fondo rojo), y mientras más fotografías se puedan corregir por punto de control mejor será la precisión (circulo azul), luego de realizar los ajustes correspondientes, se da la orden al programa de re-optimizar y ajustar las fotografías a las correcciones efectuadas. Una vez realizado este paso, se generan datos de calibración del GCP ejecutado (recuadro amarillo). Se repite este paso para los 6 GCP de la red geodésica. (Figura 15)

Figura 15 Pasos de calibración de fotografías aéreas.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Pix4Dmapper; Levantamiento de Campo, 2016

Luego de la calibración existen datos que muestran la calidad de la calibración entre estos:

La Varianza a posteriori (S_0^2).- Que da una idea del error de la proyección, valor que al acercarse más a 0 indica la precisión en la calibración del punto.

Error teórico $S(X, Y, Z)$.- Se refiere al error de calibración entre fotografías, se recomienda muestrear en más de 2 fotografías para reducir esta incertidumbre, mientras más cercano a 0 la corrección es más exacta

Distancia Ortogonal máxima al haz $D(X, Y, Z)$.-La distancia ortogonal máxima es la distancia máxima desde el punto 3D estimado y todos los rayos utiliza para calcular este punto 3D. La

distancia se mide entre el punto 3D y el punto definido por la línea perpendicular al rayo que pasa por el punto 3D. Mientras más cercano a 0 su medición es más exacta.

Error de posición inicial de punto de apoyo.- Error teórico que es calculado a partir de las calibraciones del punto inicial de apoyo.

Posición Inicial y Posición Calculada.- Son datos de corrección donde muestra en coordenadas los desplazamientos iniciales y los resultados finales.

3.2.1 Modelo 1: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa GNSS Solution.

Para poder comparar resultados de precisión y calidad, se realizó cuatro tipos de calibraciones o post – proceso al vuelo generado con el drone.

En primer lugar se evaluó los resultados con los GCP's post-procesados con el programa GNSS Solutions, en donde se incluyó 6 GCP's de los cuales 4 fueron puntos 3D de Apoyo y 2 Puntos de Control, esto para una mejor calibración; puesto que el programa Pix4DMapper pide como un condicionante la colocación de al menos un Punto de Control (check point), dejando a los demás puntos como Puntos de Apoyo 3D; para la siguiente prueba se colocaron como puntos de control P3 y P4.

El programa Pix4DMapper, genera un reporte de calidad de los productos procesados, que enumera todas las características de los procesos realizados y la calidad de los productos generados (Anexo 4), y entre estos acápite se encuentra los Detalles de Geolocalización (Geolocation Details) de los Puntos de Control de Suelo (Ground Control Points)

En la Figura 16, se puede observar los rangos de los errores en X, Y, Z, medidos en metros y los errores medios en las tres direcciones de coordenadas. La última columna cuenta el número de imágenes calibradas donde el GCP se ha verificado de forma automática vs la marcada manualmente, en donde la media del error de los 4 puntos 3D en X=0,0255; en Y=-0,0623; Z=-0,1302; errores que no superan los 10 cm a excepción de la altura Z. Pudiendo asumir que los errores entran dentro de un rango bajo según lo requerido por el IGM (2008). (Anexo 9).

En la columna de Error de proyección (Projection Error); sus unidades son pixels, se puede observar que solo en P5 (1,342) supera 1 pixel la proyección.

Observando el Sigma (Desviación Estándar o Dispersión) y el RMS o error de la dispersión, sus valores son bajos para los puntos 3D, esto indica que existe una buena precisión de los mismos, si los comparamos con lo que requiere el IGM (2008). (Anexo 9)

Figura 16 Reporte de calidad de productos de Pix4DMapper datos GNSS Solutions (6 GCP)

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.136	0.067	0.164	0.627	4 / 4
P2 (3D)	0.020/ 0.020	0.124	-0.025	-0.008	0.475	3 / 3
P5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.066	0.146	-0.462	1.342	3 / 3
P6 (3D)	0.020/ 0.020	0.184	-0.437	-0.216	0.521	2 / 2
Mean [m]		0.026529	-0.062342	-0.130296		
Sigma [m]		0.131543	0.224604	0.234035		
RMS Error [m]		0.134191	0.233096	0.267861		

0 out of 2 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3	0.0200/0.0200	0.0697	0.1018	-0.8290	0.1319	2 / 2
P4	0.0200/0.0200	0.6916	-0.0077	-0.5411	0.0141	2 / 2
Mean [m]		0.380638	0.047048	-0.685083		
Sigma [m]		0.310933	0.054785	0.143966		
RMS Error [m]		0.491492	0.072214	0.700046		

Elaboración: Pix4Dmapper, 2016

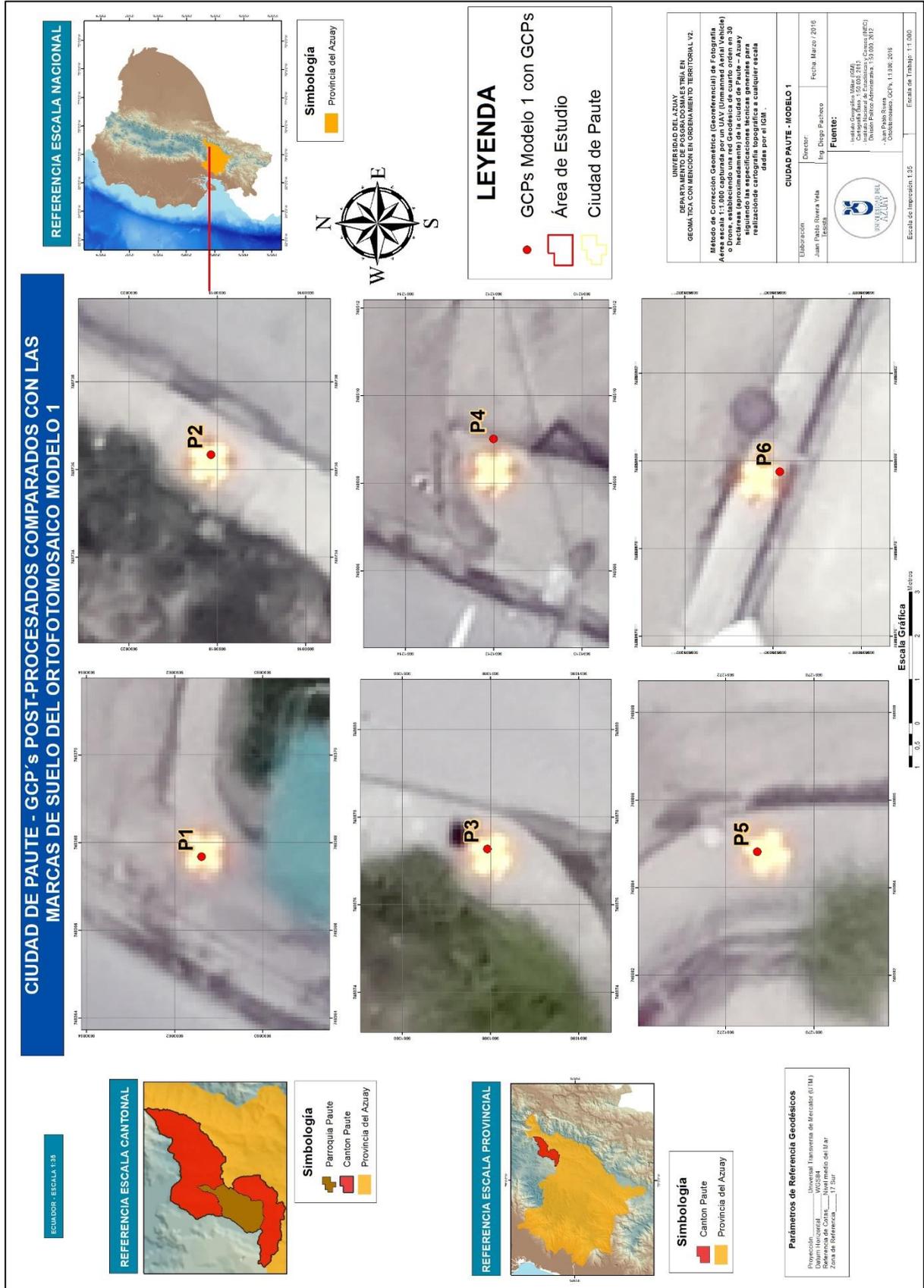
Fuente: Pix4Dmapper, 2016

En tanto que en los puntos de control, el error de P3 es exagerado en Z (-0,820 m); y en P4 en X presenta un alto error de 0,691 m y en Z -0,541 m; si lo comparamos con lo que exige el IGM (2008) (Anexo 9) en calidad y precisión; por lo que este modelo no cumple con la hipótesis planteada

En tanto que el Sigma y el RMS de los puntos de control son muy altos, lo que hace que esta prueba sea poco confiable, sobre todo en las coordenadas X y Z, si lo comparamos con lo que pide el IGM (2008). (Anexo 9)

La Figura 17 muestra el mapa en donde constan los GCP's post-procesados sobre el ortofotomosaico corregido en base a estos mismos puntos. En donde se pueden visualizar los errores de posicionamiento.

Figura 17 GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregido Modelo 1.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Levantamiento de Campo, 2016

Como se puede observar en la Figura 17, existen algunos ligeros desplazamiento en puntos P1, P2, P3 y P5, en tanto que en P4 y P6 son los más notorios.

3.2.2 Modelo 2: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa Trimble Business Center con 6 GCP.

Para este modelamiento, igual que el caso anterior, se usaron los 6 GCP, pese a que el Programa TBC descarto 2 GCPs (Punto 1 y 2), por contener mayor error que los anteriores, para que pueda ser comparado con el modelo anterior, se colocaron los mismos puntos de Apoyo 3D (P1, P2, P5 y P6) y como Puntos de Control (Check Points) P4 y P5. De igual manera que el caso anterior el programa Pix4DMapper genera el reporte de calidad, de donde se extraen los siguientes datos (Anexo 5)

Como se observa en la Figura 18, la media de los errores de X, Y, Z; son mas bajos, si las comparamos con el modelo anterior, a excepción de X, la media es de -0,0777; Y es -0,0518 y en Z -0.0851; esto dentro de los 4 GCP (P1, P2, P5 y P6). El error de proyección medido en pixels (0,658 cm como promedio), no alcanza a un pixel,siendo su valor mas alto el asignado para el punto 3D P5.

Figura 18 Reporte de Calidad de Productos de Pix4DMapper, Datos TBC (6 GCP)

Ground Control Points

GCPName	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.191	-0.009	1.403	0.605	4 / 4
P2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.084	-0.094	1.134	0.694	5 / 5
P5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.158	-0.028	-1.466	0.965	4 / 4
P6 (3D)	0.020/ 0.020	0.123	-0.076	-1.412	0.370	4 / 4
Mean [m]		-0.077700	-0.051821	-0.085174		
Sigma [m]		0.122048	0.034389	1.357276		
RMS Error [m]		0.144682	0.062194	1.359946		

0 out of 2 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3	0.0200/0.0200	-0.0030	0.0054	-0.3457	2.6806	13 / 13
P4	0.0200/0.0200	0.1955	0.0203	-0.4766	1.2858	4 / 4
Mean [m]		0.096220	0.012863	-0.411158		
Sigma [m]		0.099255	0.007424	0.065461		
RMS Error [m]		0.138238	0.014851	0.416336		

Elaboración: Pix4Dmapper, 2016

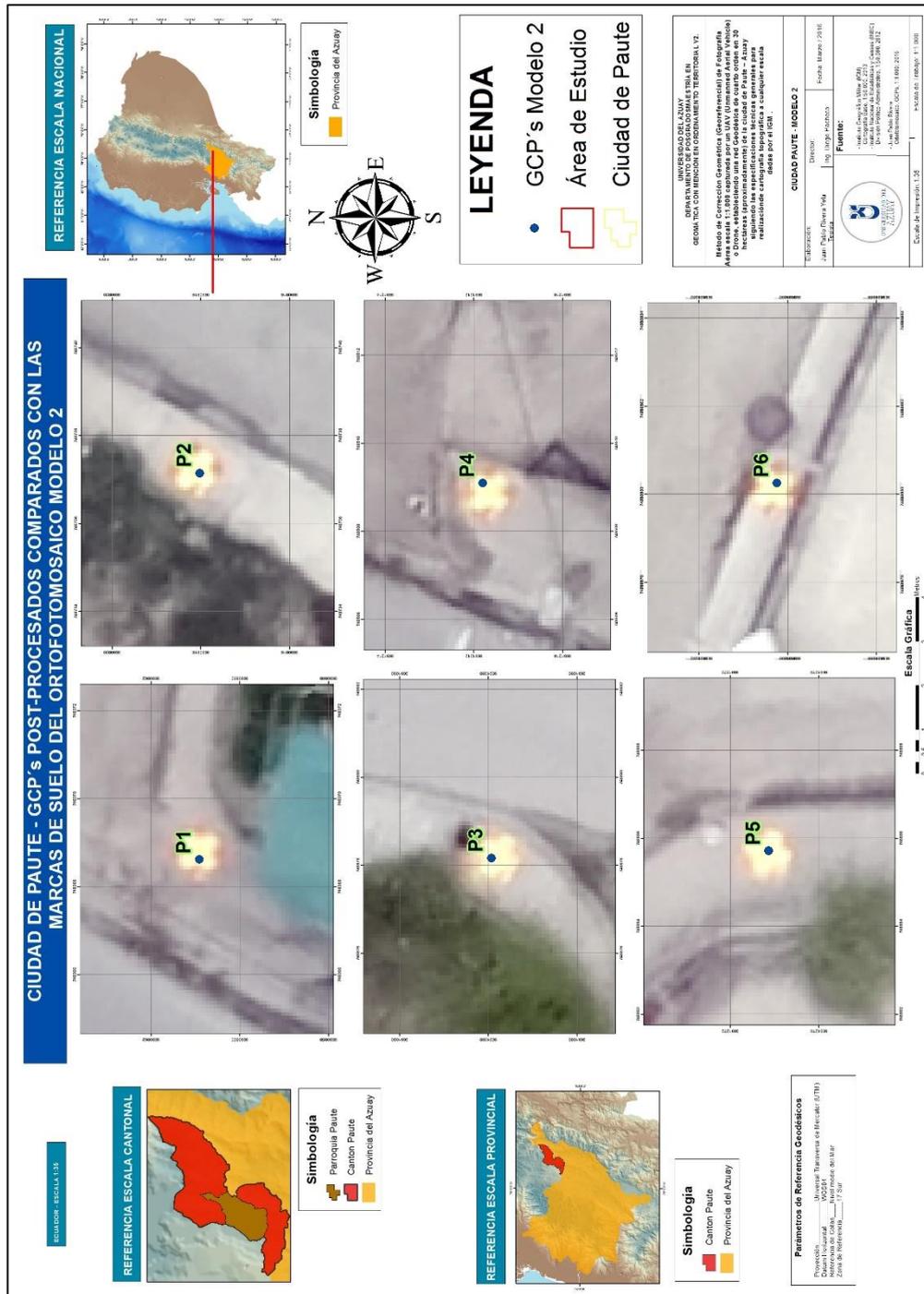
Fuente: Pix4Dmapper, 2016

En donde existe una diferencia significativa con el modelo anterior, es en los Puntos de Control (Check Point) en donde el error en X es de 0,1955, en Y 0,0203 y en Z -0,4766; por lo que su Sigma y RMS también es menor, siendo este modelo más preciso que el anterior. (Figura 18)

La Figura 19 muestra la localización de los 6 GCPs post-procesados con referencia al ortofotomosaico calibrado a partir de estos mismos puntos.

Este modelo muestra menos desplazamiento de los centros de las marcas de suelo y los GCPs post-procesados, en especial en P2, P3, P5 y P6; en tanto que P1 y P4 se alejan más del centro de la marca de suelo.

Figura 19 GCPs post-procesados sobre ortofotomosaico corregida Modelo 2.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Levantamiento de Campo, 2016

3.2.3 Modelo 3: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa Trimble Business Center con 4 GCP.

Para este modelo, se utilizaron solo los GCP que no desacoplaron en el análisis de post-procesamiento del Programa TBC, siendo estos, P3, P4 y P6, como puntos 3D, y como punto de control (Check Point) P5. Los resultados que a continuación se presenta fueron extraídos del reporte de calidad del modelo 3 (Anexo 6)

Como se puede observar en la Figura 20, los puntos 3D y el Punto de Control no superan los 0,0512 m de error ya sea en X, Y o Z, tanto en los puntos 3D como en el punto de control; se debe considerar además que la media de X, Y, Z de los puntos 3D su precisión es de milímetros. Lo mismo ocurre con Sigma y el RMS, haciéndole a éste un modelo muy preciso si lo comparamos con los otros dos modelos realizados.

Figura 20 Reporte de calidad de productos de Pix4DMapper, Datos TBC (4 GCP)

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.008	0.006	0.312	3 / 3
P4 (3D)	0.020/ 0.020	0.010	0.001	0.026	0.749	4 / 4
P6 (3D)	0.020/ 0.020	-0.013	0.006	-0.042	0.388	3 / 3
Mean [m]		-0.001215	-0.000487	-0.003284		
Sigma [m]		0.009129	0.005540	0.028258		
RMS Error [m]		0.009210	0.005561	0.028448		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P5	0.020/0.0200	-0.0367	0.0512	0.0075	0.0531	2 / 2

Elaboración: Pix4Dmapper, 2016

Fuente: Pix4Dmapper, 2016

Se realizó el mismo ejercicio que en los dos modelos anteriores, y se cotejó en un mapa la precisión entre los GCPs post-procesados y el ortofotomosaico procesado con los mismos GCPs, los resultados se muestran en la Figura 21.

Como se puede observar en la figura anterior, y comparando con los otros modelos realizados, el Modelo 3 muestra una mayor precisión, ya que los GCPs están muy próximos al centro de la marca de suelo, corroborando esto los datos del Reporte de Calidad del programa Pix4DMapper.

3.2.4 Modelo 4: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa GNSS Solutions con 4 GCP.

Para guardar rigor estadístico comparativo, se construyó este modelo, utilizando 4 de los 6 GCP post-procesados con el programa GNSS Solutions, siendo estos; P3, P4 y P6, como puntos 3D, y como punto de control (Check Point) P5. Los resultados del modelo 4 fueron extraídos del Reporte de Calidad (Anexo 7)

Como se observa en la Figura 22, el punto 3D P3 (X: 0,022 m; Y: 0,0049 m; Z: 0,007 m) es el único que no presenta errores superiores a los recomendado por el IGM (2008) (Anexo 8); en tanto que los puntos 3D P4 y P6 presentan errores superiores a los 10 cm.

Figura 22 Reporte de calidad de productos de Pix4DMapper, Datos GNSS Solutions (4 GCP)

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3 (3D)	0.020/0.020	0.022	-0.049	-0.007	0.318	3 / 3
P4 (3D)	0.020/0.020	0.089	0.101	-0.173	0.634	3 / 3
P6 (3D)	0.020/0.020	-0.248	-0.094	-1.624	0.247	2 / 2
Mean [m]		-0.045959	-0.013932	-0.601112		
Sigma [m]		0.145737	0.083287	0.726219		
RMS Error [m]		0.152812	0.084444	0.942725		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P5	0.0200/0.0200	-0.0635	0.3296	-2.7153	0.5707	3 / 3

Elaboración: Pix4Dmapper, 2016

Fuente: Pix4Dmapper, 2016

Si el Punto de Control (Check Point) P5 en la Figura 22, se observa que los valores en Y y Z superan los límites exigidos por el IGM (2008) (Anexo 8). Por tanto el modelo 4 se descarta, y el modelo 3 se considera como el mejor producto de la presente investigación.

Al igual que los modelos anteriores, se colocan los 4 CGP en el ortofotomosaico calibrado por estos mismos puntos. (Figura 23) Como se observa en la figura los puntos con mayor desplazamiento son P4 y P5.

3.2.5 Comparación visual entre Modelos.

Para realizar las comparaciones visuales, se utilizó el programa ArcGis 10.2; y se contrapuso los ortofotomosaicos, tomando como base o punto de comparación el Modelo 3 por ser el más preciso, confrontándolo con los otros dos modelos generados.

Al comparar el Modelo 3 (colores reales), con el Modelo 1 (colores en negativo), se puede observar que en modelo 1 existe un desplazamiento de aproximadamente 0,90 m hacia el oeste; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2 (Figura 24)

Figura 24 Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 1.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Fase de Laboratorio, 2016

De igual forma se realizó la comparación del Modelo 3 (colores reales) con el Modelo 2 (colores en negativo), y se pudo observar y medir que existe un desplazamiento de aproximadamente 0,10 m hacia el oeste, esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2. La Figura 25 muestra el desplazamiento que es casi imperceptible

Figura 25 Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 2.



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Fase de Laboratorio, 2016

En la Figura 26, al igual que los casos anteriores, se compara el Modelo 3 (mas preciso, de colores reales) con el Modelo 4 (colores azulados), y se puede observar que existe un desplazamiento del modelo 4 de 0,40 m al oeste; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2

Figura 26 Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 4



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Fase de Laboratorio, 2016

3.2.6 Comparación visual con ortofoto del proyecto SIGTIERRAS.

Aunque las escalas son diferentes, puesto que la ortofoto del SIGTIERRAS presenta una espacial a 1:5.000 (30 cm tamaño de pixel) y su toma esta dada entre los años 2009 y 2010, en tanto que el ortofotomosaico está a escala 1:1.000 (10 cm tamaño de pixel) para 2016;

pero se puede, de cierta manera visualizar si existe variación posicional o de precisión entre los dos productos.

Como se puede observar en la Figura 27, el ortofotomosaico generado en la presente investigación (parte inferior, colores vívidos) y la ortofoto del proyecto SIGTIERRAS (parte superior colores pálidos); prácticamente no presentan diferencias en su precisión, ya que existen coincidencias con vías, viviendas, linderos, entre otras, las diferencias no se pudieron medir claramente por la diferencia en el tamaño del píxel, pero se calcula que están alrededor de 0,01 m; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2

Figura 27 Comparación visual de precisión entre ortofoto del SIGTIERRAS y el Ortofotomosaico de la presente investigación



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: SIGTIERRAS, 2010; Fase de Laboratorio, 2016

NOTA.- En el diseño de tesis presentado y aprobado para la presente investigación, se pretendía realizar el post-proceso del ortofotomosaico con dos programas el mencionado Pix4DMapper y el programa Trimble Business Center v3.4, de este último empleando el módulo Fotogrametría, pero, al intentar subir los datos del vuelo (obtenidos del dron eBee Ag), este programa no reconoció dichos parámetros, ya que sus algoritmos de cálculo son exclusivos para el dron Trimble UX5; por lo que no se pudo realizar la comparación entre estos dos programas.

3.3 Comparación de los resultados de los Modelos obtenidos con las Especificaciones Técnicas del IGM.

Para este acápite, se tomaran en cuenta algunas especificaciones técnicas dadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador, que permitirá convalidar los resultados obtenidos en la presente investigación.

3.3.1 Con las Especificaciones técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a Cualquier Escala (Primer Borrador) año 2006.

En este documento se describen las especificaciones técnicas para el vuelo y toma de fotografía aérea para aviones tripulados, a continuación en la Tabla 4, se coloca una lista de cumplimiento de los procesos descritos por el IGM (2006).

Tabla 4. Lista de comprobación de actividades a realizar para la toma de Fotografía aérea.

Condiciones de Vuelo	IGM	Investigador
LÍNEAS DE VUELO		
Fotografías Sucesivas ángulo no mayor a 5°		Cumple
Líneas de vuelo paralelas Angulo no mayor a 5°		Cumple
RECUBRIMIENTO		
Terreno Plano 60% traslape longitudinal		75%
Terreno Plano 60% traslape lateral		75%
CONDICIONES METEOROLÓGICAS		
Cielos despejados, sin nubes, suelo sin bruma		Cumple
CONDICIONES DE CAMARA FOTOGRAMÉTRICA		
Cámara de precisión de buena resolución espacial (tamaño de pixel)		Cumple
Gráficos de Vuelo (líneas de plan de vuelo)		Cumple
SISTEMAS DE NAVEGACIÓN CINEMÁTICOS		
Plan de Vuelo		Cumple
Correcciones de datos de DGPS		Cumple
Metadatos indicando sistema de coordenadas SIRGAS /WGS84		Cumple
TRABAJOS DE APOYO		
Al menos 2 DGPS L1 o L1/L2		DGPS L1
GPS dentro del avión		Cumple
Uso de la REGME para post-proceso		Cumple
Tiempo de Lectura de DGPS por punto (70 min)		30 min
CONDICIONES DE LOS PUNTOS DE APOYO		
Calibrados por datos de alguna estación REGME		Cumple

Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: IGM, 2006

Como se puede observar en la tabla anterior, se cumple la mayoría de requerimientos técnicos observados en este documento (Anexo 8); se supera en el traslape longitudinal y lateral; pero no se cumple con el tiempo de lectura del DGPS, ya que para esa época, los equipos tenían

menor tecnología y la REGME no estaba tan densificada. Al consultar con los técnicos del IGM, ellos mencionaron que para la distancia (28,7 km) de donde está el sitio de estudio a la estación CUEC, solo eran necesarios 30 min de lectura. (Yépez, com. per., 2016)

Existen otros parámetros y condicionantes que no fueron observados en este documento, ya que en el mismo mencionan y características propias de vuelos tripulados con cámaras analógicas para fotografía aérea.

3.3.2 Con las Especificaciones técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador) año 2008.

Este documento producido por el IGM (2008), detalla las especificaciones técnicas para la obtención de ortofotos y ortofotomosaicos (Anexo 9), tomando en cuenta los pasos necesarios para asegurar que los productos cumplan con los parámetros de exactitud.

Se hace mención a la necesidad de tomar puntos de control para la calibración del modelo resultante; además aluden a las correcciones de deformidad (paralelaje) de las fotos, y de cómo escoger el mejor método para este procedimiento. Además mencionan que se deben realizar correcciones radiométricas para la estandarización del color y la brillantez de la ortofoto.

Mencionan además, que las ortofotos deben contener continuidad o traslape adecuado, y que este va a depender de las características del terreno.

Algo que deja muy claro este documento es que la exactitud horizontal de la ortofoto u ortofotomosaico, depende de la calibración de la cámara y la exactitud de los puntos de control que deben estar calculados con un intervalo de confianza del 95%.

Además indica las especificaciones técnicas de exactitud para ortofotos digitales, misma figura que a continuación se detalla.

Figura 28 Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales
Elaboración: IGM, 2008

ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	ESCALA DE ORTOFOTOS	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	PRECISIÓN HORIZONTAL (EN METROS)	PRECISIÓN VERTICAL (EN METROS)
1:5 000	0.07	1:1 000	0.10	0.30	0.25
1:10 000	0.14	1:2 000	0.20	0.60	0.50
1:20 000	0.28	1:2 500	0.25	0.80	0.60
1:30 000	0.42	1:5 000	0.50	1.50	1.25
1:60 000	0.84	1:10 000	1.00	3.00	2.50
1:60 000	0.84	1:20 000	1.00	6.00	2.50
1:60 000	0.84	1:25 000	1.00	7.50	5.00
1:60 000	0.84	1:50 000	2.00	15.00	10.00

Fuente: IGM, 2008

Como se puede observar en la Figura 28, las especificaciones técnicas para la precisión horizontal (X, Y) es de 0,30 m; en tanto que para la presión vertical es de 0,25 m, tomando en cuenta un tamaño de pixel de 10 cm.

Tomando en cuenta estas especificaciones técnicas, y considerando sus precisiones tanto horizontal como vertical, el Modelo 1 no calificaría dentro de los parámetros exigidos por el IGM, en tanto que el Modelo 2 por la media en los Puntos de Control no califica solo en la precisión vertical, al igual que el Modelo 4.

Al revisar el Modelo 3, y fijarse en la media del Punto de Control (check point) de sus coordenadas X, Y, Z; éstas cumplen por un amplio margen la precisión establecida por el IGM en sus especificaciones técnicas.

Si se quiere ser más rígido y analizar los datos del Modelo 3, sumándole el error residual del post-procesamiento de los GCP y los del post-proceso del ortofotomosaico, se tendría

Tabla 5. Sumatoria de Errores de Post-procesamiento de Datos para Modelo 3

Errores	X	Y	Z
Error Post-proceso GCP (m)	0,017	0,035	0,039
Error Post-proceso Ortofoto (m)	-0,0387	0,0512	0,0075
Sumatoria	-0,0217	0,0862	0,0465

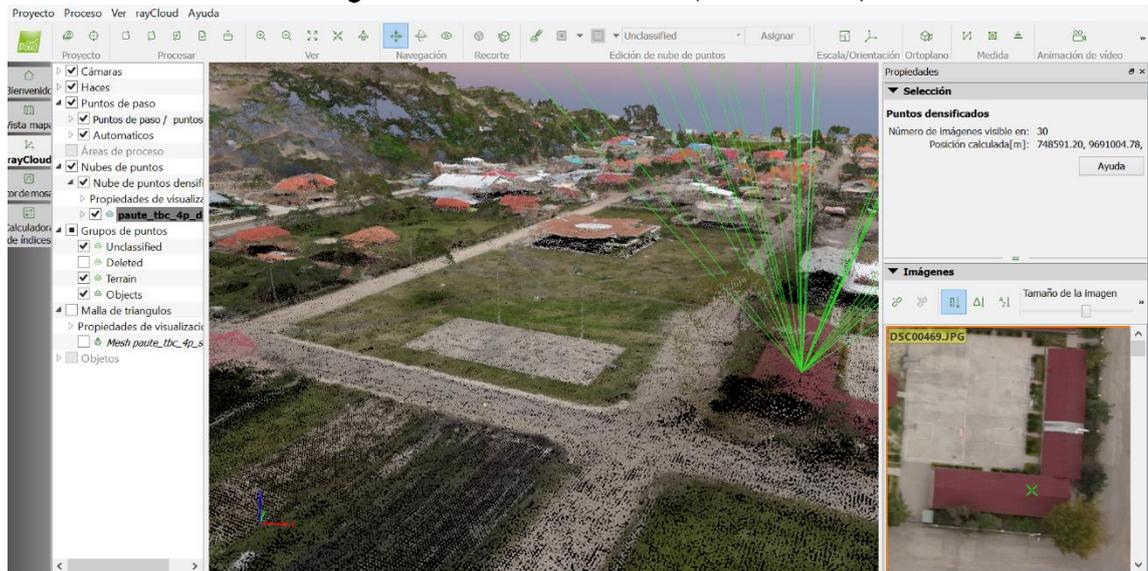
Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Como se puede apreciar en la Tabla 5, si se suman los dos errores del post-procesamiento ésta sigue cubriendo con amplio margen el requerimiento planteado por el IGM en sus especificaciones técnicas.

3.3.3 Otros Resultados.

El programa Pix4DMapper además del ortofotomosaico, genera otros productos, como la nube de puntos, que es un archivo en formato .LAS, que contiene datos de elevaciones y es utilizado para generar el modelo digital de superficies y curvas de nivel. (Figura 29)

Figura 29 Nube de Puntos (Formato LAS)

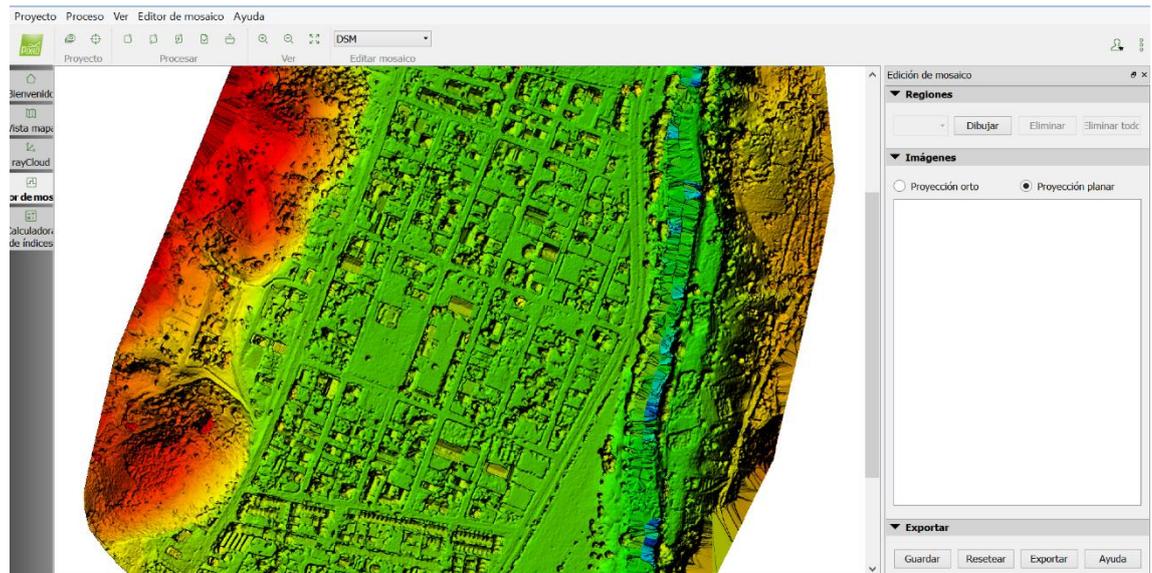


Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Pix4Dmapper; Levantamiento de Campo, 2016

Otro producto resultante es el Modelo Digital de Superficies, que es generado a partir de la nube de puntos y muestra las elevaciones del terreno, incluyendo infraestructura como viviendas, edificios; postes de energía eléctrica, equipamiento comunitario; vegetación arbustiva y arbórea, y terreno descubierto. (Figura 30)

Figura 30 Modelo Digital de Superficie



Elaboración: Juan Pablo Rivera, 2016

Fuente: Pix4Dmapper; Levantamiento de Campo, 2016

Como un dato adicional se indican los tiempos de procesamiento de los diferentes productos:

- Proceso Inicial: 9:43 minutos
- Densificación de Nube de Puntos: 28:43 minutos
- Generación de MDS y Ortofotomosaico: 17:37 min

Esto nos da un tiempo total de procesamiento de 56:03 minutos.

El computador utilizado presenta las siguientes características de Hardware

- CPU: Intel ® Core ™ I 7-4970k CPU@ 4.00 GHz
- RAM:16 GB
- GPU: NVIDIA GeForce GTX980 (Driver 10.18.13.6191) Intel ® HD Graphics 4600 (Driver 10.18.14.4170)

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Luego del análisis y discusión de los resultados, tanto de campo como de laboratorio y la relación entre éstos se pueden sacar las siguientes conclusiones principales.

La base para la precisión del ortofotomosaico y demás productos fruto del levantamiento con el UAV/Drone, es el diseño y medición de la red geodésica de 4to orden o GCPs; debido a que estas actividades proporcionan los datos iniciales de los cuales la investigación se basa y fundamenta sus precisiones; una red adecuadamente medida, siguiendo las recomendaciones técnicas dadas por el IGM en sus diferentes publicaciones, asegura que los resultados sean los más precisos. Para la presente investigación se diseñó y midió la red geodésica de 4to orden de manera adecuada, y fruto de eso se pudo obtener un modelo con exactitudes que entran dentro de los parámetros del IGM. Es recomendable densificar más la red geodésica de 4to orden o GCP para que, si existen puntos que no están bien medidos, existan más puntos que puedan ser auxiliares de la medición.

Otra conclusión importante que se debe tomar en cuenta, es el trabajar con programas especializados y actualizados para las tareas de post-procesamiento, porque de estos programas también dependen que los datos levantados o medidos en campo cumplan con los estándares adecuados de precisión. Por eso al comparar los productos del post-procesamiento entre el programa GNSS Solutions (año de producción 2005) con el programa Trimble Business Center v3.4 (año de producción 2014), los resultados de este último son los más precisos.

Se concluye que el Modelo 3 post-procesado con 4 GCPs (en Trimble Business Center), fue el modelo que mayor precisión presenta comparándolo con los modelos 1, 2 y 4; ya que excluyó del análisis a los puntos P1 y P2 que mayor ruido en la medición tuvieron, dando un modelo de centímetros de precisión.

Una de las conclusiones más importantes de esta investigación es que los productos generados por el UAV/Drone, cumplen con las especificaciones técnicas de precisión, tanto horizontal y vertical dadas en los documentos técnicos del IGM; si bien es cierto no se pueden seguir todo el proceso metodológico por ellos emitido (ya que es para fotografía aérea tomada con aviones tripulados), se realizó lo más similar posible, y los resultados fueron exitosos. Comprobando la hipótesis planteada en la presente investigación.

CAPÍTULO 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coello, A. Ballesteros, G. 2015. Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con Topografía clásica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Técnicos en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad politécnica de Madrid.
- Cuerno, C. 2015. Cap. 1. Origen y desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Graficas Arias Montano. Madrid – España.
- Delgado. O, 2016. Comunicación Personal en Reunión de Trabajo.
- Drewes, H. 2014. Sistemas de Referencia. Sistema de Referencia Geocéntrico de las Américas SIRGAS - Instituto Geográfico Militar (www.igm.gob.ec). Quito – Ecuador.
- Emotion 2 Manual. 2015. Extended user manual eBee and eBee Ag. Sensefly Ltd. Cheseaux-Lausanne – Swizerland. 176 pag.
- GNSS Solutions, 2005. User Manual. Trimble Navigation Solutions. www.spectraprecisions.com
- Haluani, M. 2014. La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: historia, tipos y funciones de los drones letales. Revista Cuestiones políticas Vol. 30 No 52. Maracaibo – Venezuela
- IGM, 2006. Especificaciones Técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a cualquier Escala (Primer Borrador). Sin publicación. www.igm.gob.ec
- IGM. 2008. Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador) Sin Publicación. www.igm.gob.ec
- IGM,2014. REGME: Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador Formulario Informativo Estación de Monitoreo Cotinuo Cuenca – CUEC. www.igm.gob.ec
- INEC, 2011. División político Administrativa del Ecuador. Base de Datos Nacional.

- Quality Report, 2016. Reporte de Calidad de Pix4DMapper para Modelo 1, 2 y 3 Generados. Sin Publicación
- Pachas, R. 2009. El levantamiento Topográfico: Uso del GPS y Estación Total. Laboratorio de Topografía. Departamento de ingeniería. Núcleo Universitario Raquel Rangel. Universidad de los Andes. Trujillo – Venezuela.
- Paredes, D y Noguera, A. 2015. Cap. 5. Aplicaciones Cartográficas de los UAV's. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Graficas Arias Montano. Madrid – España.
- Pix4DMapper, 2016. Manual del Usuario y procedimientos. <https://support.pix4d.com>
- TBC (Trimble Business Center v2.4), 2014 Manual para post-procesamiento de datos de campo. Trimble Navigation Solutions. www.trimble.com
- Velasco, J. García-Nieto, S. Reynoso-Meza, G. y J. Sanchis. 2012. Desarrollo y Evaluación de una estación de control de tierra para Vehículos aéreos no tripulados. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia – España.
- Yépez. 2016. Técnico del Instituto Geográfico Militar Comunicación Personal por medio de conferencia telefónica.

ANEXOS

ANEXO 1

ANEXO 2

ANEXO 3

ANEXO 4

ANEXO 5

ANEXO 6

ANEXO 7

ANEXO 8

ANEXO 9