



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE AEROTRIANGULACIÓN Y  
NÚMERO DE PUNTOS DE CONTROL SOBRE LA CALIDAD DE LAS  
ORTOFOTOS CON ERDAS LPS CORE Y ORIMA**

**AUTOR: CHUQUITARCO TACO, ALEX DAVID**

**DIRECTOR: ING. KIRBY POWNEY, EDUARDO PATRICIO MG.**

**SANGOLQUÍ**

**2018**

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, *“ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE AEROTRIANGULACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS DE CONTROL SOBRE LA CALIDAD DE LAS ORTOFOTOS CON ERDAS LPS CORE Y ORIMA”* fue realizado por el señor *Chuquitarco Taco, Alex David* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 07 de septiembre del 2018****Ing. Eduardo Patricio Kirby Powney, Mg.****C.I.: 010261181-1**

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Chuquitarco Taco, Alex David*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“Análisis de los métodos de aerotriangulación y número de puntos de control sobre la calidad de las ortofotos con Erdas LPS Core y Orima”* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 12 de Septiembre del 2018

Alex David, Chuquitarco Taco.

C.I.: 1725405177

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN POR PARTE DE LA ESPE****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****AUTORIZACIÓN**

Yo, Chuquitarco Taco, Alex David autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Título: *“Análisis de los métodos de aerotriangulación y número de puntos de control sobre la calidad de las ortofotos con Erdas LPS Core y Orima”* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 12 de Septiembre del 2018****Alex David, Chuquitarco Taco.**

C.I.: 1725405177



## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mis abuelitos María Natividad, Manuel e Isabel, quienes en vida me dieron los consejos y la fuerza necesaria para continuar ante toda adversidad.

A mi padre René y madre Susana, por su apoyo incondicional y sus incontables muestras de afecto a lo largo del camino de culminar una carrera; y a mis hermanos Santiago y Jenny por ser los pilares de una gran familia.

## AGRADECIMIENTO

Al departamento de aerotriangulación del Instituto Geográfico Militar, ingenieros y técnicos por brindarme la apertura y el conocimiento para el desarrollo de esta investigación, de manera especial al Ingeniero Lenin Jaramillo director del área.

Al laboratorio de Sensores Remotos y Fotogrametría de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, y a sus integrantes al ser un espacio de conocimiento y enseñanza; muy especialmente a director de esta investigación Ing. Eduardo Kirby, por sus largas jornadas de enseñanza y ser un gran mentor en el transcurso de mi carrera.

A mis grandes amigos Oscar y Andrés, que me acompañaron a sobrellevar el estrés con su amistad y sus consejos fueron de gran ayuda.

A mis compañeras Sisa, Damariz y Erika por el apoyo brindado en las salidas de campo, en la toma de datos; su aporte fue de gran importancia en la realización de este estudio.

A mis diferentes profesores en el transcurso de la carrera que supieron guiarme con sus conocimientos e incentivar la curiosidad del área geográfica.

Mi más sincero agradecimiento a los diferentes colegas, maestros, amigos y familiares en el transcurso de la carrera universitaria. Finalmente agradezco a Dios y a quienes me dieron un aliento por mantenerme firme, constante y darme la fuerza todos los días por seguir dando lo mejor de mí.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificado del director del trabajo de titulación.....	i
Autoría de responsabilidad .....	ii
Autorización de publicación por parte de la ESPE .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimiento .....	v
Índice de contenido.....	vi
Índice de tablas .....	xviii
Índice de figuras .....	xx
Resumen.....	xxviii
Abstract.....	xxix
CAPITULO I.....	1
1. GENERALIDADES .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Estudios relacionados .....	2
1.3. Planteamiento del problema .....	4
1.4. Justificación e importancia .....	5
1.5. Descripción del área de estudio.....	6

1.6. Objetivos.....	7
1.6.1. Objetivo general.....	7
1.6.2. Objetivos específicos.....	7
1.7. Metas.....	7
CAPÍTULO II.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Definición de fotogrametría.....	9
2.1.1. Problema fundamental de la Fotogrametría.....	9
2.1.2. Introducción a la fotogrametría digital.....	11
2.1.3. Imagen digital.....	11
2.1.4. Resolución imagen-sensor.....	12
2.1.5. Cámaras fotogramétricas.....	13
2.1.5.1. Cámaras matriciales.....	13
2.1.5.2. Cámaras lineales.....	14
2.1.6. Paralaje.....	15
2.1.7. Condición de colinealidad y coplanaridad.....	15
2.1.8. Distorsiones y afectaciones fotogramétricas.....	17
2.2. Proceso fotogramétrico.....	20
2.2.1. Contrato.....	21

2.2.2. Plan de vuelo .....	23
2.2.3. Control geodésico o control terrestre .....	24
2.2.3.1. Generalidades GNSS .....	24
2.2.3.2. Estaciones de monitoreo continuo (EPEC) .....	25
2.2.3.3. Métodos de posicionamiento GNSS.....	26
2.2.3.4. Puntos de apoyo fotogramétrico (GCP) .....	27
2.2.4. Ajuste fotogramétrico .....	28
2.2.5. Orientación interna .....	30
2.2.6. Orientación exterior .....	32
2.2.6.1. Orientación relativa .....	33
2.2.6.2. Puntos de Von Gruber .....	33
2.2.6.3. Orientación absoluta .....	34
2.3. Aerotriangulación .....	35
2.3.1. Definición de aerotriangulación .....	36
2.3.2. Usos de la aerotriangulación .....	37
2.3.3. Clasificaciones de la Aerotriangulación.....	37
2.3.3.1. Clasificación de la A. según la Sociedad Americana de Fotogrametría (1980).....	38
2.3.3.2. Clasificación de la A. según Lerma (1999).....	39
2.3.3.3. Clasificación de la A. según Pérez J. (2001).....	41

2.3.3.4. Clasificación de la A. según Sánchez (2007) .....	42
2.3.4. Modelos independientes en ajuste secuencial .....	44
2.3.5. Método de haces de luz en ajuste de bloques .....	47
2.3.6. Convergencia .....	48
2.3.7. Restitución .....	49
2.3.8. Resultados derivados del ajuste .....	49
2.3.8.1. Modelo digital de superficie .....	50
2.3.8.2. Modelo digital de elevación (MDE) .....	51
2.3.8.3. Modelo digital del terreno .....	51
2.3.8.4. Imágenes corregidas .....	52
2.4. Programas de ajuste fotogramétrico .....	53
2.4.1. Erdas-LPS .....	54
2.4.2. Orima .....	57
2.4.3. Z/I Imagine .....	59
2.5. Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico (GCP) .....	60
2.5.1. Ubicación de los puntos de apoyo fotogramétrico .....	65
2.5.2. Documentación de los puntos de control .....	66
2.6. Control de exactitud posicional .....	67
2.6.1. ASPRS “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” .....	67



2.6.2. Calidad de las imágenes .....	68
2.6.3. Tolerancias de las orientaciones .....	68
2.6.3.1. Tolerancias de la orientación interior y la orientación exterior.....	68
2.6.3.2. Tolerancias de la aerotriangulación.....	69
2.6.4. Tolerancias de los puntos de apoyo fotogramétrico .....	71
2.6.5. Precisiones de ortofotos u ortoimágenes .....	72
2.6.6. Tamaño de la muestra de puntos en la exactitud posicional .....	72
2.6.7. Exactitud posicional .....	73
2.7. Estadísticos del control de calidad .....	76
2.7.1. Definiciones estadísticas .....	76
CAPITULO III .....	82
3. METODOLOGÍA.....	82
3.1. Generalidades .....	82
3.2. Recopilación de información secundaria.....	85
3.2.1. Imágenes.....	85
3.2.2. Escala y altura de vuelo.....	86
3.2.3. Información de la cámara .....	88
3.2.4. IMU/GPS .....	90
3.2.5. Recopilación de monografías y bloque fotogramétrico con puntos Von Gruber.....	91

3.3. Obtención de los GCP de apoyo fotogramétrico y de exactitud posicional.....	92
3.3.1. Planificación.....	92
3.3.2. Navegación y toma de puntos.....	94
3.3.3. Procesamiento.....	96
3.4. Generación de ortofotos mediante ajuste en LPS Core.....	99
3.4.1. Generación de ortofotos sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	100
3.4.1.1. Creación del bloque en LPS .....	100
3.4.1.2. Ingreso de los parámetros de la cámara y centros IMU/GPS .....	100
3.4.1.3. Configuración de la orientación interior en LPS .....	102
3.4.1.4. Configuración de la orientación relativa en LPS.....	103
3.4.1.5. Configuración de la orientación absoluta con 13 GCP en LPS.....	104
3.4.1.6. Configuración de la aerotriangulación sin matriz de pesos en LPS .....	105
3.4.1.7. Generación de los MDS sin matriz de pesos y 13 GCP .....	107
3.4.1.8. Generación de Ortofotos sin matriz de pesos y 13 GCP .....	109
3.4.1.9. Generación de mosaicos sin matriz de pesos y 13 GCP.....	111
3.4.2. Generación de ortofotos con matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	113
3.4.2.1. Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos en LPS .....	113
3.4.2.2. Generación de los MDS con matriz de pesos y 13GCP .....	115
3.4.2.3. Generación de Ortofotos con matriz de pesos y 13 GCP .....	115

3.4.2.4. Generación de Mosaicos con matriz de pesos y 13 GCP .....	115
3.4.3. Generación de ortofotos sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	115
3.4.3.1. Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP .....	116
3.4.3.2. Configuración de la aerotriangulación sin matriz de pesos en LPS y 19GCP .....	117
3.4.3.3. Generación de los MDS sin matriz de pesos y 19 GCP .....	117
3.4.3.4. Generación de Ortofotos sin matriz y 19 GCP .....	117
3.4.3.5. Generación de Mosaicos sin matriz de pesos y 19 GCP .....	118
3.4.4. Generación de ortofotos con matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	118
3.4.4.1. Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos en LPS y 19GCP .....	118
3.4.4.2. Generación de los MDS con matriz de pesos y 19 GCP .....	119
3.4.4.3. Generación de Ortofotos con matriz de pesos y 19 GCP .....	119
3.4.4.4. Generación de Mosaicos con matriz de pesos y 19 GCP .....	119
3.5. Generación de ortofotos mediante el ajuste en Orima.....	120
3.5.1. Generación de ortofotos con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima.....	120
3.5.1.1. Pasos introductorios de Orima.....	121
3.5.1.2. Umbrales de calidad de las orientaciones.....	122
3.5.1.3. Orientación relativa en Orima .....	124
3.5.1.4. Orientación absoluta con 13 GCP en Orima .....	126
3.5.1.5. Aerotriangulación preliminar a la generación de tie points en Orima.....	128

3.5.1.6. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de bloque en Orima.....	130
3.5.1.7. Generación de los MDS con ajuste en bloque y 13 GCP .....	133
3.5.1.8. Generación de Ortofotos con ajuste en bloque y 13 GCP .....	133
3.5.1.9. Generación de Mosaicos con ajuste en bloque y 13 GCP .....	133
3.5.2. Generación de ortofotos con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.....	134
3.5.2.1. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de líneas de vuelo en Orima. ....	134
3.5.2.2. Generación de los MDS con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP .....	136
3.5.2.3. Generación de Ortofotos con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP .....	136
3.5.2.4. Generación de Mosaicos con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP.....	137
3.5.3. Generación de ortofotos con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima.....	137
3.5.3.1. Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP en Orima .....	137
3.5.3.2. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de bloque en Orima y 19GCP.....	138
3.5.3.3. Generación de los MDS con ajuste en bloque y 19 GCP .....	138
3.5.3.4. Generación de Ortofotos con ajuste en bloque y 19 GCP.....	139
3.5.3.5. Generación de Mosaicos con ajuste en bloque y 19 GCP .....	139
3.5.4. Generación de ortofotos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima.....	139
3.5.4.1. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de líneas de vuelo y 19GCP.....	139
3.5.4.2. Generación de los MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP.....	140
3.5.4.3. Generación de Ortofotos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP .....	140

3.5.4.4. Generación de Mosaicos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP .....	140
3.6. Generación de ortofotos mediante ajuste en Z/I Imagine.....	141
3.6.1. Creación del proyecto en ZI/Imagine .....	141
3.6.2. Ingreso de los parámetros de la cámara y centros IMU/GPS .....	143
3.6.3. Configuración de la orientación exterior en Z/I Imagine .....	144
3.6.3.1. Configuración de la orientación absoluta.....	145
3.6.3.2. Densificación de los puntos de paso en Z/I Imagine .....	146
3.6.4. Ejecución de la aerotriangulación en Z/I Imagine.....	147
3.6.5. Generación del mosaico de MDS del ajuste en Z/I Imagine .....	148
3.6.6. Generación de ortofotos del ajuste en Z/I Imagine .....	149
3.6.7. Generación de ortomosaicos del ajuste en Z/I Imagine.....	150
3.7. Control de calidad de los productos generados .....	152
3.7.1. Estructura de la información para la validación .....	152
3.7.2. Cantidad y distribución de los puntos de exactitud posicional.....	154
3.7.3. Control de calidad de los mosaicos de MDS.....	156
3.7.4. Control de calidad de los ortomosaicos .....	158
CAPITULO IV .....	162
4. Resultados.....	162
4.1. Resultados de la recopilación de la información secundaria.....	162

4.1.1. Resultados del archivo IMU/GPS .....	162
4.1.2. Resultados de la recopilación de monografías y bloque fotogramétrico.....	163
4.2. Resultados de las distribución de los GCP y puntos de exactitud posicional .....	164
4.2.1. Distribución resultante de los GCP .....	165
4.2.2. Resultados de los puntos procesados.....	166
4.3. Resultados de aerotriangulación con diferentes programas fotogramétricos .....	169
4.3.1. Resultados de la aerotriangulación en Erdas-LPS.....	169
4.3.1.1. Resultado de la aerotriangulación sin matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	169
4.3.1.2. Resultado de la aerotriangulación con matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	170
4.3.1.3. Resultado de la aerotriangulación sin matriz de pesos y 19GCP en LPS .....	171
4.3.1.4. Resultado de la aerotriangulación con matriz de pesos y 19GCP en LPS .....	172
4.3.2. Resultados de la aerotriangulación en ORIMA.....	172
4.3.2.1. Resultado de la aerotriangulación en bloque y 13 GCP en Orima .....	173
4.3.2.2. Resultado de la aerotriangulación en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.....	174
4.3.2.3. Resultado de la aerotriangulación en bloque y 19GCP en Orima.....	175
4.3.2.4. Resultado de la aerotriangulación en líneas de vuelo y 19GCP en Orima.....	176
4.3.3. Resultado de la aerotriangulación en Z/I Imagine.....	177
4.4. Resultados de los mosaicos de Modelos Digitales de Superficie .....	178
4.4.1. Resultado del mosaico MDS sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	179



4.4.2. Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	179
4.4.3. Resultado del mosaico MDS sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	180
4.4.4. Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	181
4.4.5. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima.....	182
4.4.6. Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.....	183
4.4.7. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima.....	184
4.4.8. Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19GCP en Orima.....	185
4.4.9. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine .....	186
4.5. Resultados de los mosaicos de las ortofotos.....	187
4.5.1. Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	187
4.5.2. Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	188
4.5.3. Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	189
4.5.4. Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	189
4.5.5. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima.....	190
4.5.6. Resultado del ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.....	191
4.5.7. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima.....	191
4.5.8. Resultado del ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima.....	192
4.5.9. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine .....	193
4.6. Resultados del control de calidad de productos generados .....	194

4.6.1. Resultados de la estructuración de la información.....	194
4.6.2. Resultados de los puntos usados en la exactitud posicional.....	195
4.6.3. Resultados de los mosaicos MDS.....	195
4.6.4. Resultados del error planimétrico de los ortomosaicos.....	200
4.6.4.1. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E_X_i_VII_X.....	200
4.6.4.2. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E_x_ii_vii_x.....	201
4.6.4.3. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E_Y_i_VII_X.....	202
4.6.4.4. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E_y_ii_VII_X.....	203
4.6.4.5. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O_X_iii_VII_X.....	203
4.6.4.6. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O_X_iv_VII_X.....	204
4.6.4.7. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O_Y_iii_VII_X.....	205
4.6.4.8. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O_Y_iv_VII_X.....	206
4.6.4.9. Resultados del error planimétrico del ortomosaico en Z/I Imagine.....	206
4.6.5. Resultados s de los ortomosaicos.....	207
CAPITULO IV.....	212
5. Conclusiones y recomendaciones.....	212
5.1. Conclusiones.....	212
5.2. Recomendaciones.....	214
6. Bibliografía.....	216

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Coordenadas en sistema WGS 84 UTM, zona 17S de la zona de estudio.....</i>	6
<b>Tabla 2.</b> <i>Elementos de un contrato fotogramétrico.....</i>	22
<b>Tabla 3.</b> <i>Recubrimiento longitudinal y transversal.....</i>	24
<b>Tabla 4.</b> <i>Clasificaciones de la aerotriangulación por diferentes autores.....</i>	43
<b>Tabla 5.</b> <i>Parámetros de adicionales de ajuste.....</i>	56
<b>Tabla 6.</b> <i>Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico.....</i>	62
<b>Tabla 7.</b> <i>Ejemplos de calidad para datos planimétricos digitales de alta precisión.....</i>	69
<b>Tabla 8.</b> <i>Especificaciones técnicas de ortofotos digitales.....</i>	72
<b>Tabla 9.</b> <i>Número recomendado de puntos de control basado en la cantidad de área.....</i>	73
<b>Tabla 10.</b> <i>Estándares de precisión horizontal para datos geoespaciales.....</i>	75
<b>Tabla 11.</b> <i>Estándares de precisión vertical para datos de elevación digital.....</i>	75
<b>Tabla 12.</b> <i>Precisión horizontal/ejemplos de calidad para datos planimétricos digitales.....</i>	76
<b>Tabla 13.</b> <i>Fecha y línea de vuelo de la imágenes utilizadas en el proyecto.....</i>	85
<b>Tabla 14.</b> <i>Relación del GSD y escala de la foto para imágenes digitales.....</i>	86
<b>Tabla 15.</b> <i>Relación entre escala de la foto y escala del mapa derivado.....</i>	87
<b>Tabla 16.</b> <i>Fechas y cantidad de puntos obtenidos en campo.....</i>	95
<b>Tabla 17.</b> <i>Informe de procesamiento de puntos con inconvenientes.....</i>	98
<b>Tabla 18.</b> <i>Identificadores de los GCP en la Distribución 13.....</i>	104
<b>Tabla 19.</b> <i>Identificadores de los GCP en la Distribución 19.....</i>	116
<b>Tabla 20.</b> <i>Disposición de las plantillas con los puntos de von Gruber.....</i>	124

<b>Tabla 21.</b> <i>Identificadores de los GCP en el ajuste Z/I Imagine.</i> .....	145
<b>Tabla 22.</b> <i>Nomenclatura de los mosaicos MDS en la geodatabase.</i> .....	152
<b>Tabla 23.</b> <i>Nomenclatura de los ortomosaicos en la geodatabase.</i> .....	153
<b>Tabla 24.</b> <i>Resultados del Aplanix a archivo IMU/GPS.</i> .....	162
<b>Tabla 25.</b> <i>Elenco de coordenadas de las monografías de Barragán (2015).</i> .....	163
<b>Tabla 26.</b> <i>Detalles de los puntos a utilizar en el proyecto</i> .....	166
<b>Tabla 27.</b> <i>Modelo lógico de las geodatabases.</i> .....	194
<b>Tabla 28.</b> <i>Puntos utilizados para el control de calidad.</i> .....	195
<b>Tabla 29.</b> <i>Parámetros estadísticos de los mosaicos de MDS</i> .....	196
<b>Tabla 30.</b> <i>Nivel de confianza para los MDS</i> .....	197
<b>Tabla 31.</b> <i>Intervalo de confianza de los MDS</i> .....	198
<b>Tabla 32.</b> <i>Precisión de los MDS al 90% de confianza</i> .....	199
<b>Tabla 33.</b> <i>Estadísticos generales de los ortomosaicos.</i> .....	207
<b>Tabla 34.</b> <i>Indicador del RMSE<sub>min</sub> / RMSE<sub>max</sub></i> .....	208
<b>Tabla 35.</b> <i>Nivel de confianza de los ortomosaicos con la normativa IGM.</i> .....	209
<b>Tabla 36.</b> <i>Exactitud de los ortomosaicos con la normativa ASPRS.</i> .....	210

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Localización geográfica de la zona de estudio. ....	6
<i>Figura 2.</i> Problema fundamental de la fotogrametría. ....	10
<i>Figura 3.</i> Pasos diferenciados en el proceso fotogrametrico. ....	10
<i>Figura 4.</i> Sistema de coordenadas de imagen digital. ....	11
<i>Figura 5.</i> Nivel de detalle en relación con el tamaño del pixel. ....	12
<i>Figura 6.</i> Ejemplo de toma matricial. ....	14
<i>Figura 7.</i> Cám. Fotogra. digital lineal. ....	14
<i>Figura 8.</i> Paralaje de un punto. ....	15
<i>Figura 9.</i> Condición de colinealidad. ....	16
<i>Figura 10.</i> Condición de coplanaridad. ....	16
<i>Figura 11.</i> Distorsión del pixel por los parámetros de orientación. ....	17
<i>Figura 12.</i> Efecto de la toma en una superficie inclinada. ....	18
<i>Figura 13.</i> Efecto del relieve sobre las imágenes. ....	18
<i>Figura 14.</i> Efecto de la refracción atmosférica. ....	19
<i>Figura 15.</i> Efecto del curvatura terrestre ....	20
<i>Figura 16.</i> Proceso fotogramétrico ....	21
<i>Figura 17.</i> Plan de vuelo ....	23
<i>Figura 18.</i> Constelación de satélites ....	25
<i>Figura 19.</i> Distribución estaciones REGME ....	25
<i>Figura 20.</i> Tipos de posicionamiento ....	26

<i>Figura 21.</i> Ejemplo de punto de control (GCP).....	28
<i>Figura 22.</i> Ejemplo de Certificado de calibración.....	29
<i>Figura 23.</i> Cadena de automatización para diferentes imágenes.....	30
<i>Figura 24.</i> Sistema imagen-cámara .....	31
<i>Figura 25.</i> Orientación interna de las imágenes digitales.....	31
<i>Figura 26.</i> Concepto de orientación exterior .....	32
<i>Figura 27.</i> Orientación relativa.....	33
<i>Figura 28.</i> Distribución y colocación de puntos Von Gruber.....	34
<i>Figura 29.</i> Parámetros de altitud de un sensor fotogramétrico .....	35
<i>Figura 30.</i> Triangulación radial. ....	38
<i>Figura 31.</i> Modelos independientes.....	40
<i>Figura 32.</i> Haces de luz de un bloque fotogramétrico.....	40
<i>Figura 33.</i> Ejemplo Aerotriangulación por pasadas .....	41
<i>Figura 34.</i> Modelos orientados individualmente .....	45
<i>Figura 35.</i> Izq. Ajuste planimétrico. Der. Ajuste tridimensional .....	45
<i>Figura 36.</i> Colinealidad entre imagen-objeto .....	47
<i>Figura 37.</i> Ejemplo de un retituidor .....	49
<i>Figura 38.</i> Diferencias entre DTM (en español MDT) y DSM (en español MDS).....	50
<i>Figura 39.</i> Ejemplo de MDE .....	51
<i>Figura 40.</i> Ejemplo de MDT .....	52
<i>Figura 41.</i> Ejemplo de mosaico .....	53
<i>Figura 42.</i> Interfáz aerotriangulación LPS-ERDAS.....	55



<b>Figura 43.</b> Vectores residuales en Orima .....	57
<b>Figura 44.</b> Modelo de Muller (1991).....	58
<b>Figura 45.</b> Licencias de Orima .....	59
<b>Figura 46.</b> Distribución de GCP en un modelo .....	60
<b>Figura 47.</b> Distribución de GCP sin GPS .....	61
<b>Figura 48.</b> Distribución de GCP con GPS .....	62
<b>Figura 49.</b> Ejemplo de la ubicación de un punto de control fotogramétrico .....	65
<b>Figura 50.</b> Ejemplo de monografía .....	66
<b>Figura 51.</b> Metodología general del proyecto .....	84
<b>Figura 52.</b> Certificado de calibración Vexcel Ultracam XP .....	88
<b>Figura 53.</b> Detalles de la cámara usada en proyectos fotogramétricos .....	89
<b>Figura 54.</b> PPA con rotación de 270 grados.....	89
<b>Figura 55.</b> Ejemplo de archivo APLANIX.....	90
<b>Figura 56.</b> IMU/GPS de importación .....	91
<b>Figura 57.</b> Ejemplo de ortofoto preliminar.....	92
<b>Figura 58.</b> Distribución A de planificación.....	93
<b>Figura 59.</b> Distribución B de planificación. ....	94
<b>Figura 60.</b> Navegación a los GCP y puntos de control posicional.....	95
<b>Figura 61.</b> Lugar foto identificable sector ESPE.....	96
<b>Figura 62.</b> Lugar foto identificable sector Alcazar 2.....	96
<b>Figura 63.</b> Altura de vuelo ingresada en el programa. ....	100
<b>Figura 64.</b> Parámetros de la cámara. ....	101

<i>Figura 65.</i> Izq. Importación IMU/GPS.....	101
<i>Figura 66.</i> Imágenes direccionadas. ....	102
<i>Figura 67.</i> Proyecto con orientación interior. ....	103
<i>Figura 68.</i> Distribución puntos Von Gruber.....	104
<i>Figura 69.</i> Distribución 13 en Erdas - LPS .....	105
<i>Figura 70.</i> Generación de Tie Points. ....	106
<i>Figura 71.</i> Aerotriangulación sin parámetros adicionales. ....	106
<i>Figura 72.</i> Orientación exterior concluida.....	107
<i>Figura 73.</i> Advanced Properties, Accuracy.....	108
<i>Figura 74.</i> Creación del MDS.....	108
<i>Figura 75.</i> Método de resampleo Bilineal. ....	109
<i>Figura 76.</i> Tamaño del pixel de la ortofoto. ....	110
<i>Figura 77.</i> Columna Ortho terminada.....	110
<i>Figura 78.</i> Mosaico del MDS. ....	111
<i>Figura 79.</i> Correcciones de color. ....	112
<i>Figura 80.</i> Unión de histograma. ....	112
<i>Figura 81.</i> Generación de Ortomosaico.....	113
<i>Figura 82.</i> Aerotriangulación con modelo Ebner's .....	114
<i>Figura 83.</i> Orientación absoluta culminada.....	114
<i>Figura 84.</i> Distribución 19 en Erdas- LPS. ....	116
<i>Figura 85.</i> Aerotriangulación finalizada en Erdas- LPS.....	117
<i>Figura 86.</i> Distribución 19 en Erdas- LPS. ....	119

<i>Figura 87.</i> Licencias de Orima. ....	121
<i>Figura 88.</i> Visualización de las ventanas de Orima. ....	121
<i>Figura 89.</i> Parámetros de vista del proyecto. ....	122
<i>Figura 90.</i> Parámetros de O. Relativa.....	123
<i>Figura 91.</i> Parámetros de O. Absoluta. ....	123
<i>Figura 92.</i> Codificación de los puntos de von Gruber.....	125
<i>Figura 93.</i> Ejemplo de punto de von Gruber. ....	125
<i>Figura 94.</i> Modelo correctamente pinchado.....	126
<i>Figura 95.</i> Tipo de vista para el pinchado de GCP.....	126
<i>Figura 96.</i> GCP pinchado. ....	127
<i>Figura 97.</i> GCP pinchado con correlación. ....	128
<i>Figura 98.</i> Valores de Input Parameters. ....	129
<i>Figura 99.</i> Ajuste preliminar con 13GCP y puntos Von Gruber. ....	130
<i>Figura 100.</i> Generación de los tie points para todo el bloque. ....	131
<i>Figura 101.</i> Puntos fuera de la zona de triple traslapo. ....	132
<i>Figura 102.</i> Puntos erróneos y sus elipses de error. ....	132
<i>Figura 103.</i> Generación de los tie points por línea de vuelo. ....	135
<i>Figura 104.</i> Ajuste con 13 GCP sin edición. ....	135
<i>Figura 105.</i> O. Exterior culminada.....	136
<i>Figura 106.</i> Distribución 19GCP en Orima.....	138
<i>Figura 107.</i> Distribución de 13 en el programa Z/I Imagine.....	141
<i>Figura 108.</i> Valores de calidad de Z/I Imagine.....	143

<b>Figura 109.</b> IMU/GPS importado en Z/I Imagine .....	144
<b>Figura 110.</b> Pinchado de GCP en estereoscopia .....	146
<b>Figura 111.</b> Mallado de los puntos de paso .....	146
<b>Figura 112.</b> Densificación de puntos de paso .....	147
<b>Figura 113.</b> Ajuste final en Z/I Imagine. ....	148
<b>Figura 114.</b> Visualización del MDS preliminar. ....	149
<b>Figura 115.</b> Parámetros para realizar las ortofotos. ....	150
<b>Figura 116.</b> Proceso de realizar un ortomosaico en Geomedia .....	151
<b>Figura 117.</b> Ortomosaico preliminar en Geomedia .....	151
<b>Figura 118.</b> Puntos de exactitud posicional para productos con 13GCP.....	155
<b>Figura 119.</b> Puntos de exactitud posicional para productos con 19GCP.....	155
<b>Figura 120.</b> Puntos de exactitud posicional para productos del ajuste en Z/I Imagine .....	156
<b>Figura.121</b> Extracción de valores del MDS respecto de los puntos de control.....	157
<b>Figura 122.</b> Ejemplo de punto pinchado en exactitud posicional.....	159
<b>Figura 123.</b> Cálculo de la coordenada Norte en ARCGIS .....	159
<b>Figura 124.</b> Ejemplos de la normativa IGM .....	161
<b>Figura 125.</b> Bloque fotogramétrico con los puntos de Von Gruber .....	164
<b>Figura 126.</b> Distribución 19 modificada de Ackermann e IGN .....	165
<b>Figura 127.</b> Distribución 13 modificada de Ackermann, DTC y Milkhail et al.....	165
<b>Figura 128.</b> Distribución de GCP's y puntos de exactitud posicional.....	168
<b>Figura 129.</b> Monografía I046 .....	168
<b>Figura 130.</b> Reporte A. sin matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	169

<b>Figura 131.</b> Reporte de aerotriangulación en LPS .....	170
<b>Figura 132.</b> Reporte A. con matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	171
<b>Figura 133.</b> Reporte A. sin matriz de pesos y 19GCP en LPS .....	171
<b>Figura 134.</b> Reporte A. con matriz de pesos y 19GCP en LPS .....	172
<b>Figura 135.</b> Reporte A. en bloque y 13GCP en Orima.....	173
<b>Figura 136.</b> Reporte de Aerotriangulación en Orima. ....	174
<b>Figura 137.</b> Reporte A. en líneas de vuelo y 13GCP en Orima .....	175
<b>Figura 138.</b> Reporte A. en bloque y 19 GCP en Orima.....	176
<b>Figura 139.</b> Reporte A. en líneas de vuelo y 19GCP en Orima .....	177
<b>Figura 140.</b> Reporte A. en bloque y 13GCP en Z/I Imagine.....	178
<b>Figura 141.</b> Mosaico de MDS sin matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	179
<b>Figura 142.</b> Mosaico MDS con matriz de pesos y 13GCP en LPS .....	180
<b>Figura 143.</b> Mosaico MDS sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	181
<b>Figura 144.</b> Mosaico MDS con matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	182
<b>Figura 145.</b> Mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima.....	183
<b>Figura 146.</b> Mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima. ....	184
<b>Figura 147.</b> Mosaico MDS con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima.....	185
<b>Figura 148.</b> Mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima. ....	186
<b>Figura 149.</b> Mosaico MDS con 13GCP y ajuste bloque en Z/I Imagine.....	187
<b>Figura 150.</b> Ortomosaico sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS .....	188
<b>Figura 151.</b> Ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS.....	188
<b>Figura 152.</b> Ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS .....	189

<b>Figura 153.</b> Ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS.....	190
<b>Figura 154.</b> Ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima .....	190
<b>Figura 155.</b> Ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima. ....	191
<b>Figura 156.</b> Ortomosaico con ajuste en bloque y19 GCP en Orima .....	192
<b>Figura 157.</b> Ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima .....	193
<b>Figura 158.</b> Ortomosaico con 13 GCP y ajuste en bloque con Z/I Imagine.....	193
<b>Figura 159.</b> Orden ascendente de la precisión de los mosaicos MDS.....	200
<b>Figura 160.</b> Error planimétrico de E_X_i_VII_X.....	201
<b>Figura 161.</b> Error planimétrico de E_x_ii_vii_x.....	202
<b>Figura 162.</b> Error planimétrico de E_Y_i_VII_X.....	202
<b>Figura 163.</b> Error planimétrico de E_y_ii_VII_X.....	203
<b>Figura 164.</b> Error planimétrico de O_X_iii_VII_X.....	204
<b>Figura 165.</b> Error planimétrico de O_X_iv_VII_X.....	205
<b>Figura 166.</b> Error planimétrico de O_Y_iii_VII_X.....	205
<b>Figura 167.</b> Error planimétrico de O_Y_iv_VII_X.....	206
<b>Figura 168.</b> Error planimétrico de Z_X_iii_VII_X.....	207
<b>Figura 169.</b> Orden ascendente del RMSEr de todos los ortomosaicos.....	211



## RESUMEN

La cartografía digital generada por métodos fotogramétricos, ofrece una información espacial precisa y a detalle de una extensión considerablemente amplia del terreno; dicho procedimiento se denomina proceso fotogramétrico y a su vez cuenta con la aerotriangulación, la misma que utiliza los puntos de control de tierra o puntos de apoyo fotogramétrico (GCP) para densificar y así obtener puntos de amarre con coordenadas del terreno; consecuentemente, del ajuste se generan productos como: modelos digitales de superficie (MDS) y ortofotos, siendo estos últimos evaluados con la exactitud posicional; por tanto, se analizó los métodos de aerotriangulación en los programas fotogramétricos Erdas LPS CORE, Orima y Z/I Imagine, aplicando el concepto de la ecuación de colinealidad y varias funcionalidades, con distribuciones y cantidades diferentes de GCP (13 y 19GCP), utilizando la normativa de exactitud posicional propuesta por el Instituto Geográfico Militar (IGM) y la nueva normativa ASPRS; obteniendo así, que el mejor resultado está vinculado a la cantidad de 19GCP y las teorías de Ackermann (1990) e IGN de Perú (2011) en su distribución; al tener un producto de 64cm precisión al 90% de confianza con la normativa IGM y de 73cm al 95% de confianza con la normativa ASPRS; por tanto, dicha ortofoto se puede utilizar en la generación de cartografía 2D a escala 1:5000, hasta escala 1:3400, cuyo umbral corresponde a la normativa ISO (0.2mm); a su vez, la ortofoto se puede utilizar con fines catastrales, análisis SIG y exploratorios a trabajos de mayor precisión.

### Palabras Clave:

- **AEROTRIANGULACIÓN**
- **CANTIDAD Y DISTRIBUCIÓN PUNTOS DE CONTROL**
- **EXACTITUD POSICIONAL**
- **NORMATIVA ASPRS**
- **ORIMA**

## ABSTRACT

The digital cartography generated by photogrammetric methods, offers a precise spatial information and details of a wide extended extension of the land; this procedure is called the photogrammetric process and in turn it has the triangulation, which uses the land control points or ground control points (GCP) to densify and thus obtain mooring points with terrain coordinates; consequently, digital surface models (MDS) and orthophotos, the latter being evaluated with positional accuracy; Therefore, aerial triangulation methods were analyzed in the Erdas LPS CORE, Orima and Z/I Imagine photogrammetric programs, applying the concept of the collinearity equation and several functionalities, with distributions and different sizes of GCP (13 and 19 GCP), using the precision regulations proposed by the Instituto Geográfico Militar (IGM) and the new ASPRS regulations; obtaining thus, that the best result is linked to the amount of 19GCP and the theories of Ackermann (1990) and IGN of Peru (2011) in its distribution; a 64cm precision product at 90% confidence with the IGM standard and 73cm at 95% confidence with the ASPRS standard; therefore, this spelling can be used in the generation of 2D cartography at a scale of 1: 5000, up to a scale of 1: 3400, whose threshold is of the ISO standard; In turn, the orthophoto can be used for cadastral purposes, GIS and exploratory analyzes to more precise works.

### Keywords:

- **AEROTRIANGULATION**
- **QUANTITY AND DISTRIBUTION CONTROL POINTS**
- **POSITIONAL ACCURACY**
- **NORMATIVE ASPRS**
- **ORIMA**

## CAPITULO I

### 1. GENERALIDADES

En este capítulo se presentará la introducción general al proyecto, estudios relacionados, planteamiento del problema, justificación, descripción del área de estudio, objetivo general, objetivos específicos y metas.

#### 1.1. Introducción

Una adecuada planificación del territorio requiere de información cartográfica actualizada, confiable que ayude en la toma de decisiones; además, dicha información debe contar con lineamientos técnicos y metodológicos acordes a cada uso (CLIRSEN, 2011). La cartografía digital generada por procesos fotogramétricos, ofrece una información espacial precisa y a detalle de una extensión considerablemente amplia del terreno (Bull, Nuñez, & Rodriguez, 2003), reduciendo así costos, espacio de almacenamiento y su manipulación resulta mucho más amigable que las metodologías tradicionales (Vizute, 2012).

Al procedimiento de generar cartografía por medios fotogramétricos se denomina proceso fotogramétrico y a su vez cuenta con un paso denominado aerotriangulación (Hernández L., 2007); por tanto, el avance de la tecnología hace que la aerotriangulación actual permita generar una cantidad significativa de puntos de apoyo en los pares estereoscópicos (Falkner & Morgan, 2002), ayudando así a generar diferentes productos.

Así mismo, la aerotriangulación automática reduce la cantidad de puntos de control de tierra o puntos de apoyo fotogramétrico (GCP), sin un deterioro significativo en las precisiones (Hernández, 2006); sin embargo, los puntos de control de tierra no dejan de ser una parte primordial dentro del proceso fotogramétrico, pues son el apoyo para mejorar los resultados de georreferenciación.

A saber, las ortofotos son un producto del proceso de fotogramétrico que incluye a la aerotriangulación y a su vez está influenciada por la distribución y número de puntos de control fotogramétrico (Soria, 2014). La evaluación de la calidad las ortofotos según Tsarovski (2015), es necesaria para dar una representación precisa de la superficie de la tierra tanto como si se midiera en una representación lineal de un mapa; en dicho sentido, la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2014 adquiere imágenes digitales, con la finalidad de validar las precisiones obtenidas en trabajos con cámara digital y la necesidad de investigar los procesos fotogramétricos digitales (Barragán, 2015).

## **1.2. Estudios relacionados**

Varios autores han desarrollado investigaciones relacionadas con la aerotriangulación y la distribución de puntos de control, utilizando diferentes tecnologías y modelos matemáticos acordes a su época; varias investigaciones se han llevado al cabo en otros países, de las cuales se presenta a continuación:

Hernández L. (2007) en su proyecto “La aerotriangulación con apoyo GPS cinemático en la producción de cartografía de Colombia” indica que *“La aerotriangulación cumple las especificaciones técnicas para escalas pequeñas 1:25000 hasta cartografía urbana escala 1:1000 con apoyo GPS cinemático de doble frecuencia”*.

Con respecto a la calidad de los productos Tsarovski (2015), evaluó la precisión y la calidad de las ortoimágenes (ortofotos) con la norma NSSDA, generadas a partir de un modelo digital del terreno (DTM) aproximado, con el método de aerotriangulación de haces de luz en bloque, de un terreno plano de 240Km<sup>2</sup> con el programa ERDAS Imagine, para generar cartografía 1:2500 con un tamaño de pixel del terreno de 0.30m.

Posteriormente Espinosa (2017), evaluó la aerotriangulación y la distribución de puntos de control para cartografía básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia (IGAC), utilizando la resolución 1392 del IGAG y la “Norma para la exactitud posicional de los datos Geoespaciales digitales versión 2014 propuesta por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) para la calidad de las ortofotos y MDS, con la que recomienda una distribución única para cada proyecto de los puntos de apoyo fotogramétrico.

La importancia de estos estudios según Bostelmann, Breïtkopf y Heipke (2017), en su trabajo “Optimizing the distribution of tie points for the bundle adjustment of HRSC image mosaics” siendo HRSC “High Resolution Stereo Camara”; radica en una distribución homogénea de los puntos de enlace y la correcta consideración del método de ajuste fotogramétrico, que aumente la confiabilidad de las ortofotos y modelos digitales del terreno para lugares donde es imposible la

toma de puntos de control tierra, pues esto se implementa en la exploración extra planetaria en Marte.

### **1.3. Planteamiento del problema**

El ajuste de un bloque fotogramétrico se puede realizar por varios modelos matemáticos; en dicho sentido, la aerotriangulación como un proceso de obtención de coordenadas estimadas por correlación, está influenciada por la cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico, su distribución y su compensación (Hernández L., 2007); así pues, repercute directamente sobre la calidad de los productos como: modelo digital de superficies (MDS) y la ortofoto; otros aspectos que influyen en las características de las ortofotos son: desplazamientos del terreno, zonas débiles de correlación, surcos en edificios y objetos poligonales de altura, no datos (gaps) en MDS, entre otros.

Además, existe desconocimiento del método o métodos adecuados de aerotriangulación para generar un producto (Ortofoto) de calidad, en función de la cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico y su distribución; así mismo, de la evaluación de exactitud posicional en el control de las ortofotos.

Por tanto, se plantea analizar el método o los métodos adecuados de aerotriangulación para mejorar la calidad del producto (Ortofoto) en función de la cantidad de GCP y su distribución con diferentes programas fotogramétricos, como es el caso de ORIMA, LPS Core y Z/I Imagine.

#### **1.4. Justificación e importancia**

Con el afán de generar productos cartográficos de calidad, se emplean diferentes técnicas de generación de la información, entre ellas la aerotriangulación, que con diferentes métodos trata de dar información confiable para la generación de MDS y posteriormente la ortofoto, dando una representación fiel del terreno, con medidas y distancias en una imagen digital. El desempeño de los métodos ha sido estudiado por diferentes autores, pero solo uno ha comparado varios a la vez, (Liba, Järve, & Rand, 2013) y considerando tanto la cantidad como la distribución de los puntos de control fotogramétrico, que es un insumo directo para la metodología; siendo en el contexto local una rama poco desarrollada.

Además, el tema de investigación aporta con el conocimiento de la aplicación de diferentes programas fotogramétricos como: ORIMA, LPS CORE y Z/I Imagine; así también, en la distribución y cantidad de puntos de control fotogramétrico y su influencia sobre la calidad geométrica en el producto (Ortofoto).

El análisis de este proyecto, apoya al desarrollo del conocimiento en la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE, la empresa privada, pública, los profesionales que utilizan o que generan cartografía; además, de los estudiantes en general, que se beneficiarán de este trabajo con los productos alcanzados e instrumentos generados.

## 1.5. Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra al sur de la provincia de Pichincha, dentro de los cantones Quito y Rumiñahui, ilustrados en la Figura 1.



*Figura 1.* Localización geográfica de la zona de estudio.

Las coordenadas de la zona de estudio se presentan en la Tabla 1, cuyas imágenes del proyecto han sido tomadas con cámara digital, teniendo un área aproximadamente 102Km<sup>2</sup>.

*Tabla 1.*

*Coordenadas en sistema WGS 84 UTM, zona 17S de la zona de estudio*

Número	Este [m]	Sur [m]
W1	776974	9,961680
X1	776980	9,968458
Y1	791972	9,961680
Z1	791978	9,968455

Fuente: Google Earth, Pro 6.0 Fecha: 04/10/2017



## **1.6. Objetivos**

### *1.6.1. Objetivo general*

Analizar los métodos de aerotriangulación y número de puntos de control sobre la calidad geométrica de las ortofotos con ERDAS LPS CORE y ORIMA, en un área comprendida entre los cantones de Quito y Rumiñahui tomadas con cámara digital, entre el periodo agosto 2012 y enero 2013.

### *1.6.2. Objetivos específicos*

- Generar ortofotos mediante distintos métodos de aerotriangulación y distribución de puntos de control en Erdas Imagine, Orima y Z/I Imaging.
- Analizar la influencia en el resultado del ajuste fotogramétrico por la cantidad de puntos de control con una distribución pertinente y uniforme, a través de los métodos de aerotriangulación existentes en Erdas Imagine y Orima.
- Calcular el tamaño de la muestra y evaluar la exactitud posicional de las ortofotos generadas por métodos antes descritos.
- Comparar la calidad geométrica entre los productos generados mediante el uso de tecnología GNSS y la estadística resultante.

## **1.7. Metas**

- Una base de datos de los productos generados.

- Nueve reportes de aerotriangulación archivos fotogramétricos.
- Nueve ortofotos con distintos número de puntos y con programas diferentes.
- Treinta puntos de control fotogramétrico y sus respectivas monografías.
- Un manual de manejo del programa Orima.
- Un manual del procesamiento del software Z/I Imaging.
- Un manual de la Aerotriangulación y sus métodos en LPS Core.
- Un informe de calidad de los datos de la exactitud posicional.
- Un artículo científico estructurado.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

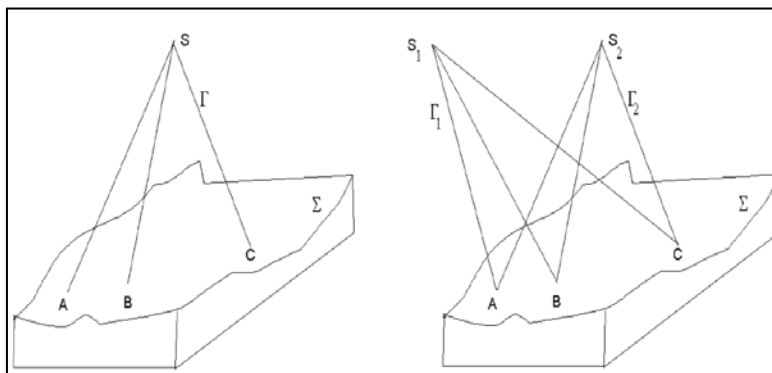
En este capítulo se presenta los conceptos teóricos utilizados en el transcurso del proyecto, distribuidos de la siguiente manera: definición de fotogrametría, proceso fotogramétrico, aerotriangulación, programas de ajuste fotogramétrico, distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico (GCP), control de la exactitud posicional y estadísticos generales.

#### 2.1. Definición de fotogrametría

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) (2018), indica que “La Fotogrametría y detección remota es el arte, la ciencia y la tecnología para obtener información confiable de imágenes sin contacto (...), mediante el registro, la medición, el análisis y la representación”

##### 2.1.1. Problema fundamental de la Fotogrametría

La fotogrametría es la solución al problema de la reconstrucción geométrica de un objeto a partir de una fotografía o imagen aérea entre dos puntos de vista diferentes (Sánchez, 2007) (Ver Figura 2).

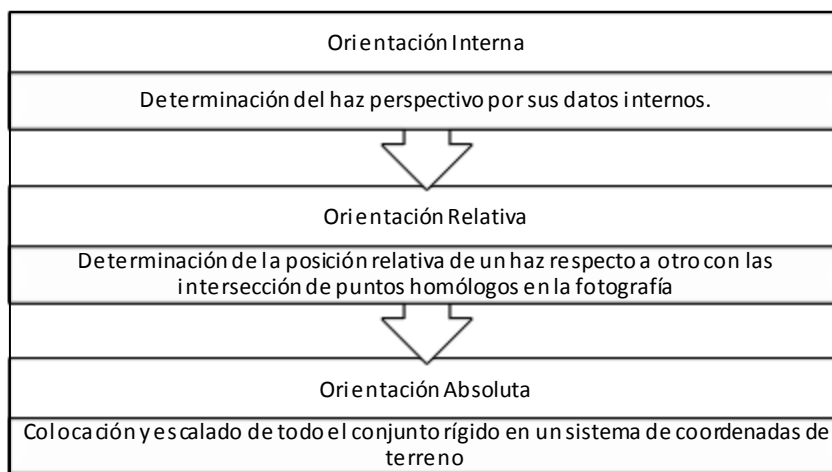


**Figura 2.** Problema fundamental de la fotogrametría.

Fuente: (Sánchez, 2007)

Así mismo, los puntos A, B y C en una superficie  $\Sigma$ , se proyectan en un plano llamado S con un rayo perspectivo  $\Gamma$ , formando semirrectas SA, SB, SC; al introducir un segundo planos  $S_2$ , los mismos puntos A, B y C tendrán un nuevo rayo  $\Gamma_2$ .

Al obtener las coordenadas de los objetos A, B, C la fotogrametría sigue los algunos pasos detallados en la figura 3.



**Figura 3.** Pasos diferenciados en el proceso fotogrametrico.

Fuente: (Sánchez, 2007)

### 2.1.2. Introducción a la fotogrametría digital

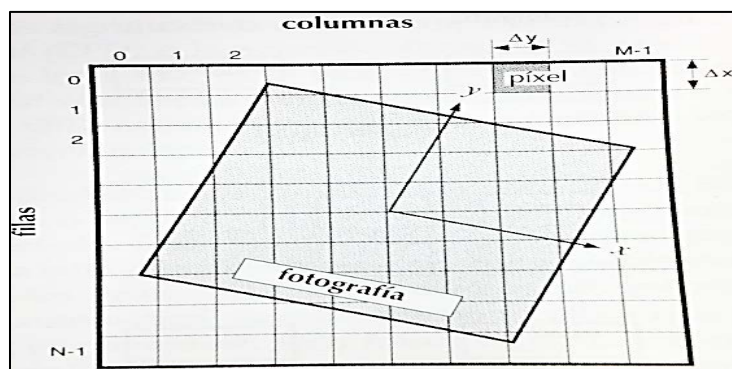
La fotogrametría digital es aplicada a imágenes digitales que son almacenadas y procesadas en un computador. Las fotografías tradicionales pueden ser escaneadas o a su vez capturadas por una cámara digital, siendo así otras imágenes digitales (Leica Geosystems, 2005).

### 2.1.3. Imagen digital

Según Schenk (2002), una imagen digital puede describirse como una función continua  $f(x,y)$  (Ver Ecuación 1); donde, las coordenadas  $x, y$  son variables espaciales y la función valor (amplitud) es la densidad; el elemento discreto  $\Delta x, \Delta y$  es el píxel y  $\Delta g$  es un nivel de gris, denominado informalmente brillo; en definitiva, una imagen digital se puede expresar por:

$$f(\Delta x.i, \Delta y.j, i = 0, \dots, N - 1; j = 0, \dots, M - 1) \quad (\text{Schenk, 2002}) [1]$$

Siendo  $i, j$  la dirección del píxel,  $N$  el número de filas y  $M$  el número de columnas, representados en la figura 4.



**Figura 4.** Sistema de coordenadas de imagen digital.  
Fuente: (Schenk, 2002)

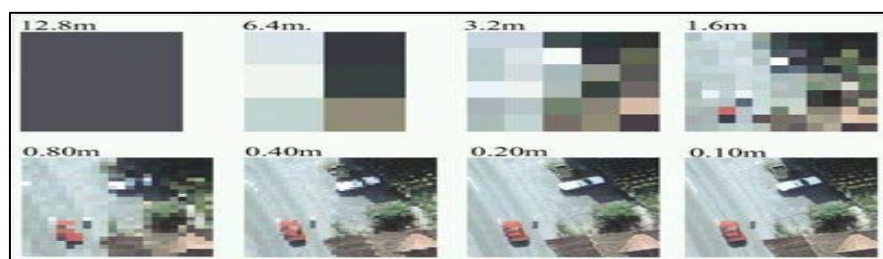
Según Vozmediano (2006), a cada celda se denominada píxel y está caracterizada por la intensidad de tono de gris (resolución radiométrica); además, si la imagen está definida por la combinación de tres bandas del espectro visible: Rojo, Verde y Azul (RGB), se le conoce como color verdadero.

#### 2.1.4. Resolución imagen-sensor

Según Zapata (2003), existen diferentes tipos de resoluciones en las cámara digitales, entre ellas: la resolución espectral (indica el número y ancho de bandas), la resolución temporal (indica la periodicidad en el registro de una imagen), la resolución espacial y la temporal detalladas a continuación:

##### - Resolución espacial

Según Zapata (2003), “la resolución espacial indica la mínima medida que se puede distinguir o apreciar sobre una imagen (ver Figura 5), cuando la resolución espacial de la imagen es mayor, indicará una gran cantidad de detalles, por consiguiente un considerable tamaño de almacenamiento”



**Figura 5.** Nivel de detalle en relación con el tamaño del píxel.

Fuente: (Idainature, 2018)

## - Resolución radiométrica

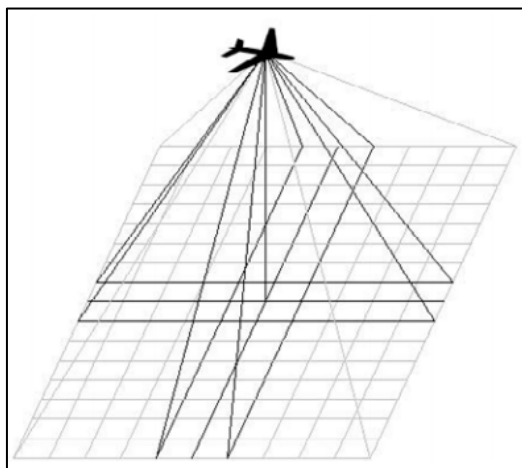
También es conocida como profundidad o contraste radiométrico e indica el número de niveles de gris que son recogidos por cada banda. En imágenes digitales lo más habitual es que contengan 256 niveles por píxel, cuyo valor de 0 corresponde al color negro y el máximo valor de 255 al blanco (Vozmediano, 2006).

### 2.1.5. Cámaras fotogramétricas

Según Sánchez (2007), las cámaras fotogramétricas tienen una serie de lentes perfectamente centrados, cuya finalidad es la de medir objetos; por tanto, es necesario corregir algunas imperfecciones; en el caso de la cámaras digitales actuales, el plano focal de la cámara tradicional es reemplazado por un sensor con células fotoeléctricas muy pequeñas que registran las imágenes cuyas siglas son CCD (Charge Couple Device); por tanto, según Quirós (2014), la disposición de los CCD hace posible que exista dos clases de cámaras fotogramétricas digitales: cámaras matriciales y cámaras lineales.

#### 2.1.5.1. Cámaras matriciales

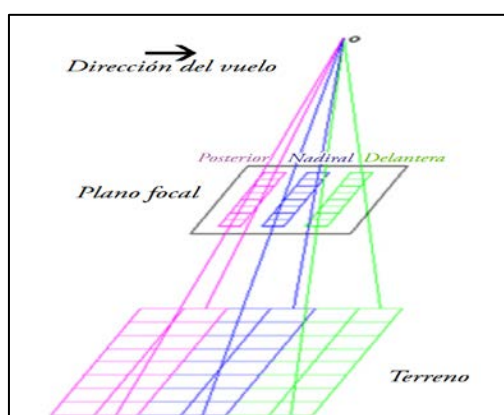
En una cámara matricial las imágenes son de geometría estable y conocida; además, se puede eliminar efectos como la refracción atmosférica, la niebla y es posible trabajar con un programa fotogramétrico directo (Universidad de Oviedo, 2018), un ejemplo de la toma de una cámara matricial se indica en la Figura 6.



**Figura 6.** Ejemplo de toma matricial.  
Fuente: (Quirós, 2014)

#### 2.1.5.2. Cámaras lineales

Según Quirós (2014), la cámara lineal dispone de tres líneas paralelas con sensores trasversales a la dirección del vuelo, cuyas inclinaciones son: delantera, nadiral y posterior (ver Figura 7); esta característica ayuda a que todos los puntos de una imagen se encuentre en tres imágenes.

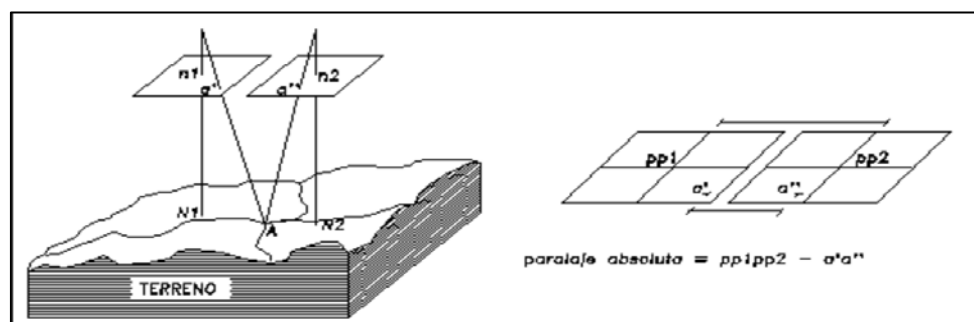


**Figura 7.** Cám. Fotogra. digital lineal.  
Fuente: Quirós, 2014.



### 2.1.6. Paralaje

Según Zapata (2003), el paralaje es “El desplazamiento relativo de objetos inmóviles, desde el punto de vista de un observador en movimiento que visualiza dichos puntos, en vistas diferentes”; en fotogrametría se reemplaza el observador por el avión (cámara), el objeto inmóvil por la superficie de toma y los puntos de vista por las imágenes consecutivas, ver Figura 8.



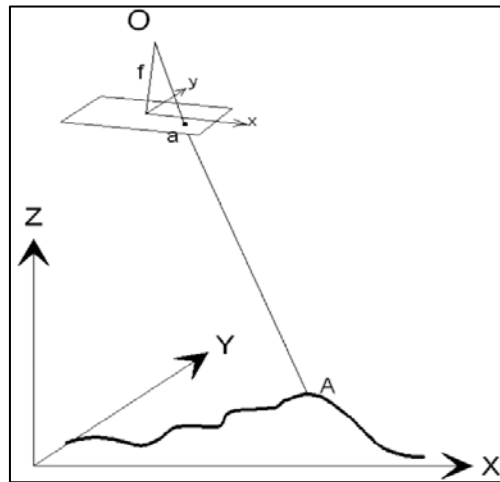
**Figura 8.** Paralaje de un punto.

Fuente: (Gis Ibérica, 2018)

Resumiendo el paralaje de un punto es el desplazamiento relativo de las imágenes de un par estereoscópico consecutivo calculado como: diferencia entre el “eje x” de las dos imágenes consecutivas en un sistema de coordenadas definido por la línea de vuelo y el eje de ordenadas “y” por la perpendicular a esta (Zapata, 2003), tal como indica la Figura 8.

### 2.1.7. Condición de colinealidad y coplanaridad

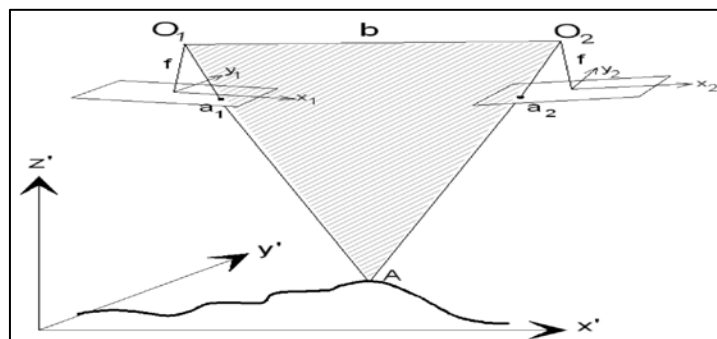
La condición de colinealidad establece: “Un punto sobre el terreno (A), un punto en la imagen (a) y el centro de proyección (O) se encuentran en la misma recta” (ver Figura 9) (García & Ortíz, 2018).



**Figura 9.** Condición de colinealidad.

Fuente: (Quirós, 2014)

Con respecto, a la coplanaridad según García y Ortiz (2018), “En esta condición se cumple que los centros de proyección de dos imágenes contiguas ( $O_1$  y  $O_2$ ), dos puntos de imágenes homólogas ( $a_1$  y  $a_2$ ) y el punto homólogo de estos en el terreno,  $A$  ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ), forman parte del mismo plano”, ver Figura 10.



**Figura 10.** Condición de coplanaridad.

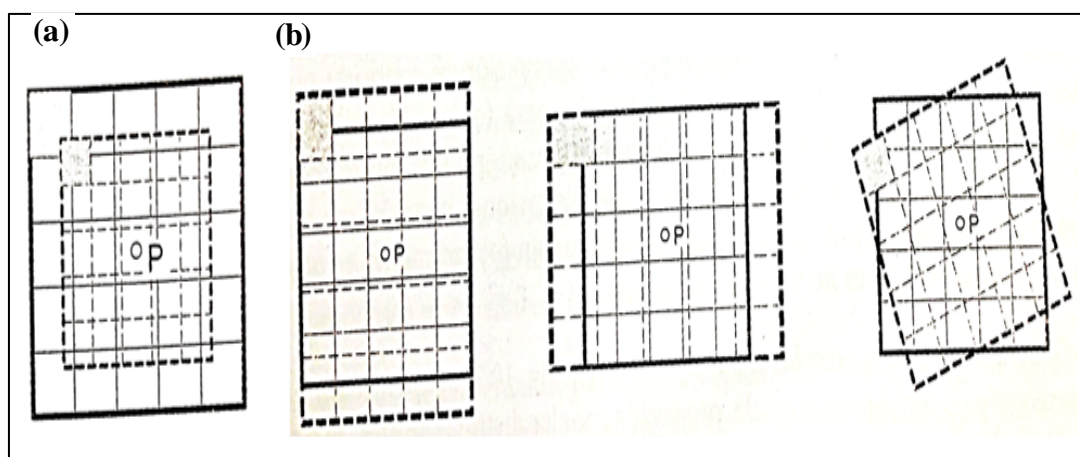
Fuente: (Quirós, 2014)

### 2.1.8. Distorsiones y afectaciones fotogramétricas

Según Schenk (2002), una imagen digital está afectada por el ruido de la señal, el cambio de iluminación, propiedades de reflexión, distorsiones debido al relieve, curvatura de la tierra, entre otros; produciendo diferentes niveles de gris, que repercute en la orientación automática de las imágenes. Algunas distorsiones se explican a continuación:

- **Distorsión geométrica debida a los parámetros de orientación.**

Según Schenk (2002), el tamaño del pixel es afectado por la diferencia de escala, producida de las distintas alturas de vuelo (a); así también, la diferencia de los ángulos de rotación entre los ejes  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  (eje x, eje y, eje z) (b) afecta al tamaño del pixel; dichas afectaciones se representan en la Figura 11.

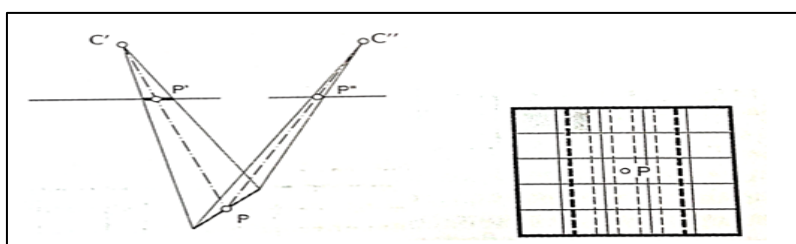


**Figura 11.** Distorsión del pixel por los parámetros de orientación.

Fuente: (Schenk, 2002)

- **Distorsión geométrica causada por la inclinación**

Según Schenk (2002), la distorsión geométrica por inclinación, se produce debido al declive del terreno, a pesar de que la toma se realice completamente en vertical, la reducción o acortamiento puede llegar a ser tan grande que la superficie del objeto se reduce a una línea (Ver figura 12).

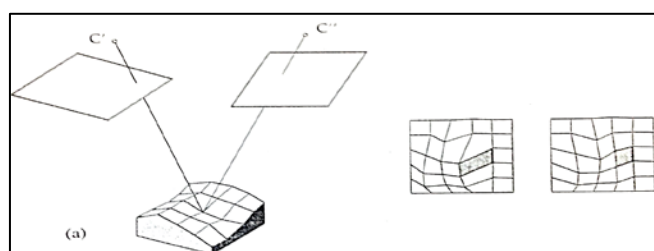


**Figura 12.** Efecto de la toma en una superficie inclinada.

Fuente: (Schenk, 2002).

- **Distorsión geométrica debido al relieve**

Según Schenk (2002) y Sánchez (2007), indican que la distorsión debido al relieve se debe a la topografía del terreno, como zonas montañosas; a pesar de que la toma sea verticalmente al terreno y cuyo desplazamiento en la imagen siempre se deforma radialmente respecto de su centro, (ver Figura 13).

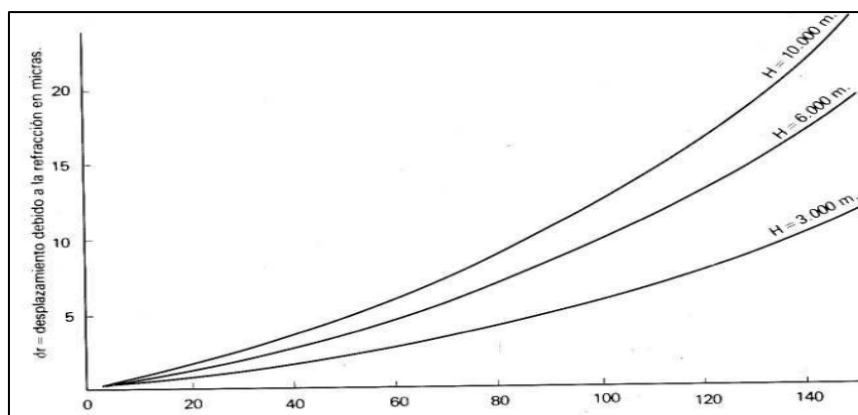


**Figura 13.** Efecto del relieve sobre las imágenes.

Fuente: (Schenk, 2002)

### - Refracción atmosférica

Según Lerma (2002), la densidad de la atmósfera y el índice de refracción disminuyen a medida que aumenta la altitud, en consecuencia los rayos de luz no viajan de forma rectilínea, sino curvados según la ley de Snell; por tanto, las coordenadas de imagen deben corregirse para obtener su posición real. En la Figura 14 se ilustra el desplazamiento en el plano de la imagen, causado por la refracción atmosférica.

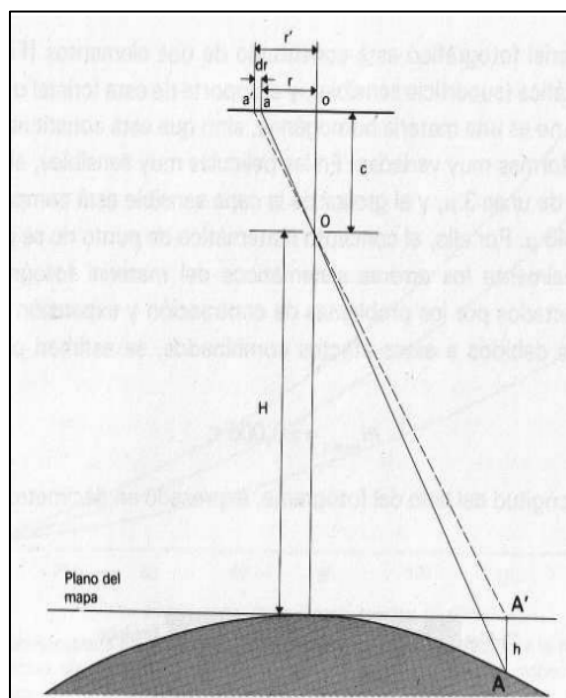


**Figura 14.** Efecto de la refracción atmosférica.

Fuente: (Orellana, 2006)

### - Curvatura terrestre

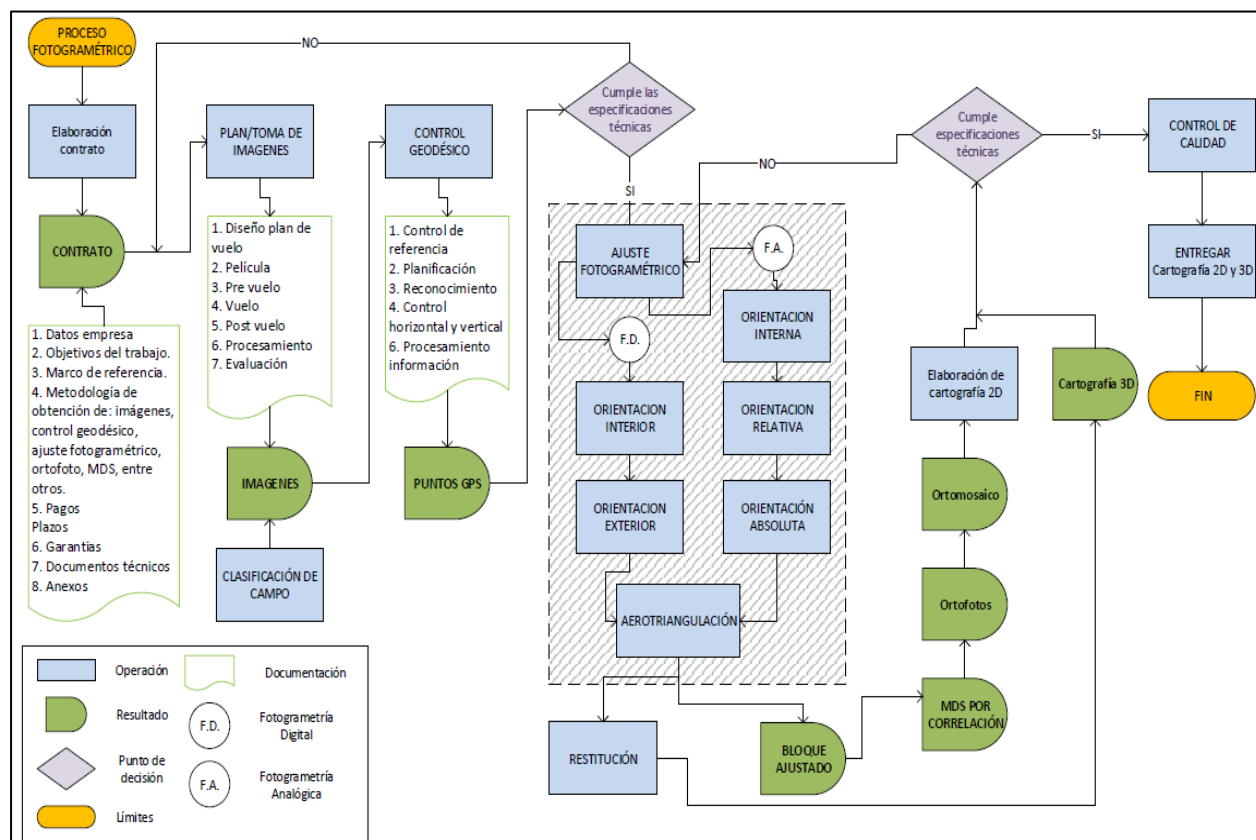
Según Lerma (2002), la corrección por curvatura terrestre es un problema de coordenadas del terreno, pues la imagen trabaja en un sistema de coordenadas tridimensional cartesiano y en cartografía se suelen usar sistemas de proyección con referencias altimétricas al nivel medio del mar, un ejemplo de curvatura se representa en la Figura 15.



**Figura 15.** Efecto de la curvatura terrestre  
Fuente: (Orellana, 2006)

## 2.2. Proceso fotogramétrico

El proceso fotogramétrico es una etapa de la generación de cartografía y a su vez, es un macro proceso que incluye la toma de imágenes, toma del control terrestre, ajuste fotogramétrico y la restitución (IGM, 2013); así mismo, la ejecución de un proyecto fotogramétrico requiere de planteamientos metodológicos, que estarán plasmados en un documento llamado contrato (Sato & Silva, 2004); otros pasos del proceso se detallan en la Figura 16.



**Figura 16.** Proceso fotogramétrico

Fuente: Adaptado de (Delgado, 2010) y (Sandoval, 2004)

Algunas de las fases del proceso fotogramétrico se detallan a continuación.

### 2.2.1. Contrato

Según la RAE, 2018: “Un contrato es un convenio, oral o escrito, entre partes que se obligan sobre materia o cosa determinada, y a cuyo cumplimiento pueden ser obligatorio”. La estructura depende de la entidad emisora y los requerimientos del cliente; algunos de sus elementos se detallan en la tabla 2.

**Tabla 2.***Elementos de un contrato fotogramétrico*

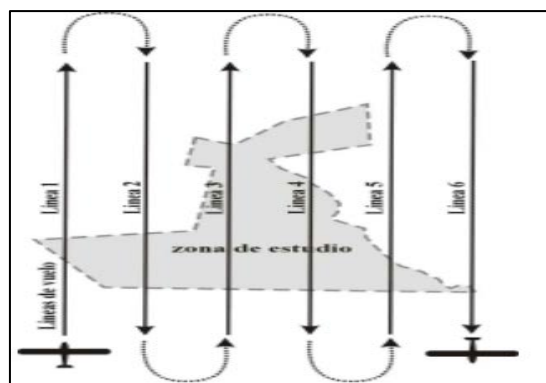
No	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
1.	Nombre de quien realiza el proyecto	Es el nombre de una empresa o de una persona natural que representa legalmente al proyecto.
2.	Objetivos del proyecto	Es la actividad a desempeñar, así como el lugar y el fin.
3.	Marco de referencia	Estará incluido el área a cubrir; la escala, tanto de la imagen, como del levantamiento; el sistema de referencia a utilizar; sistema cartográfico de representación; equidistancia entre curvas de nivel; elementos a representar; formatos; precisiones altimétricas y planimétricos (IGM, 2005).
4.	Planteamiento Metodológico	Indica todos los detalles metodológicos, técnicos, instrumentales, etc. que serán usados para el trabajo.
4.1.	Obtención de la fotografía aérea	Incluye el diseño plan de vuelo, almacenamiento de las imágenes, un pre vuelo, vuelo, post vuelo, procesamiento, evaluación y obtención de productos.
4.2.	Control geodésico	Indica el control de referencia, planificación de rastreo, control horizontal - vertical y el procesamiento de la información.
4.3.	Clasificación de campo	Todos los detalles discernibles en la fotografía de acuerdo a las normas y especificaciones vigentes en conformidad de la escala a restituir. Ejemplo: Elementos hidrográficos, avenidas, calles parques, infraestructura, uso de suelo en áreas no construidas, etc. (IGM, 2005)
4.4.	Fotogrametría	Incluye la realización de las diferentes orientaciones; restitución; revisión fotogramétrica; edición y simbolización de cartografía.
4.5.	Productos fotogramétricos	Señala los productos directos del proyecto ajustado por el método planificado, así como los productos indirectos que son: el MDE y la ortofoto (IGM, 2008).
5.	Valor de los trabajos	Incluye el valor del proyecto así como las formas de pago, primeros valores a liquidar del proyecto y el costo de cada proceso.
6.	Plazos	Representa el tiempo que durará el proyecto, tomando en cuenta la planificación de toma de imágenes, control terrestre, procesamiento de la información y generación de resultados (IGM, 2008).
7.	Garantía	La entidad que asume la responsabilidad del proyecto y compromiso de seguir la metodología planteada.
8.	Productos y documentos técnicos	Detalla los productos, formatos, entregables e informes de cada proceso realizado, entre otros
9.	Anexos	Puede ser el cronograma de actividades, mapas base, entre otros.

Fuente: Adaptado de (IGM, 2008) e (IGM, 2005).



### 2.2.2. Plan de vuelo

Una vez realizado el acuerdo entre el beneficiario y el productor del contrato en un proyecto fotogramétrico, se inicia con la planeación de la toma de la fotografía; donde, se requiere de información como: el uso de las imágenes, la escala del producto, las precisiones y a su vez se considera la altura de vuelo, base en el aire, separación entre líneas de vuelo, entre otras (Reuter, 2002); representadas en la Figura 17.



**Figura 17.** Plan de vuelo

Fuente: (Reuter, 2002)

Además, un plan de vuelo tiene, entre otras cosas, un bosquejo de lo que será la toma de las imágenes, la cantidad de imágenes, escala de la foto, altura del terreno, límites de toma, cota máxima, cota mínima, distancia entre fotos, número de líneas de vuelo, reportes metodológicos de la toma, sistema de referencia para el apoyo GPS, el método a utilizar, recubrimiento longitudinal, recubrimiento transversal (Ver tabla 3.), entre otras (MAGAP, 2008).

**Tabla 3.***Recubrimiento longitudinal y transversal*

<i>Tipo de terreno</i>	<b>Traslapo longitudinal</b>	<b>Traslapo transversal</b>
<b>Plano</b>	60% +/- 10%	20% +/- 10%
<b>Ondulado</b>	65% +/- 10%	25% +/- 10%
<b>Montañoso</b>	70% +/- 10%	30% +/- 10%

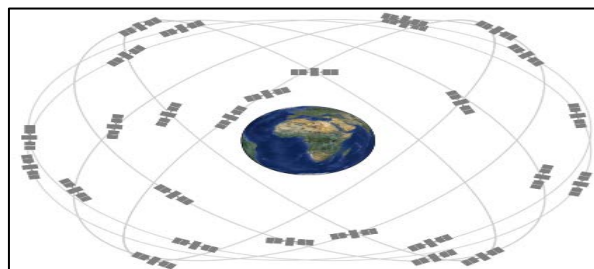
Fuente: (MAGAP, 2008)

*2.2.3. Control geodésico o control terrestre*

El control geodésico o control terrestre, tiene por objeto “Brindar el apoyo terrestre necesario para realizar la aerotriangulación y ajuste de los bloques de fotografía aérea; en base a éste se realizará posteriormente la generación del modelo digital del terreno, insumo necesario para la elaboración de las ortofotos” (MAGAP, 2008); además, el control terrestre se puede determinar usando procedimientos de topografía como: una red básica obtenida de triangulaciones, trilateraciones, intersecciones o poligonales de precisión (Obregón, 2007); así mismo, se puede emplear tecnología como “Global Navigation Satellite System (GNSS)”, en la obtención de las coordenadas de los centros de las imágenes y los puntos de control. Las consideraciones de los GNSS tienen algunas características vistas a continuación:

*2.2.3.1. Generalidades GNSS*

“Sistema global de navegación por satélite (GNSS) se refiere a un conjunto de satélites que proporcionan señales desde el espacio, que transmite datos de posicionamiento y tiempo” (ver Figura 18) (EGNOS, 2017).



**Figura 18.** Constelación de satélites

Fuente: (GPS.gov, 2018)

### 2.2.3.2. Estaciones de monitoreo continuo (EPEC)

Según el Instituto Geográfico Militar (2013), una estación de monitoreo continuo es un conjunto de infraestructura física y técnica, que se encuentra fija y recoge los datos de varios GNSS a la vez del punto en el que está ubicado; y en conjunto con otros equipos distribuidos a nivel nacional, constituye la Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) (Ver Figura 19).

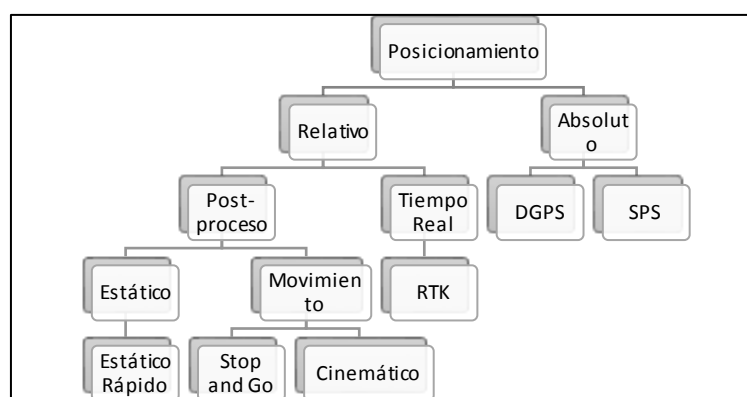


**Figura 19.** Distribución estaciones REGME

Fuente: (IGM, 2018)

### 2.2.3.3. Métodos de posicionamiento GNSS

Según González (2015), existen diferentes criterios para clasificar los métodos de posicionamiento, entre ellos: según el sistema de referencia, movimiento del receptor, momento de obtención de las coordenadas, entre otras. La clasificación más usada se presenta en la Figura 20.



**Figura 20.** Tipos de posicionamiento  
Fuente: Modificado de (Universidad de Cádiz, 2009)

#### – Posicionamiento absoluto

“Se calcula la posición de un punto utilizando las medidas de pseudodistancias por código (C/A, L2C o P) con un solo receptor. La precisión del método está bajo los 10 metros” (González, 2015).

#### – Posicionamiento relativo

Los autores Berrocoso et al. (2009) y la Universidad de Sonora (2008), indican que en el posicionamiento relativo se mantiene una base fija rastreando, al mismo tiempo uno o varios receptores toman las coordenadas de los puntos, emitidas por los satélites en un lapso de tiempo

determinado; las coordenadas de la base son pre establecidas y las del levantamiento requiere un post proceso (Citado en Barragán, 2015, p. 7).

– **Método estático**

Según Farjas (2006), el método estático también es conocido como método estático relativo estándar, que proporciona precisiones de  $5\text{mm} + 1\text{ppm}$ , en la que dos o más receptores se estacionan durante un periodo de tiempo (mínimo media hora) y generalmente se utiliza para medir distancias mayores a 20 km. Este método se aplica en: redes geodésicas de grandes distancias, redes nacionales y continentales, seguimiento de movimientos tectónicos y redes de gran precisión.

– **Método estático rápido**

Es una variante del método anterior que reduce los tiempos de observación, generalmente de 5 a 10 minutos por estación, manteniendo las precisiones anteriores, pero la distancia de aplicación es de menos de 20 kilómetros (Farjas, 2006); este método es ideal para redes topográficas locales, redes de control y puntos de apoyo fotogramétrico.

*2.2.3.4. Puntos de apoyo fotogramétrico (GCP)*

Ground Control Point, por sus siglas en inglés GCP, se denomina a los puntos con coordenadas del terreno y son usados con varios fines, entre ellos, apoyar al ajuste fotogramétrico en la fase de orientación absoluta (Pérez J. , 2001); además, dichos puntos pueden ser usados en la verificación dentro del proceso de exactitud posicional por lo que deben aparecer claramente en las imágenes

(Ver Figura 21.), dicho proceso es conocido como foto identificación y la obtención usualmente es con métodos GNSS (Zapata, 2003); además, la cantidad y distribución de dichos puntos puede variar; tal y como se indicará en el apartado 2.5 “Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico (GCP)”.



**Figura 21.** Ejemplo de punto de control (GCP).

Fuente: Autor

#### 2.2.4. Ajuste fotogramétrico

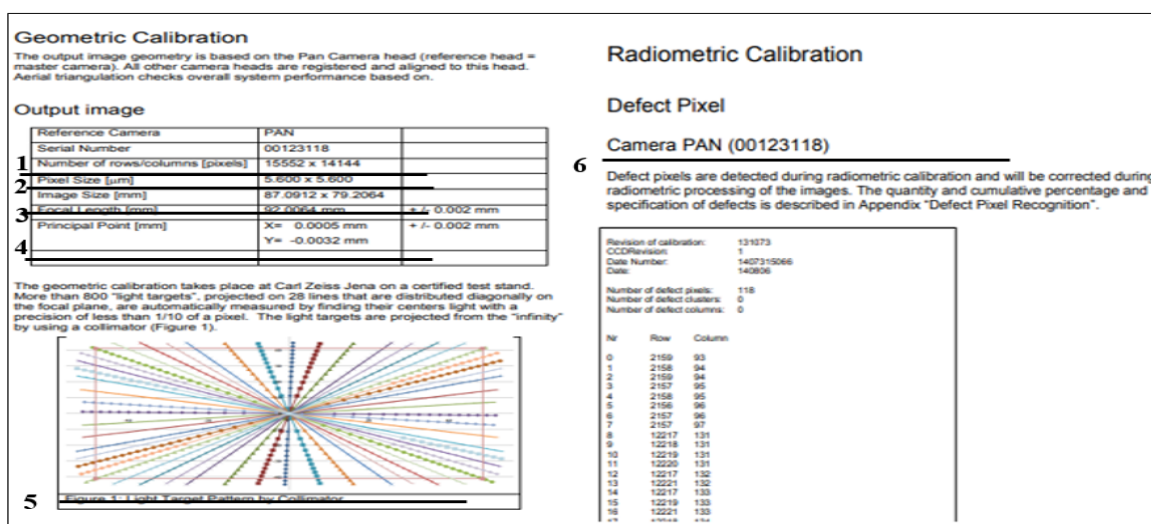
Según Schenk (2005), el ajuste fotogramétrico es la aplicación de los conceptos matemáticos para la reconstrucción de la geometría de los objetos, cuya precisión geométrica depende en gran medida de la similitud del haz de imágenes que ingresan durante el momento de la toma. Para un mismo procedimiento, pueden existir varios modelos matemáticos que se diferencian en qué tan cerca describen los procesos físicos. En este capítulo se describen estos procedimientos y los modelos matemáticos, excepto la aerotriangulación que se tratará a detalle en el apartado 2.3 “Aerotriangulación”.

Una vez definidos los objetivos del proyecto, la toma de imágenes y tomados los GCPs de apoyo terrestre, normalmente se procede a ajustar del proyecto; por tanto, se requiere de datos de

calibración de la cámara para realizar la orientación interior y posteriormente las siguientes orientaciones (Schenk, 2002); al mismo tiempo, se debe considerar el tipo de cámara a usar según su características (Ver apartado 2.1.5), a continuación una breve descripción del contenido de un certificado de calibración de cámara digital.

### - Certificado de calibración de cámara digital

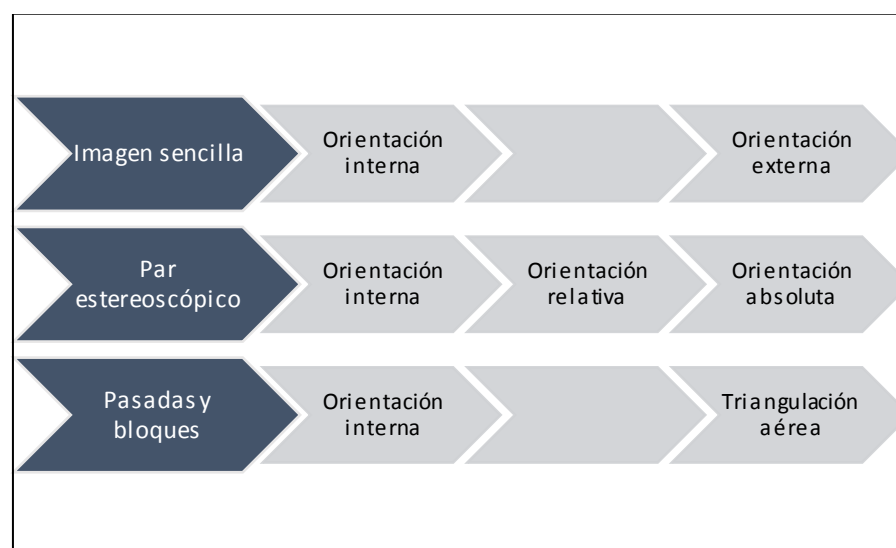
Según Crouse et al. (2018), el certificado de calibración es un documento con las constantes de calibración, con las cuales se evalúa la calidad de la toma de una cámara sobre un objetivo, un ejemplo es este certificado se ilustra en la Figura 22, cuyos elementos son: número de filas y columnas con unidad de píxel (1), tamaño del píxel en  $\mu\text{m}$  de la cámara (2), distancia focal (3), coordenadas del punto principal de autocolimación (4), calibración geométrica de los ases de luz (5), defectos de los píxeles en la calibración radiométrica (6), entre otros.



**Figura 22.** Ejemplo de Certificado de calibración

Fuente: (Crouse et al., 2018)

A continuación se detallan cada una de las orientaciones que participan en el ajuste fotogramétrico según Schenk (2002) (ver Figura 23.).



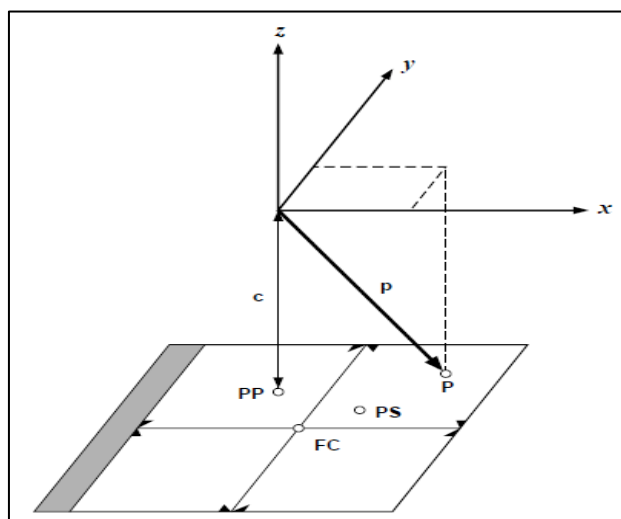
**Figura 23.** Cadena de automatización para diferentes imágenes

Fuente: Adaptado de (Schenk, 2002).

### 2.2.5. Orientación interna

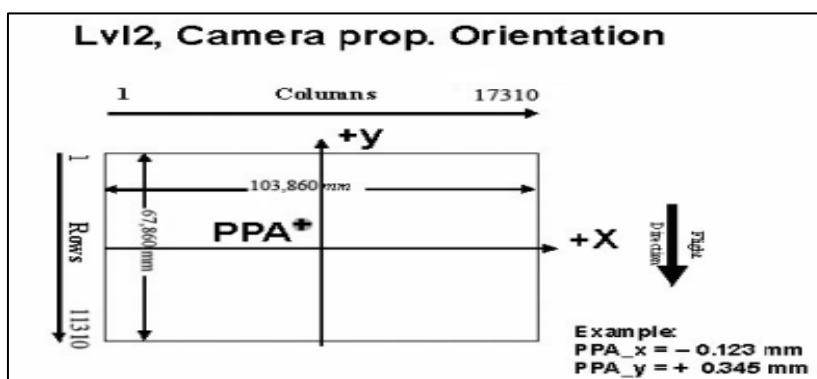
Lerma (2002), define que la orientación interna es “La transformación entre el sistema de coordenadas píxel y el sistema de coordenadas transformadas (con origen en el punto principal) que implica una traslación del sistema de coordenadas”(Citado en Angulo, 2014, p. 27), los elementos de un sistema de coordenadas imagen – cámara son los siguientes: centro fiducial (FC), punto principal (PP), punto de simetría (PS), distancia focal ( $c$ ) y vector de la imagen ( $p$ ), (ver Figura 24.).





**Figura 24.** Sistema imagen-cámara  
Fuente: (Leica Geosystems, 2005).

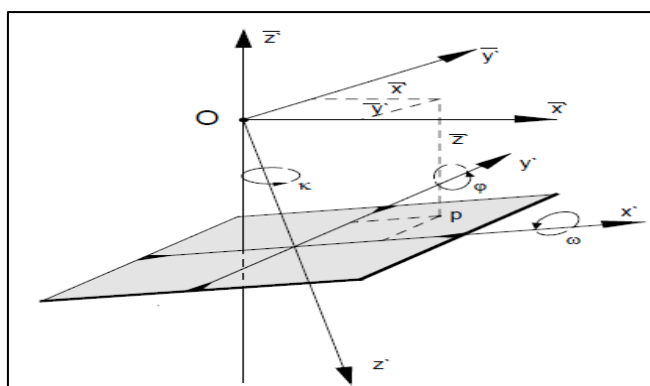
También se puede entender la orientación interna como: “La reconstrucción de la geometría interna de la cámara en el momento de captura de los datos, teniendo en cuenta las variables de la imagen desde la perspectiva de una cámara aérea” (Leica Geosystems, 2005). En las imágenes tomadas con cámaras digitales, no se encuentran las marcas fiduciales y los parámetros de orientación son determinados con el certificado de calibración (ver Figura 25) (Quirós, 2014).



**Figura 25.** Orientación interna de las imágenes digitales.  
Fuente: (Vexcel Imaging, 2010).

### 2.2.6. Orientación exterior

Según Coelho y Nunes (2007), la orientación exterior es “La obtención de la posición y altitud de la cámara al momento de la toma de la imagen, en relación con el objeto en su entorno de referencia”. Una imagen se encuentra orientada exteriormente cuando se conocen los seis parámetros de orientación: coordenadas espacio-objeto para el centro de perspectiva ( $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ) y ángulos de rotación del sensor ( $\phi, \omega, \kappa$ ). (Citado en Angulo, 2014, p. 28) (Ver Figura 26).



**Figura 26.** Concepto de orientación exterior

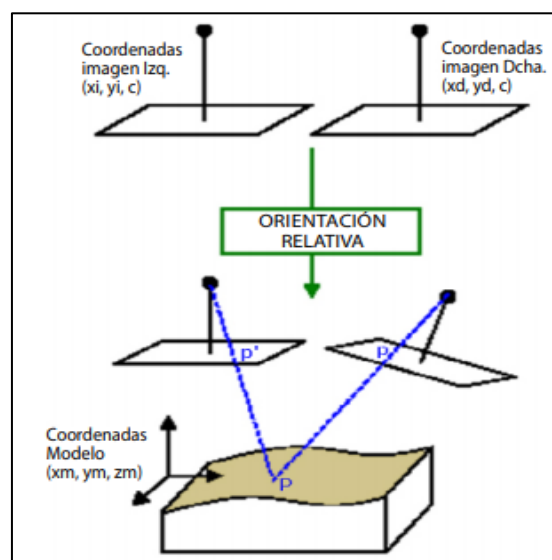
Fuente: Tomado de (Coelho & Nunes, 2007)

Dicho de otra manera, la orientación exterior implica la orientación del sensor con los parámetros de donde se tomó la imagen ( $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ) y aquellos que dan la inclinación de la cámara ( $\phi, \omega, \kappa$ ); según Cheli (2011), “esta georreferenciación del espacio-imagen es conocida como orientación externa del haz (resección espacial)” (p. 92).

En la fotogrametría analógica a este proceso se divide en dos subprocesos llamados orientación relativa y orientación absoluta (Coelho & Nunes, 2007).

### 2.2.6.1. Orientación relativa

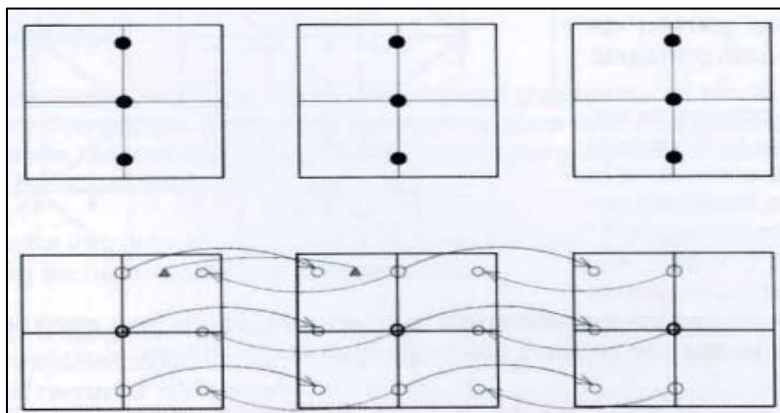
La orientación relativa orienta cada objeto de una imagen con su homólogo posterior, reconstruyendo la posición exacta de un par estereoscópico (Coelho & Nunes, 2007). Para la formación del modelo, es necesario medir una serie de puntos homólogos entre imágenes (Puntos de paralaje o puntos von Gruber) y seguidamente calcular los cinco parámetros de orientación ( $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ) (Schenk, 2002). Al terminar de identificar dichos puntos se procede a reconstruir los haces mediante la condición de coplanaridad, (ver Figura 27) (Quirós, 2014).



**Figura 27.** Orientación relativa  
Fuente: (Quirós, 2014)

### 2.2.6.2. Puntos de Von Gruber

Son puntos de paso entre modelos estereoscópicos, mencionados en 1968 por Von Gruber en su trabajo llamado “Ferienkurs in Photogrammetrie”; sirven para conectar imágenes consecutivas al medir al menos seis puntos bien distribuidos por el modelo (Springer, 2009) (ver Figura 28).



**Figura 28.** Distribución y colocación de puntos Von Gruber  
Fuente: Tomado de (Cheli, 2011).

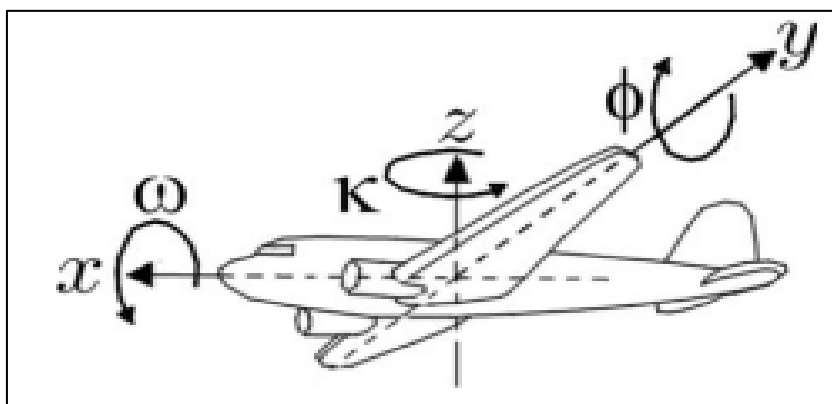
La distribución de los puntos sugiere colocar dos en la parte superior, dos en la parte central y dos en la parte inferior del modelo; a partir del segundo modelo, la imagen tendrá nueve puntos de paso.

### 2.2.6.3. Orientación absoluta

Sánchez (2007), la orientación absoluta es la colocación, nivelación y escalamiento del modelo con respecto al terreno, determinado por siete parámetros, resultantes de las siete incógnitas que se resuelven con ayuda de los puntos de control, medidos en el terreno e identificables en los fotogramas y según Coelho y Nunes (2007), los parámetros se determinan de la siguiente manera:

“ $X_0$ ,  $Y_0$  y  $Z_0$  representan la posición del centro de perspectiva en los ejes X, Y y Z del sistema de coordenadas del espacio-objeto. Los ángulos  $(\phi, \omega, \kappa)$ , a su vez, son rotaciones del sistema local de coordenadas (cámara).  $\omega$  (omega) representa la rotación del eje x en relación a X,  $\phi$  (phi) representa la rotación del eje y en relación a Y; estos ángulos deben ser pequeños, no

debiendo sobrepasar  $5^\circ$  en valor absoluto, en el caso de fotografías perfectamente verticales; por último,  $K$  (kappa) representa la rotación del eje  $z$  con respecto a  $Z$ , dichos ángulos son medidos en sentido anti horario” (p. 108), ver Figura 29.



**Figura 29.** Parámetros de altitud de un sensor fotogramétrico

Fuente: Tomado de (Coelho & Nunes, 2007)

### 2.3. Aerotriangulación

También es conocida como triangulación aérea, tiene sus orígenes con el invento de la marca flotante por F. Stolze (1892) y la implementación de la fotogrametría estereoscópica por C. Pulfrich en 1901, que fue la base de la fotogrametría analógica; no obstante, los costos de producción y el uso de instrumentos ópticos-mecánicos, hacían del proceso de triangulación aérea algo engorroso y demorado (Cliver, 1997).

El apareamiento de los computadores supuso la automatización de la fotogrametría, entre algunos de sus procesos fue la aerotriangulación, pues mejoraba sustancialmente la medición óptica

y el tiempo en los cálculos de los modelos para densificar puntos; esta etapa es conocida como fotogrametría analítica (Lerma, 2002).

El paso de fotogramas a imágenes digitales hizo que los restituidores analíticos sean remplazados por las estaciones fotogramétricas digitales (EFD), pues su desempeño era considerablemente superior; al mismo tiempo, la tecnología de posicionamiento GPS, cámaras con sensores electrónicos, entre otros avances, hizo el auge de la fotogrametría, denominada fotogrametría digital (Lerma, 2002).

La aerotriangulación es una buena demostración del gran potencial de una EFD, que ha automatizado varios de sus procesos, haciendo que la misma sea aceptada y demostrada; sin embargo, puede mejorar su rendimiento y fiabilidad al implementar diversos modelos matemáticos (Schenk, 2002). Con tales antecedentes se presenta a continuación varias definiciones y modelos matemáticos que han sido utilizados a través del tiempo.

### *2.3.1. Definición de aerotriangulación*

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría (1980), “La triangulación aérea es un proceso para la extensión del control horizontal y/o vertical, mediante las mediciones de ángulos y distancias en fotografías superpuestas, utilizando principios de perspectiva de las fotografías”.

Con el paso de los años, el término aerotriangulación o triangulación aérea se hizo más común y se refiere a la formación de triángulos en el espacio, que en su intersección espacial forman puntos; la cantidad de triángulos hace que sea un método de densificación de puntos (Lerma,

2002); así mismo, estos puntos se conocen como puntos de unión o de paso, que al estar medidos en cada foto, se asocian con los puntos de control y sus coordenadas pueden ser determinadas con técnicas fotogramétricas (Leica Geosystems, 2005).

En definitiva según Hernández L. (2007) la aerotriangulación es un método que pertenece al proceso fotogramétrico y se emplea en la determinación de coordenadas del terreno sobre fotografías aéreas o imágenes digitales, con el mínimo de trabajo de campo, aprovechando sus propiedades geométricas; estas mediciones se realizan con equipos fotogramétricos digitales que permiten manejar un enorme número de datos, obteniendo una buena precisión.

### *2.3.2. Usos de la aerotriangulación*

Según Otero y Sevilla (1989), la aplicación más relevante de la aerotriangulación es la de aumentar el número de puntos de control y de apoyo, para su uso en diversas aplicaciones fotogramétricas como: el desarrollo de modelos digitales del terreno, estudio de deformaciones de estructuras artificiales y la densificación de redes geodésicas de orden inferior, entre otras.

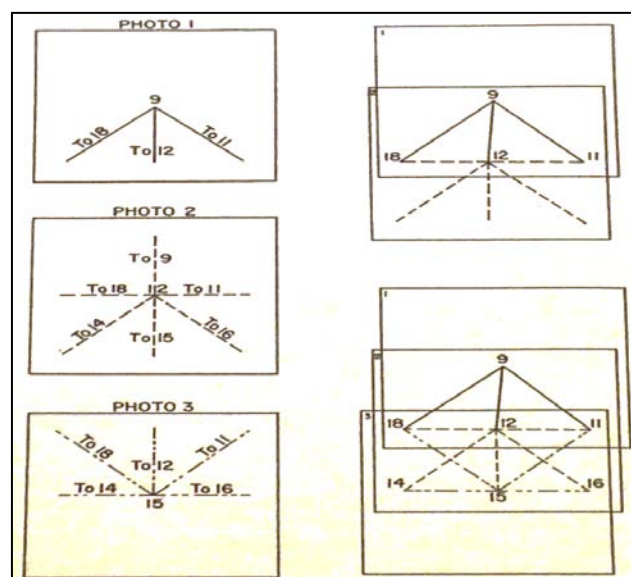
### *2.3.3. Clasificaciones de la Aerotriangulación*

La evolución de la aerotriangulación ha hecho que tenga varias clasificaciones, considerando criterios como: instrumentación, apoyo GPS, tipo de bloque, cantidad de fotos/imágenes, ecuaciones, resolución de ecuaciones, entre otros (Cheli, 2011); varias clasificaciones se presentan a continuación:

### 2.3.3.1. Clasificación de la A. según la Sociedad Americana de Fotogrametría (1980)

Por su traducción al español de “American Society of Photogrammetry (1980)”, indica que los primeros métodos de aerotriangulación usaban plantillas e instrumentos analógicos para la aerotriangulación la cual se clasificaba de la siguiente manera:

- A. **Triangulación Radial.**- Es un método gráfico para establecer coordenadas del terreno (ver Figura 30), que utiliza la fotografía aérea como la unidad; se basa en las diferencias de elevación del terreno, y el cambio de escala que producen los desplazamientos radiales de las imágenes desde el centro de perspectiva fotográfico (American Society of Photogrammetry, 1980).



**Figura 30.** Triangulación radial.

Fuente: (American Society of Photogrammetry, 1980)



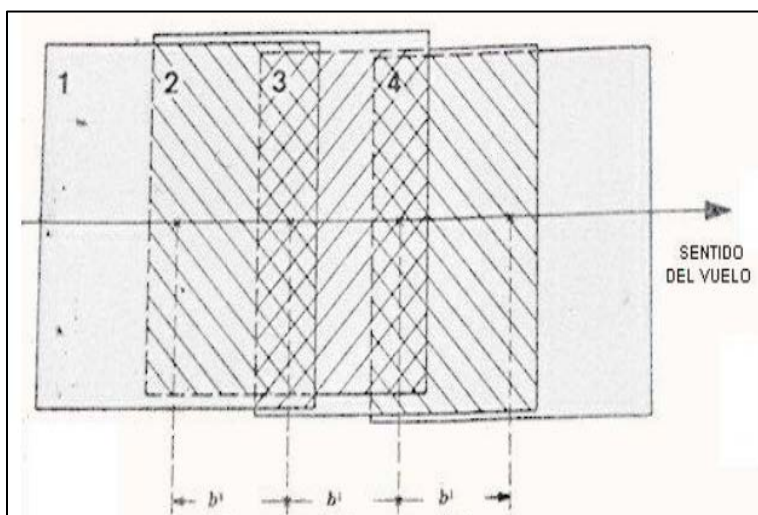
B. **Triangulación Analítica.**- Es la transición de aparatos ópticos mecánicos como apoyo al operador a realizar su trabajo; a su vez, se subdivide según las siguientes consideraciones: procedimientos de triangulación, tipo de ecuaciones de condición y el método de resolver las ecuaciones de condición (American Society of Photogrammetry, 1980).

C. **Stereotriangulación.**-Según la American Society of Photogrammetry (1980), la stereotriangulación considera solo la instrumentación en una aerotriangulación analítica.

#### 2.3.3.2. *Clasificación de la A. según Lerma (1999)*

El autor consideraba estrictamente los procedimientos matemáticos en su clasificación; por tanto, se divide en: modelos independientes y haces de rayos; en el modelo independiente considera por separado el ajuste planimétrico (X, Y) y altimétrico (Z), cuya combinación se lo denomina ajuste tridimensional (Lerma, 1999), definidos a continuación:

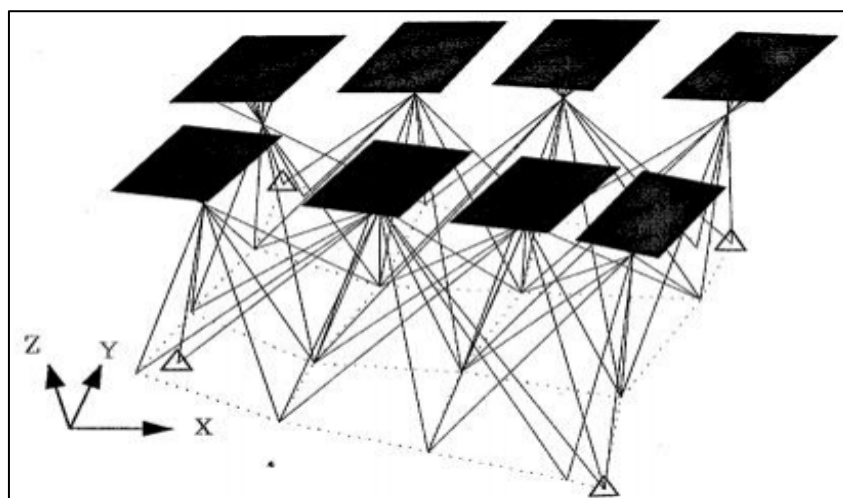
A. **Modelos independientes.**- Considera como unidad de trabajo el modelo estereoscópico, formado por dos a tres imágenes (ver Figura 31) y las coordenadas de los puntos de paso se combinan para compensar el bloque. Matemáticamente pueden ser sistemas libres o ligados; es decir, puntos de apoyo matemáticamente perfectos y exentos de error o con cierto nivel de error; por tanto, rectificables (Lerma, 1999).



**Figura 31.** Modelos independientes.

Fuente: (Cruz, 2011)

B. **Método de haces de rayos.-** Considera el rayo (óptico) espacial como una unidad de trabajo, cuyo sistema de ecuaciones utiliza la condición de colinealidad, (Lerma, 1999), ver Figura 32.



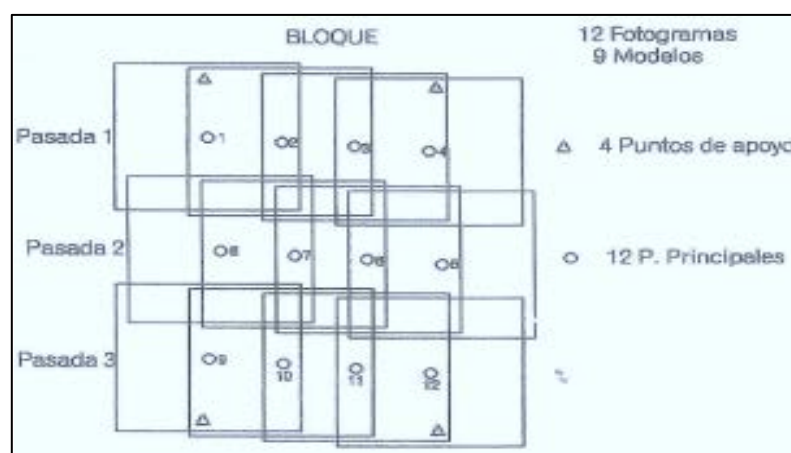
**Figura 32.** Haces de luz de un bloque fotogramétrico.

Fuente: (De la Torre, 2018)

### 2.3.3.3. Clasificación de la A. según Pérez J. (2001)

El autor da varios criterios para clasificar la aerotriangulación que se detallan a continuación:

A. **Respecto a la unidad de trabajo.-** Considera características como: modelos aislados, pasada simple, bloque de pasadas (ver Figura 33), y bloque de secciones.



**Figura 33.** Ejemplo Aerotriangulación por pasadas

Fuente: (De la Torre, 2018)

B. **Respecto al control terrestre.-** Considera la clasificación según la utilización del instrumental apropiado; tal es el caso del uso de otras tecnologías como los sistemas GNSS; por tanto su clasificación se debe a con control geodésico y sin control geodésico.

C. **Respecto al modo del operador.-** considera una clasificación planimétrica y una espacial; donde, la planimétrica se la subdivide en: gráfica, numérica y mecánica; la espacial se subdivide en: analógica (por pasadas o aeropoligonación), Semi analítica (modelos independientes) y analítica (secuencial o simultánea) (Pérez J. , 2001).

#### 2.3.3.4. Clasificación de la A. según Sánchez (2007)

Sánchez (2007), clasifica la aerotriangulación según el método de haces y modelos independientes, definiéndolos de la siguiente manera: modelos independientes son la transferencia de los elementos de orientación absoluta de un modelo a través de la pasada y en el método de haces resuelve con las ecuaciones de colinealidad en todo un bloque fotogramétrico (Sánchez, 2007), cuyos conceptos se detallan de la siguiente manera:

- **Modelos independientes.-** Sánchez (2007), clasifica en ajuste secuencial, donde la unidad base es el primer par estereoscópico llamado modelo, cuyo principio básico es la transferencia de puntos de un modelo a otro aprovechando el recubrimiento. En este método los centros de las imágenes se calculan con ecuaciones de colinealidad y se resuelven en todo el bloque completo, con una transformación de 7 parámetros y el cálculo por métodos iterativos.
- **Ajuste en bloques o método de haces.-** En este método las ecuaciones se resuelven y se plantean para todo un bloque fotogramétrico y la unidad base es el fotograma; es decir, las ecuaciones de colinealidad y coordenadas de terreno, se compensan y se corrigen eliminando errores residuales de cualquier elemento que interviene en la orientación (Sánchez, 2007).

En definitiva los métodos de aerotriangulación actuales (fotogrametría digital), tienen mucho que ver con su pasado (fotogrametría analítica); algunos de ellos se resumen en la tabla 4.

**Tabla 4.***Clasificaciones de la aerotriangulación por diferentes autores*

Autor	Clasificación	Descripción
<b>AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1980</b>	1. Triangulación Radial	Método gráfico utilizando en la fotografía aérea como base.
	2. Triangulación analítica.	A su vez se puede dividir en: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Procedimientos de triangulación</li> <li>2. Tipo de ecuaciones de condición</li> <li>3. Método de resolver las ecuaciones de condición</li> </ol>
	3. Estereotriangulación	Considera la instrumentación utilizada.
<b>lerma, 1999</b>	1. Modelos independientes	Se considera la unidad de trabajo el modelo estereoscópico.
	1.1. Aerotriangulación planimétrica	Utiliza puntos de paso y de apoyo, considerando un sistema libre o ligado, para su compensación en coordenadas X,Y.
	1.2. Aerotriangulación altimétrica	Utiliza puntos de paso y de apoyo, considerando un sistema libre o ligado, en su compensación solo en la coordenadas Z.
	1.3. Aerotriangulación tridimensional	Combina la aerotriangulación planimétrica y altimétrica para su compensación. Método resuelto con matrices y métodos iterativos.
	2. Aerotriangulación por el método de los haces de rayos	Considera el rayo (óptico) espacial como una unidad y formula el sistema de ecuaciones utilizando la condición de colinealidad.
<b>Pérez j., 2001</b>	1. Respecto a la unidad de trabajo	Considera la disposición del fotograma: modelos aislados, pasada simple, bloque de pasadas y bloque de secciones.
	2. Respecto al control terrestre	Considera el apoyo de otras tecnologías: con control geodésico y sin control geodésico.
	3. Respecto al modo del operador.	Es la clasificación más utilizada.
	3.1. Planimetría o Radial	A su vez se puede clasificar en: gráfica, numérica y mecánica


 Continúa

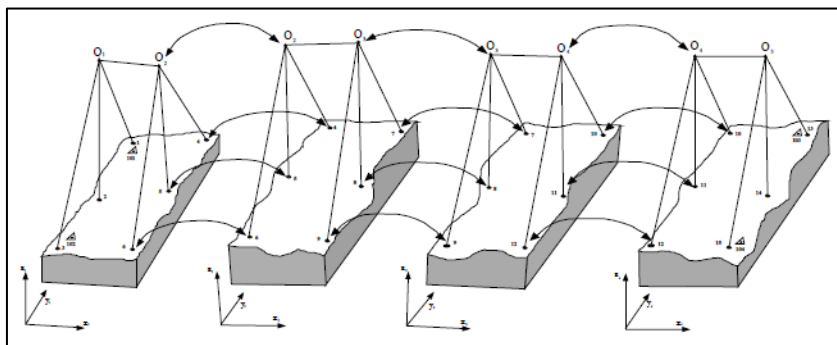
	3.2. Espacial (X,Y,Z)	A su vez se puede clasificar en: Analógica: Triangulación por pasadas o aeropoligonación. Semi analítica: modelos independientes. Analítica: Secuencial o simultánea.
<b>Sánchez, 2007</b>	1. Modelos independientes	Transferencia de los elementos de la orientación absoluta de un modelo a otro a través de la pasada.
	1.1. Ajuste Secuencial	La unidad base es el par estereoscópico llamado modelo, cuyo principio básico es la transferencia de puntos de un modelo a otro aprovechando el recubrimiento.
	1.2. Triangulación aérea simultanea	El modelo es la unidad básica, las ecuaciones se resuelve para todo el bloque completo, con una transformación de 7 parámetros.
	2. Método de haces	Se plantean y se resuelve las ecuaciones para todo un bloque fotogramétrico.

Fuente: Varios Autores

No obstante, los modelos matemáticos más usados en el ajuste de un bloque, son de la clasificación de la aerotriangulación analítica (Pérez J. , 2001), y se los denomina por modelos independientes y por ajuste en bloque, detallados a continuación:

#### 2.3.4. Modelos independientes en ajuste secuencial

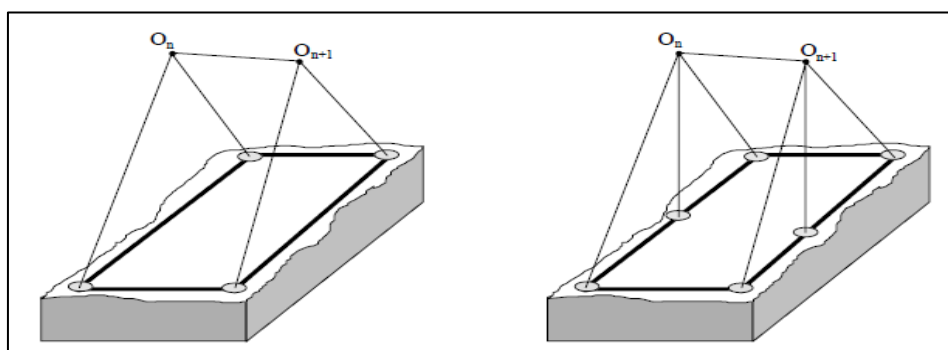
Según Sánchez (2007), el ajuste por modelos independientes utiliza como unidad de medición el modelo estereoscópico (ver Figura 34), cuyo sistema de coordenadas es único para todos los modelos y suele empezar con el primer modelo; al principio se realiza el paso de puntos de un modelo a otro, aprovechando el recubrimiento; además, se requieren los centros de proyección que ayudan la disminución de la deformación por los giros. Las coordenadas se pasan consecutivamente entre modelos mediante un ajuste de transformación de semejanza 3D.



**Figura 34.** Modelos orientados individualmente

Fuente: Tomado de (Pérez J. , 2001)

El ajuste por modelos independientes se puede realizar de tres maneras: ajuste planimétrico, ajuste altimétrico y ajuste tridimensional (ver Figura 35). En el ajuste planimétrico y altimétrico se usan puntos de paso, puntos de apoyo y las coordenadas de los centros de proyección de las imágenes (Sánchez, 2007).



**Figura 35.** Izq. Ajuste planimétrico. Der. Ajuste tridimensional

Fuente: (Pérez J. , 2001)

En el ajuste tridimensional, cada modelo puede trasladarse, rotarse y cambiar de tamaño; pero la estructura interna del modelo, permanecerá invariable (Sánchez, 2007); además, según Pérez J. (2001) un ajuste secuencial de un bloque debe conocerse las coordenadas de los cuatro puntos de las esquinas y los dos centros de proyección del modelo; las coordenadas requeridas se obtienen

aplicando la condición de coplanaridad o la de colinealidad y cada modelo está sujeto a una transformación tridimensional de semejanza de siete parámetros, utilizando la ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda_j [R]_j \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad [2]$$

Donde:

- (X,Y,Z), representa las coordenadas del punto a transformar en el nuevo sistema de coordenadas.
- (xi,yi,zi), representa las coordenadas del punto en el sistema de coordenadas de partida.
- (Tx,Ty,Tz), traslaciones entre ambos sistemas de coordenadas.
- ( $\lambda_j$ ), el factor de escala entre ambos sistemas.
- ( $R$ )<sub>j</sub>, la matriz de rotación (3x3), entre ambos sistemas de referencia.

Estas ecuaciones permiten definir la función F (ecuación 3), que integra los siete parámetros de la transformación ( $\lambda$ ,  $\Omega$ ,  $\Phi$ ,  $K$ ,  $TX$ ,  $TY$ ,  $TZ$ ), con las observaciones (xi, yi, zj).

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \lambda_j [R]_j \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad [3]$$

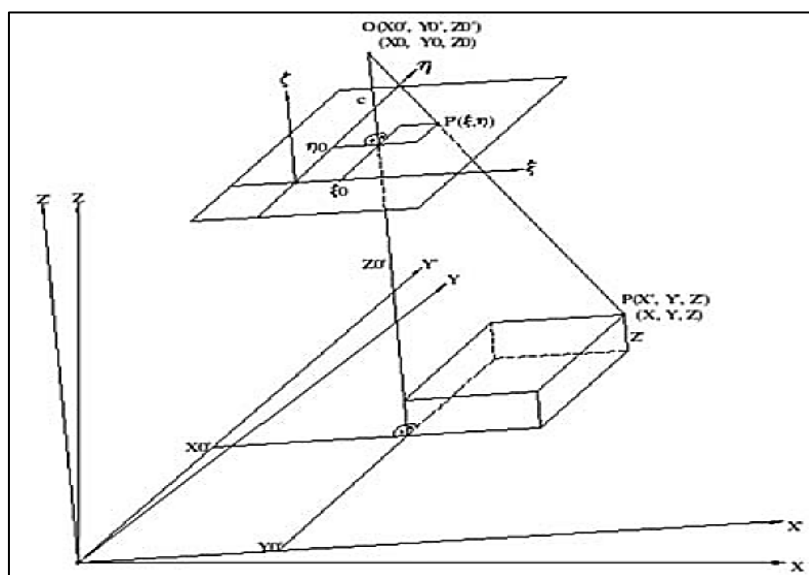
Estas ecuaciones nos son lineales y por tanto, se tienen que someter a un proceso de linealización.



### 2.3.5. Método de haces de luz en ajuste de bloques

Según Coelho y Nunes (2007), el método de ajuste de haces es el único que puede ser considerado totalmente analítico, debido a que el operador interviene muy poco en el proceso; además, es un método que utilizan la mayoría de los restituidores analíticos y soluciones digitales actuales; así pues, se define como un método que permite la reconstrucción óptima de la geometría de los haces de rayos luminosos formados por el sistema espacio-imagen en el momento de la toma de las mismas.

El proceso utiliza el Método de los Mínimos Cuadrados (MMCC) para minimizar los residuos del ajuste, de forma que cada radio ajustado pase lo más cerca posible de su homólogo, en el espacio-imagen y del centro de perspectiva de la imagen (ver Figura 36) (Coelho & Nunes, 2007).



**Figura 36.** Colinealidad entre imagen-objeto

Fuente: (Coelho & Nunes, 2007)

Esta condición de colinealidad puede ser expresada por las ecuaciones 4 y 5, por cada eje.

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad [4]$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad [5]$$

Donde:

- (c), es la distancia focal calibrada [mm].
- $(\xi, \eta)$ , son las coordenadas del punto en el sistema Espacio-Imagen [mm].
- $(\xi_0, \eta_0)$ , son las coordenadas del punto principal [mm].
- $(X, Y, Z)$ , son las coordenadas de un punto en el sistema Espacio-Objeto [m].
- $(X_0, Y_0, Z_0)$ , son las coordenadas del centro de perspectiva [m].
- $(r_{nm})$ , es el elemento de la matriz de rotación entre los sistemas XYZ y X'Y'Z' (este último es paralelo a la cámara fotogramétrica y los valores n,m de 1 hasta 3).

Así mismo, Coelho y Nunes (2007), indican que las funciones de colinealidad a pesar de describir una recta, no son lineales, pues combinan parámetros lineales y angulares. El proceso de ajuste ocurrirá entonces, por utilización de MMCC, y la combinación de la matriz jacobiana de forma iterativa, hasta que las diferencias estén dentro del límite deseado; es decir, de tolerancias fijadas a priori, tanto para los valores lineales, como para los angulares.

### 2.3.6. Convergencia

La convergencia no es más que la tendencia o aproximación a coincidir en una posición, punto o valor. “En las matemáticas la convergencia es una propiedad de las sucesiones y series; la una

tiende a un límite, mientras que en la otra, la suma de sus términos, se aproxima cada vez a una determinada cantidad” (RAE, 2018). El valor de convergencia se usa como un umbral para determinar el nivel y el grado de procesamiento durante el procedimiento de aerotriangulación iterativa (Erdas, 2011)

### 2.3.7. Restitución

Según Sánchez (2007), Coelho y Nunes (2007), la restitución fotogramétrica no es más que la extracción de datos a partir de imágenes digitales, interpretando diversas características naturales o artificiales presentes en el terreno, a fin de generar cartografía; todo esto con la ayuda del principio de la marca flotante, realizadas en un restituidor digital, que tiene como característica principal, realizar mediciones en el par estereoscópico y simultáneamente su representación en un CAD, ver Figura 37.



**Figura 37.** Ejemplo de un restituidor  
Fuente: (Delta 95, 2018)

### 2.3.8. Resultados derivados del ajuste

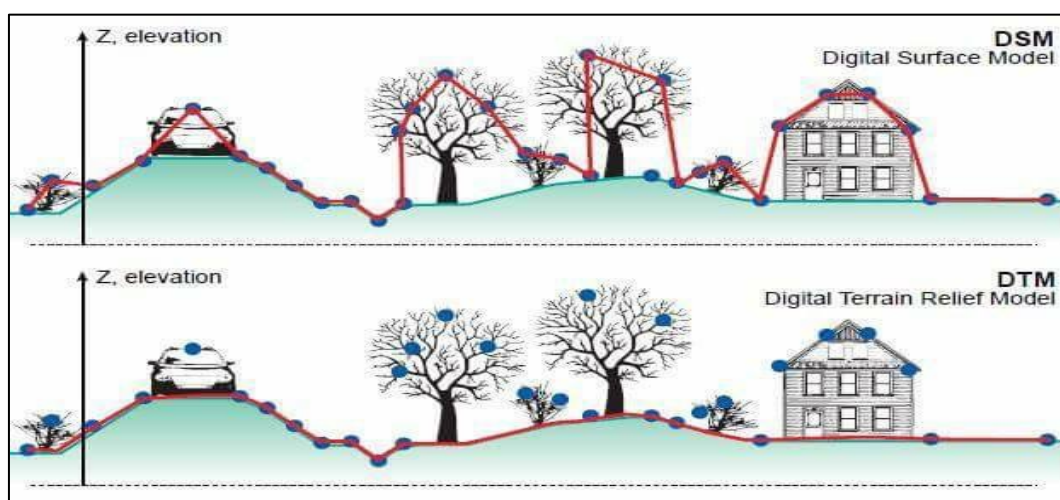
Los resultados de un ajuste fotogramétrico según Quirós (2014), son: cartografía 2D y 3D; modelos digitales del terreno; ortofotos y ortomosaicos; generalmente es necesario generar un

producto antes que los otros, pues su obtención se basa en productos anteriores. A continuación se describe algunos de ellos:

### 2.3.8.1. Modelo digital de superficie

Según Durón (2007), un modelo digital de superficie (MDS) es una matriz de datos de elevación, que representa los elementos del terreno y del suelo son obtenidos por métodos de interpolación; además, representa objetos como vegetación, infraestructura (edificios, puentes, viaductos, entre otros) (ver Figura 38)

Así mismo, según Brito, Prado y Augusto (1999), indican que el MDS puede definirse como: “Cualquier representación numérica de una determinada superficie física sobre el del terreno” Cuando un MDS expresa altitud, se llama el modelo numérico de elevaciones (MNE) o el modelo digital de elevaciones (MDE o DEM, Digital Elevation Model) (Citado en Coelho y Nunes, 2007, p. 157).

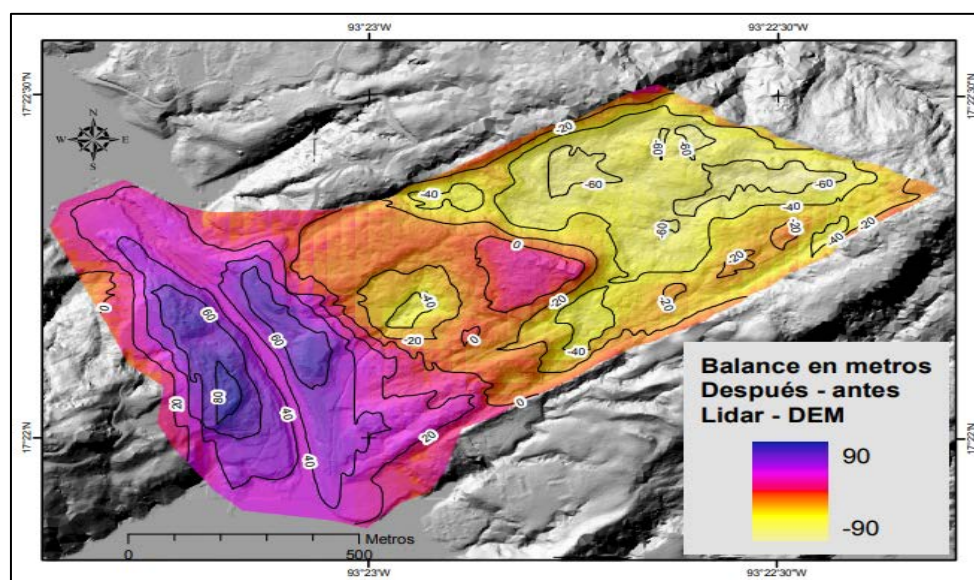


**Figura 38.** Diferencias entre DTM (en español MDT) y DSM (en español MDS)

Fuente: (GIS & Remote Sensing Service, 2018)

### 2.3.8.2. Modelo digital de elevación (MDE)

Según Felicísimo (1999), un MDE es un grupo de datos, cuyo valor numérico representa la superficie topográfica, mediante la repartición de puntos de altitud en el terreno, cuya unidad mínima está dada por la variable Z (Citando en Barragán, 2015, p. 39) (ver Figura 39).

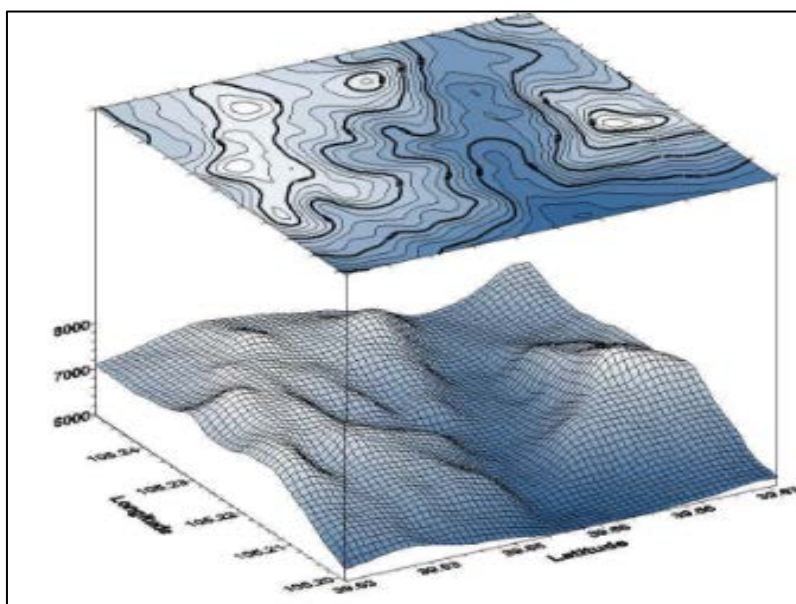


**Figura 39.** Ejemplo de MDE

Fuente: (Hinojosa, Rodríguez, Munguía, & Meillón, 2011)

### 2.3.8.3. Modelo digital del terreno

Según Ormeño (2004), Niño (2009) y Arranz (2010), indican que un modelo digital del terreno (MDT) es una representación numérica de cualquier punto en el terreno o de la superficie sobre el agua, expresado en coordenadas x,y,z de los puntos que lo definen; además, considera la información de la restitución fotogramétrica como ríos, líneas de cresta, líneas de perfil del terreno, entre otros elementos; en el caso del terreno desierto un MDS es muy cercano (sino el mismo) que un MDT. Un ejemplo de MDT se presenta en la Figura 40.



**Figura 40.** Ejemplo de MDT  
Fuente: (Agromundo, 2018)

#### 2.3.8.4. Imágenes corregidas

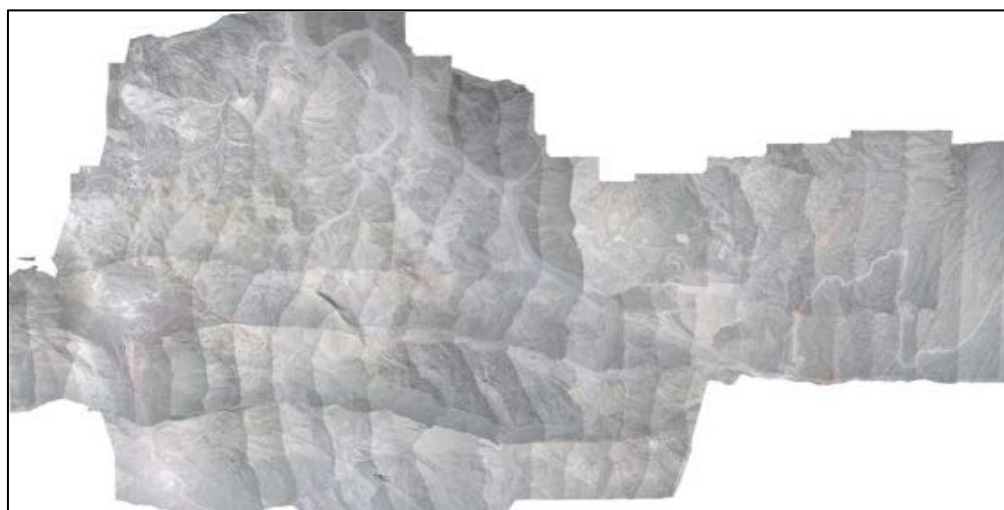
Barragán (2015), indica que una imagen corregida en fotogrametría tiene un ajuste geométrico, radiométrico y se encuentra georreferenciada, cuyos ejemplos son: la ortofoto y ortomosaico, definidos a continuación:

- **Ortofoto digital**

Según Schenk (2002) y Lerma (2002), indican que una Ortofoto Digital u Ortoimagen es una representación ortogonal del terreno y resulta del uso de un MDT generado automáticamente; al mismo tiempo, permite ajustes radiométricos de las imágenes que intervienen en el proceso; en otras palabras, es una representación digital de una superficie de terreno, que permite realizar mediciones sobre las mismas.

- **Ortomosaico**

Según Soria (2014), cuando se tiene un conjunto de ortofotos digitales georreferenciadas es necesario juntarlas, sobre todo cuando tienen cierto grado de recubrimiento entre ellas (ver Figura 41); esto se realiza con el fin de tener una sola información, a este proceso se lo denomina mosaico; no obstante, requiere de un ajuste radiométrico para homogenizar sus colores y evitar que dicha unión sea altamente visible.



*Figura 41.* Ejemplo de mosaico  
Fuente: (GPAC, 2018)

#### **2.4. Programas de ajuste fotogramétrico**

Según Pozo (2002) y Gómez (2011), indican que el avance de la fotogrametría ha llevado a la implementación de software y hardware, que ayuda a la automatización de los procesos fotogramétricos; tanto así, que la aerotriangulación se lleva a cabo en programas especializados

que realizan cálculos de una manera rápida y sencilla; además, permiten la detección de errores por métodos estadísticos.

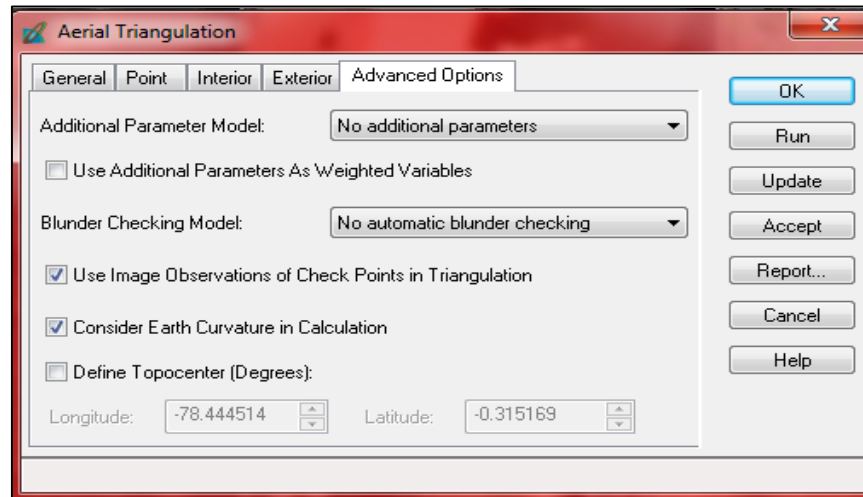
Coelho y Nunes (2007), señalan algunos programas como: Erdas Imagine y PCI OrthoEngine, los cuales realizan operaciones fotogramétricas como: la ortorectificación, creación de modelos 3D de corta distancia, aerotriangulación; sin embargo, existen otras opciones como: LH-Systems, ISM, KLT, DAT/EM, VinGeo, DVP, TopoL, VirtuoZo, Autometric/Boeing, E-foto, Z/I Imaging, y Orima.

La influencia de estos programas hace que se priorice la investigación de éstos para dar mayor confiabilidad al usuario sobre el producto a obtener (Topoequipos S.A, 2015). A continuación una descripción de algunos programas fotogramétricos.

#### *2.4.1. Erdas-LPS*

Erdas Imagine, es un programa que es utilizado en diferentes ramas del conocimiento como: la fotogrametría y los sensores remotos, aplicando tecnología LiDAR, análisis vectorial, entre otras herramientas (Hexagon, 2018); además, cuenta con Leica Photogrammetry System (LPS), que es un paquete de herramientas fotogramétrico del mismo Erdas Image, diseñado para medir GCP en múltiples imágenes, realizar productos como: ortofoto, MDS, aerotriangulación de múltiples imágenes (ver Figura 42), entre otras funcionalidades (Erdas, 2011). La versión 2014 al módulo LPS se lo denomina Erdas Photogrammetry.





**Figura 42.** Interfaz aerotriangulación LPS-ERDAS

Fuente: (Erdas, 2011)

Según Erdas (2010), la versión 11.0.2 de LPS contiene un paquete de aerotriangulación que se basa en la formulación de ecuaciones de colinealidad, con un ajuste de mínimos cuadrados (ecuación 6) de manera iterativa, cuya convergencia por defecto es un valor de 0.001 m.

$$X = (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad [6]$$

Donde:

- (X), matriz que contiene las correcciones de los parámetros desconocidos;
- (A), matriz de las derivadas parciales con respecto a los parámetros desconocidos;
- (t), matriz transpuesta;
- (P), matriz que contiene los pesos de las observaciones;
- (L), matriz que contiene las observaciones.

Además, existen varios modelos matemáticos al considerar la matriz de pesos ( $P$ ) en un ajuste por bloque resuelto por la ecuación 6; por ejemplo: modelo simple de Bauer (3 parámetros), modelo simple Jacobsen's (4 parámetros), modelo ortogonal Ebner's (12 parámetros), etc. (Ver tabla 5).

**Tabla 5.**

*Parámetros de adicionales de ajuste.*

Nombre del modelo	Descripción
<b>No additional parameters</b>	Sin uso de parámetros, esta es la opción predeterminada.
<b>Bauer's simple model</b>	Un modelo de tres parámetros del Dr. Bauer, en donde, dos parámetros son para la deformación afín (causada por la no ortogonalidad) y parámetro para la distorsión simétrica de la lente.
<b>Jacobsen's simple model</b>	Un modelo de cuatro parámetros del Dr. Jacobsen, en el que se compensan la distorsión afín, distorsiones de primero y segundo; además de la distorsión de la lente.
<b>Ebner's orthogonal model</b>	Es un modelo de doce parámetros del Dr. Ebner, que compensa la mayoría de errores sistemáticos, pero también requiere más observaciones por lo que requiere un mayor número de GCP y al menos nueve puntos de amarre por imagen.
<b>Brown's physical model</b>	Es un modelo de catorce parámetros del Dr. Brown, y puede compensar la mayoría de distorsiones lineales y no lineales de la película y la lente, pero requiere de más puntos de control y de enlace.
<b>Lens distortion model</b>	Es un modelo de dos parámetros diseñado para compensar errores de auto calibración de la lente, generalmente para cámaras de aficionados.

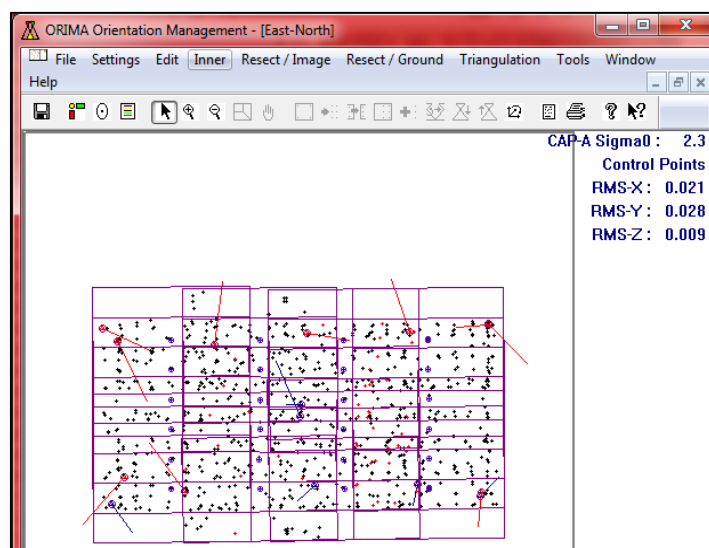
Fuente: (Erdas, 2011).

Así mismo, un indicador de la calidad del ajuste es el valor del error cuadrático medio total (RMSE), que está basado en los residuales de las coordenadas de imagen y los residuales de las coordenadas del terreno (Erdas, 2011).

### 2.4.2. Orima

Orima 11.00, es la forma abreviada de “Orientation Management (Gestión de orientación)” y es un programa utilizado en las orientaciones en fotogrametría (relativa, absoluta y aerotriangulación); basadas en LPS y SOCET SET, (Erdas, 2010).

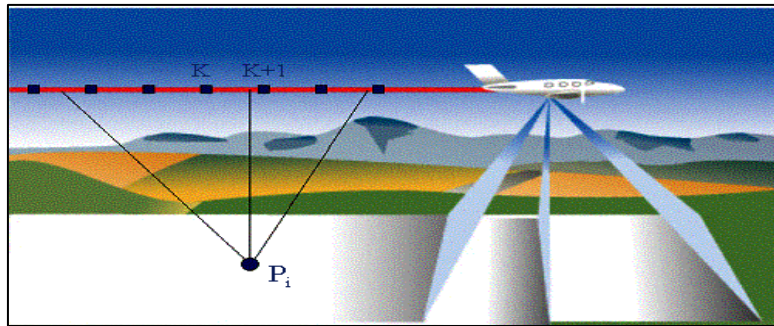
Según Hinsken (2010), autor de Orima, indica que dicho programa es capaz de gestionar algunos aspectos necesarios en la realización de la orientación fotogramétrica de un solo modelo; así como, orientación de modelos múltiples por triangulación en bloques; además de calcular parámetros de orientación, detección de errores estadísticamente, criterios de calidad para juzgar la eficacia de la orientación y una visualización de fácil interpretación, (ver Figura 43).



**Figura 43.** Vectores residuales en Orima  
Fuente: (Erdas, 2011)

El programa requiere de un modelo matemático más complejo que la ecuación de colinealidad, pues tiene en cuenta la integración con GPS/IMU (ver apartado 3.2.4) a los sensores

(ejemplo: cámara ADS40), esto con el fin de obtener la mayor precisión posible (Hinsken & Miller, 2002); el modelo antes descrito presenta el trabajo de Müller (1991); donde, las coordenadas de imagen se expresan como una función del punto en tierra ( $P_i$ ) y los parámetros de orientación de corrección ( $k, k+1$ ) (ver Figura 44).



**Figura 44.** Modelo de Muller (1991)

Fuente: (Hinsken & Miller, 2002)

Por tanto, las ecuaciones en sus ejes están definidos como la ecuación 7 en el eje x y la ecuación 8 en el eje y, como a continuación:

$$x_{ij} = F_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \phi_k, \kappa_k, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \phi_{k+1}, \kappa_{k+1}) \quad [7]$$

$$y_{ij} = G_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \phi_k, \kappa_k, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \phi_{k+1}, \kappa_{k+1}) \quad [8]$$

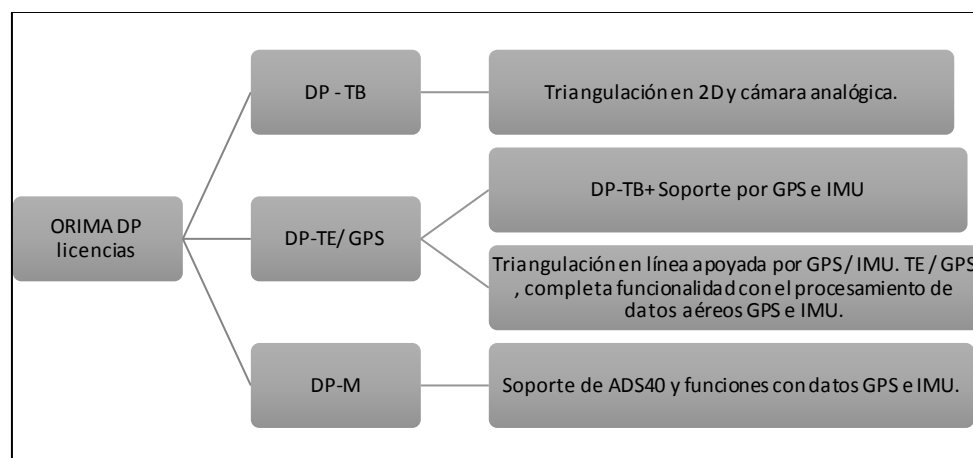
Donde:

- $(X, Y, Z)$ , representan las coordenadas en el espacio del punto.
- $(\omega, \phi, \kappa)$ , representan los ángulos de rotación, en el sentido de los ejes.
- $(k)$ , parámetros de orientación.

- (i,j), los diferentes puntos que puedan tener.

Además, el modelo matemático se acopla muy bien en áreas sin mediciones suficientes de puntos de enlace (por ejemplo lagos o bosques), al determinar los parámetros de orientación con las mediciones de GPS / IMU (Hinsken & Miller, 2002).

El programa Orima cuenta con diferentes licencias de trabajo detalladas en la Figura 45 y que son utilizadas para cámara ADS40, imágenes con marcas fiduciales e imágenes con apoyo IMU/GPS incorporado.



**Figura 45.** Licencias de Orima

Fuente: (Erdas, 2011)

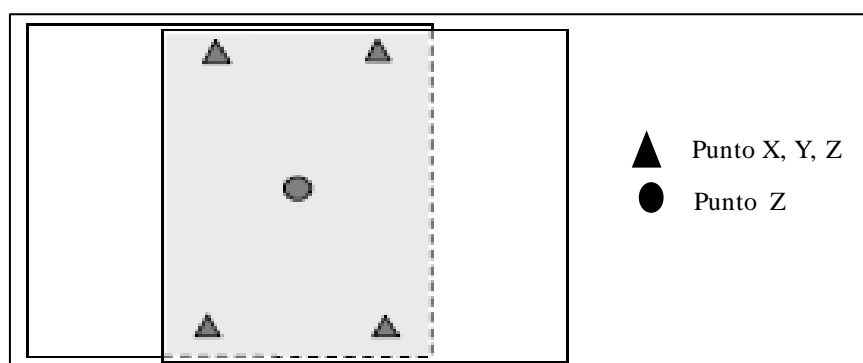
### 2.4.3. Z/I Imagine

Z/I Imaging Corporation es una empresa que ofrece desarrollo, soporte y soluciones de imágenes terrestres, incluidas cámaras aéreas, estaciones de trabajo estéreo, analítico y escáneres fotogramétricos. La compañía fue fundada en 1999 y tiene sede en Huntsville, Alabama (Global Market, 2018).

El módulo para realizar aerotriangulación se conoce como: “Image station automatic triangulation”, que parte de los estudios de la empresa Carl Zeiss de la división fotogramétrica de la empresa Z/I Imaging GmbH; cuyos procesos se basan en la medición de puntos de manera estereoscópica y la generación de ecuaciones por el principio de colinealidad (Spiller, 1999).

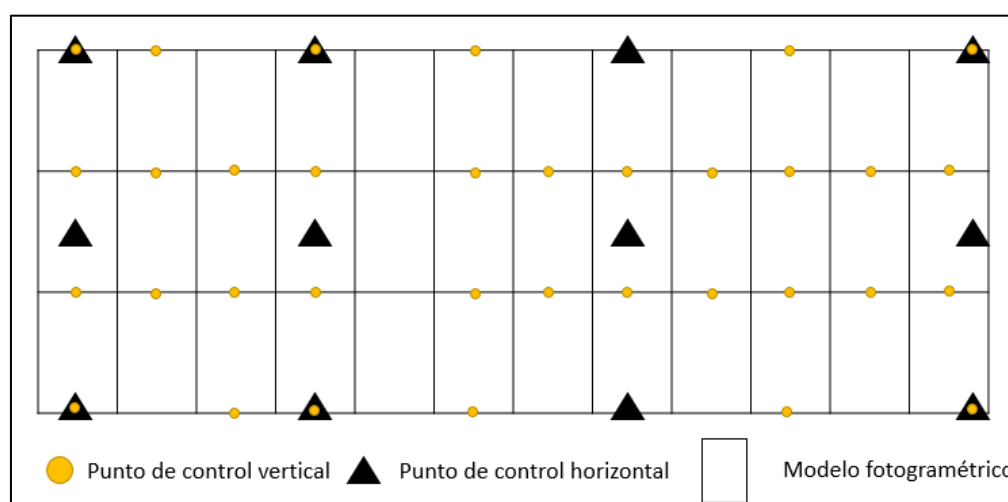
## 2.5. Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico (GCP)

La distribución y cantidad de puntos de control varían según las especificaciones del proyecto y de la tecnología de soporte (apoyo aéreo cinemático) (Muñoz, 2004); así pues, varios autores como: Otero y Sevilla (1989), Pérez J. (2001) y Cartesia (2010), indican que un plano se define con tres puntos y concuerdan en que un modelo se encuentra bien orientado teóricamente, cuando utilizan dos puntos con coordenadas X,Y,Z y para escalar el modelo se requiere de un punto con coordenada Z; sin embargo, una mejor orientación requiere de dos puntos más, que aumentará la redundancia de las ecuaciones; así como, sus parámetros (Obregón, 2007), siendo su distribución mínima como se ilustra en la Figura 46.



**Figura 46.** Distribución de GCP en un modelo  
Fuente: (Obregón, 2007)

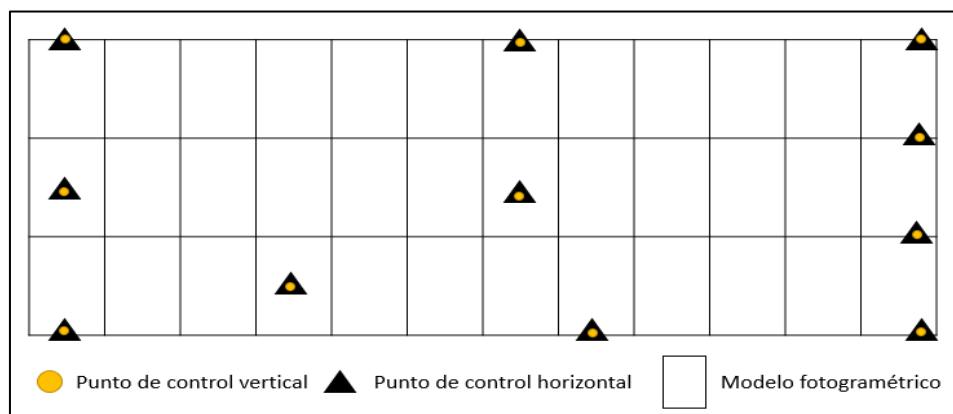
En fotogrametría, usualmente se trabaja con un bloque fotogramétrico, el cual tiene varios modelos; así pues, los puntos de control según Hussain y Bethel (2004), se clasifican en horizontal y vertical, en donde los puntos de control horizontal, normalmente, se ubican a lo largo del perímetro del bloque, con un espaciamiento promedio de 3 a 5 modelos o más; por otro lado, la distribución del control vertical se realiza a lo largo de la línea de vuelo, debido a la deformación en el plano vertical en bloques grandes; por consiguiente, su distribución final se muestra en la Figura 47.



**Figura 47.** Distribución de GCP sin GPS

Fuente: (DOT, 2006)

Sin embargo, al usar el proceso de aerotriangulación y la disponibilidad de un sistema GPS-IMU incorporado en el aire (para medir la posición y altitud de cada imagen) en la etapa de adquisición de imágenes, se minimiza el número de puntos de control (Milkhail, Bethel, & McGlone, 2001), logrando una distribución como la Figura 48; donde, se muestra puntos de control vertical y horizontal en las esquinas del proyecto, en el perímetro, cada 5 modelos.



**Figura 48.** Distribución de GCP con GPS

Fuente: (DOT, 2006)

No obstante, existen varias formas de distribuir los puntos de control, así como su cantidad, los cuales se detallan en la tabla 6.

**Tabla 6.**

*Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico.*

Descripción	Ilustración
Según Ackermann (1987), la distribución idónea de los puntos de control se realiza en el contorno del bloque.	
Según Otero y Sevilla (1989), la mínima cantidad de puntos de control son tres por línea de vuelo y ubicados en el contorno de las fotografías. (Δ), puntos de control; (°), control vertical; (●), punto de enlace; (+), punto de paso.	

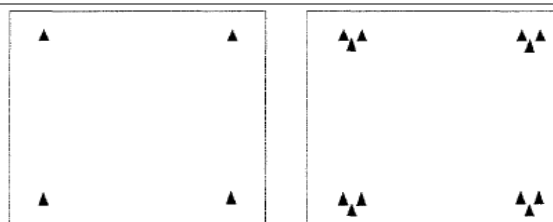
(Otero & Sevilla, 1989)



Continúa



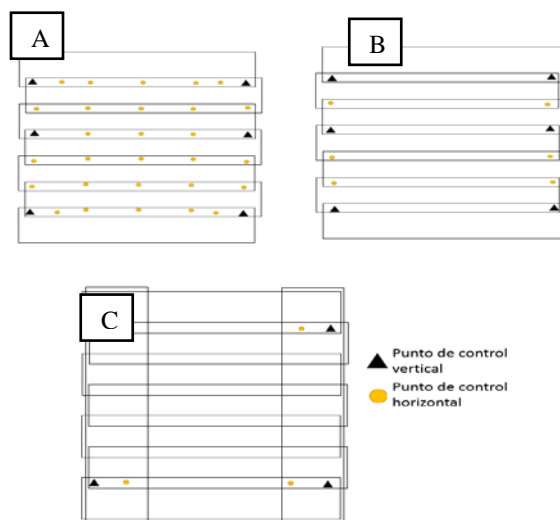
Según Ackermann (1990), se puede ubicar los puntos de control en las esquinas de manera simple (imagen izquierda) y de manera múltiple (imagen derecha) dentro de un modelo. (▲), puntos de control.



(Ackermann, 1990)

Ackermann (1994), realiza una clasificación teniendo en cuenta el apoyo aéreo cinemático, tal como se indica a continuación: bloque convencional de aerotriangulación (A), aerotriangulación con apoyo GPS cinemático (B) y bloque con apoyo GPS cinemático - pasadas transversales (C).

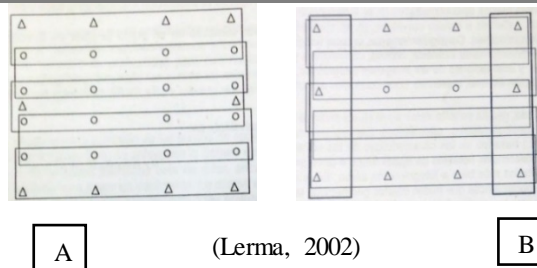
(▲), puntos de control; (°), control vertical;



(Ackermann, 1994)

Según Lerma (2002), los puntos de control planimétricos (X,Y,Z) se ubican en la periferia del bloque y cada 4 a 5 modelos, los puntos de control vertical siguen la misma dirección de los de control horizontal, en las zonas de recubrimiento longitudinal y transversal.

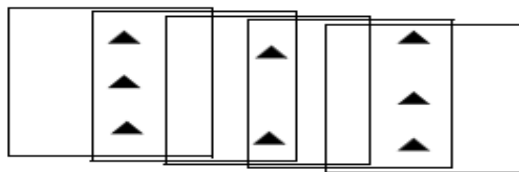
(Δ), puntos de control; (°), control vertical.



(Lerma, 2002)

(A), Bloque tradicional; (B) bloque con un vuelo extra en el comienzo y fin de la zona.

Según la empresa Leica Geosystems (2005), la distribución de los puntos de control se realiza en áreas de doble traslapo tanto al comienzo como al final; además, de dos puntos de control por cada tres imágenes. En la distribución por bloque, considera



➔ Continúa

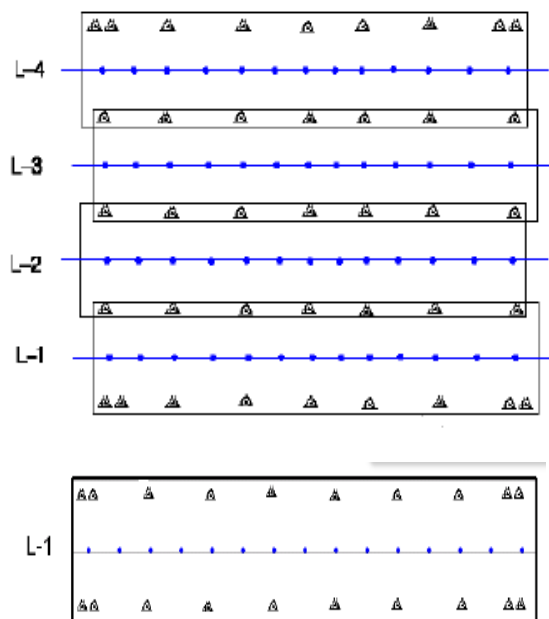
tener por lo menos un punto en cada tercera imagen y principalmente en zonas de múltiple traslapo.

(Leica Geosystems, 2005)

(▲), puntos de control.

Según el Instituto Geográfico Nacional de Perú (IGN) (2011), la distribución de los puntos se da de una manera homogénea por todo el bloque, un punto de control doble en cada esquina del bloque, un punto de control en las esquinas internas entre líneas de vuelo y cada tercer modelo perpendicular a las líneas de vuelo incluyendo zonas de triple traslapo.

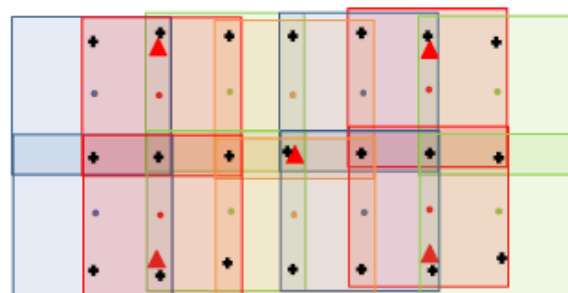
(▲), puntos de control; (°), control vertical.



(IGN, 2011)

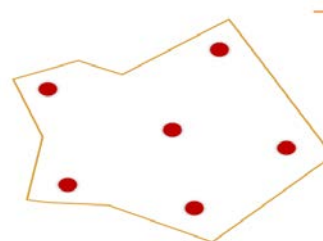
Según el Departamento de Transporte de Colorado (2015), se requiere de al menos de tres puntos de control en el bloque fotogramétrico; además, uno o más puntos adicionales para determinar la precisión del error residual del modelo. Cabe mencionar que esta distribución contempla los centros de las imágenes por GPS.

(▲), puntos de control; (°), centro de la imagen; (+), punto de paso.



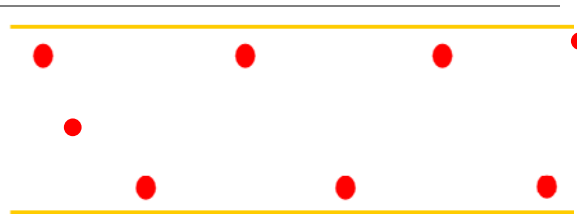
(Colorado Department of Transportation, 2015)

Según la empresa PIX4D (2018), los puntos deben colocarse de manera homogénea en la zona de estudio, con un mínimo de 3 puntos. Recomienda de 5 a 10 puntos de control y no más, pues no contribuyen significativamente en la precisión. Además, se ubican en zonas de múltiple traslapo y recomienda para proyectos de una faja, una distribución homogénea, incluyendo un par en cada extremo de la línea de vuelo.



Continúa

Cabe aclarar que dichos proyectos cubren áreas mucho más cortas que las anteriores y su uso es con vehículos aéreos no tripulados. (●), Punto de control.



(PIX4D, 2018)

Nota: El triángulo representa un punto de control.

### 2.5.1. Ubicación de los puntos de apoyo fotogramétrico

Según Pérez J. (2001), la ubicación de un punto de control fotogramétrico se realiza de forma aproximada en una imagen, para su posterior obtención en campo (ver Figura 49); se apoya con cartografía existente, fotografías del vuelo, entre otros.



**Figura 49.** Ejemplo de la ubicación de un punto de control fotogramétrico

Los criterios para elegir dichos puntos, según Pérez J. (2001) y Heipke (1997), son:

- Punto perfectamente identificable en todos los fotogramas, geoméricamente bien definidos y ubicados dentro de la zona de estudio.
- Si es posible, puntos ubicados en líneas rectas, esquinas definidas, cruces de caminos, bien definidos.



## 2.6. Control de exactitud posicional

Según Ariza, Emerson, Chicaiza y Buenaño (2017), la exactitud posicional es parte de la calidad de la información geográfica y de gran importancia en la interoperabilidad de cualquier aplicación Geomática; así mismo, un control de calidad del proceso fotogramétrico, disminuye los posibles errores que se acumulan a medida que se avanza en las diferentes fases (Quirós, 2014).

Algunos de los estándares más conocidos al evaluar cartografía son: EMAS, NMAS, NSSDA, PSADG y el propuesto por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos denominado ASPRS “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” (2014); por tanto, se detallan algunas consideraciones de calidad en el proceso fotogramétrico y posteriormente se detallan los criterios de aceptación del producto.

### 2.6.1. ASPRS “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data”

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos cuyas siglas en inglés son ASPRS, es una organización responsable del estándar “ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data”, entre sus objetivos tiene: reemplazar los estándares de precisión ASPRS existentes para mapas a gran escala (1990) y preparar informes verticales de precisión para datos Lidar (2004) (ASPRS, 2014); así mismo, la ASPRS incluye estándares de precisión posicional de ortoimágenes digitales, datos planimétricos digitales y datos de elevación digitales, basadas en los valores del error cuadrático medio (root mean square error - RMSE).

Vale destacar, que la norma incluye tablas con umbrales de RMSE para generar productos con las tendencias actuales de precisiones basadas en el GSD; además, de ecuaciones que determinan el límite de la precisión de la aerotriangulación, ecuaciones de la precisión de los puntos fotogramétricos, criterios de distribución espacial de los puntos de control fotogramétrico; así mismo, la cantidad de puntos de muestreo en la exactitud posicional según el área a cubrir. Algunos de los criterios considerados, así como otras normas se detallan a continuación:

### *2.6.2. Calidad de las imágenes*

Según el IGM (2006), las imágenes deben ser exentas de manchas, partículas de polvo, cabellos, rayas, marcas fiduciales visibles, entre otros; además, las características radiométricas del histograma de color de cada banda, deben seguir una distribución normal y la saturación de los extremos no debe ser superior al 0.5%.

### *2.6.3. Tolerancias de las orientaciones*

Dentro del proceso fotogramétrico, detallado en el apartado 2.2, existen diferentes orientaciones; por tanto, existen diversas tolerancias al realizar la orientación interior, relativa, absoluta y aerotriangulación.

#### *2.6.3.1. Tolerancias de la orientación interior y la orientación exterior*

Según IGM (2006), las imágenes digitales obtenidas con cámara analógica y escaneadas, el error estándar en la orientación interior es de 0.6 de pixel; también, Quiroz (2014), indica que si el fotograma ha sido obtenido con cámara analógica el error medio máximo no debe ser mayor de un

pixel y cuando se utiliza cámara digital la orientación interior no precisa de tolerancias, pues su orientación es automática.

Como se ha dicho en el apartado 2.2.6 la orientación exterior se puede dividir en orientación relativa y orientación absoluta; según el IGM (2006), el error estándar para el ajuste relativo es igual a 1 pixel y el error estándar para el ajuste absoluto es de 2 pixeles.

### 2.6.3.2. Tolerancias de la aerotriangulación

El Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (2008), explica que los puntos aerotriangulados no debe excederse más allá de la cubierta de los puntos de control y un ajuste por haces de rayo debe tener un RMSE inferior a 0.004mm en coordenadas de imágenes.

Además, la norma Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data de la ASPRS (2014) indica que la precisión de la aerotriangulación para datos planimétricos digitales (ortoimágenes o mapas planimétricos digitales), utilizando el RMS del mapa y el tamaño del GSD de la tabla 7 y la ecuación 9 y 10.

#### **Tabla 7.**

*Ejemplos de calidad para datos planimétricos digitales de alta precisión.*

ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data 2014				Equivalente a
Clase de precisión horizontal RMSE <sub>x</sub> y RMSE <sub>y</sub> (cm)	RMSE <sub>r</sub> (cm)	Precisión horizontal en el nivel de confianza del 95% (cm)	GSD aproximado del origen de las imágenes (cm)	la escala del mapa en NMAS
15.0	21.2	36.7	7.5 to 15.0	1:380
25.0	35.4	61.2	12.5 to 25.0	1:634
30.0	42.4	73.4	15.0 to 30.0	1:760
45.0	63.6	110.1	22.5 to 45.0	1:1,141
60.0	84.9	146.9	30.0 to 60.0	1:1,521



*Continúa*

<b>100.0</b>	141.4	244.8	50.0 to 1000	1:2,535
<b>150.0</b>	212.1	367.2	75.0 to 150.0	1:3,802
<b>200.0</b>	282.8	489.5	100.0 to 200.0	1:5,069
<b>250.0</b>	353.6	611.9	125.0 to 250.0	1:6,337
<b>1000.0</b>	1414.2	2447.7	500.0 to 1000.0	1:42,244

Fuente: Modificado y traducido de (ASPRS, 2014)

Al calcular el RMS de la aerotriangulación, se tiene en cuenta los valores de la tabla anterior y se reemplaza los valores en las ecuaciones 9 y 10, tanto para aerotriangulación planimétrica o altimétrica vista en el apartado 2.3.3.4.

$$RMSE_x(AT) \text{ o } RMSE_y(AT) = \frac{1}{2} * [RMSE_x(Mapa) \text{ o } RMSE_y(Mapa)] \quad [9]$$

$$RMSE_z(AT) = [RMSE_x(Mapa) \text{ o } RMSE_y(Mapa)] \quad [10]$$

Donde:

- (RMSE<sub>x</sub> (AT)), representa el error cuadrático medio máximo de la aerotriangulación en la dirección Este.
- (RMSE<sub>y</sub> (AT)), representa el error cuadrático medio máximo de la aerotriangulación en la dirección Norte.
- (RMSE<sub>z</sub> (AT)), representa el error cuadrático medio máximo de la aerotriangulación en la altura.
- RMSE(Mapa), representa el error cuadrático medio máximo del producto final a obtener.



#### 2.6.4. Tolerancias de los puntos de apoyo fotogramétrico

Según IGM (2006), los puntos de apoyo fotogramétrico (GCP) deben ser obtenidos con receptores GPS geodésicos de una frecuencia L1 o de doble frecuencia L1/L2 y que son de código C/A, con un PDOP menor a 4, cuya metodología de posicionamiento es Relativo Estático Diferencial, detallado en el apartado 2.2.3.3 “Métodos de posicionamiento GNSS”.

Las precisiones de estos puntos en planimetría será del error medio cuadrático de las coordenadas, cuyo valor máximo será de 0.1mm por el módulo de la escala del mapa a obtener (IGM, 2013); sin embargo, la norma ASPRS (2014), precisa el valor de los puntos de control fotogramétrico utilizando la ecuación 11 y 12 respectivamente:

$$RMSE_x \text{ o } RMSE_y = \frac{1}{4} * [RMSE_x(Mapa) \text{ o } RMSE_y(Mapa)] \quad [11]$$

$$RMSE_z = \frac{1}{2} [RMSE_x(Mapa) \text{ o } RMSE_y(Mapa)] \quad [12]$$

Donde:

- (RMSE<sub>x</sub>), representa el error cuadrático medio máximo de los GCP en la dirección Este.
- (RMSE<sub>y</sub>), representa el error cuadrático medio máximo de los GCP en la dirección Norte.
- (RMSE<sub>z</sub>), representa el error cuadrático medio máximo de los GCP en la altura.
- (RMSE(Mapa)), representa el error cuadrático medio máximo del producto final a obtener.

### 2.6.5. Precisiones de ortofotos u ortoimágenes

Según el IGM (2006), las ortofotos digitales que se generan con un MDE de cobertura del 5% más por lado; su exactitud viene dado por la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Especificaciones técnicas de ortofotos digitales.*

Escala de la fotografía	Tamaño del pixel en la toma (m)	Escala de ortofotos	Tamaño del pixel en el producto (m)	Precisión horizontal (m)	Precisión vertical (m)
<b>1:5000</b>	0.07	1:1000	0.10	0.30	0.25
<b>1:10000</b>	0.14	1:2000	0.20	0.60	0.50
<b>1:20000</b>	0.28	1:2500	0.25	0.80	0.60
<b>1:30000</b>	0.42	1:5000	0.50	1.50	1.25
<b>1:60000</b>	0.84	1:10000	1.00	3.00	2.50

Fuente: (IGM, 2006).

### 2.6.6. Tamaño de la muestra de puntos en la exactitud posicional

Según varios autores como: Mikhail (1976), Goodchild y Gopa (1989), Li (1991), Leung y Yang (1998), entre otros autores, detallados por Ariza y Atkinson (2006), el tamaño de la muestra para datos cartográficos y posicionales, asumen una distribución normal; además, dicho autor señala que “Estadísticamente es un problema resuelto”; sin embargo, existen diferentes tamaños de muestras recomendados por diferentes normas, entre ellas NMAS, EMAS, NSSDA, ASPRS indican un  $n=20$ ; sin embargo, la ASPRS “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” indica: “el número de puntos varía según el área a cubrir” lo que se detalla en la tabla 9.

**Tabla 9.**

*Número recomendado de puntos de control basado en la cantidad de área.*

Área del Proyecto (km <sup>2</sup> )	Prueba de precisión horizontal de una Ortoimagen y planimetría.	
	Número total de puntos de control 2D / 3D estáticos (puntos claramente definidos)	
≤500	20	
501-750	25	
751-1000	30	
1001-1250	35	
1251-1500	40	
1501-1750	45	
1751-2000	50	
2001-2250	55	
2251-2500	60	

Fuente: traducido de (ASPRS, 2014)

En el Ecuador para fiscalizar cartografía 1:1000, se utiliza la cantidad de 20 puntos, distribuidos en una hoja cuadrada de 15 segundos de latitud y longitud; además, el total de hojas se conoce como tamaño de la población (IGM, 2017). La precisión de estos puntos deben ser obtenidos por medios más precisos de hasta un cuarto del producto a obtener (ASPRS, 2014).

#### *2.6.7. Exactitud posicional*

Al realizar la exactitud posicional con la cantidad de puntos, mencionada en el apartado 2.6.6, según IGM (2017), para generar cartografía con fines catastrales y a escala 1:1000, se debe determinar el residuo o diferencia, de los puntos obtenidos en la Ortoimagen respecto del control efectuado en campo con métodos más precisos, tal y como indica la norma NSSDA, al aplicar el RMSE con la ecuación 13.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(mapa)} - x_{i(control)})^2} \quad [13]$$

Donde:

- RMSE, representa el error cuadrático medio.
- n, representa la cantidad de puntos muestreados
- x (mapa), representa la coordenada en la dirección especificada del punto de control en el conjunto de datos.
- x (control), representa la coordenada en la dirección especificada del punto de control en la fuente de mayor precisión.
- i, representa un rango de 1 hasta n.

A continuación, según IGM (2017), se debe calcular el RMSE<sub>x</sub> y el RMSE<sub>y</sub> considerando dos casos; el primero caso implica RMSE<sub>x</sub>=RMSE<sub>y</sub>; así mismo, tiene en cuenta el valor de 2.1460 al 90% de confianza, que al dividir para la raíz de dos resulta la ecuación 14 (FGDC, 1998).

$$Exactitud = 1.5175 * \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad [14]$$

Por tanto, el segundo caso implica RMSE<sub>x</sub> ≠ RMSE<sub>y</sub>; y al 90% de confianza el mismo valor de 2.1460; por tanto, se multiplica por 0.5, la suma del RMSE<sub>x</sub> y RMSE<sub>y</sub> (la suma de una aproximación del error circular, considerando si el RMSE<sub>min</sub>/RMSE<sub>max</sub>, se encuentra entre 0.6 y 1 (FGDC, 1998)), representado en la ecuación 15.

$$\text{Exactitud} = 2.146 * 0.5 * (\text{RMSE}_x + \text{RMSE}_y) \quad [15]$$

Si es el caso que los valores no se encuentran entre dicho límite, se aplica el caso uno; donde, a la raíz cuadrada de las componentes X e Y de los RMSE se le conoce como la componente planimétrica representada por  $\text{RMSE}_r$ .

Sin embargo, la norma “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” de la ASPRS (2014), considera los coeficientes de 2.448 a un 95% de confianza en la exactitud posicional en unidades de centímetros (ver tabla 10), que se evalúan con el RMSE en el plano horizontal, es decir,  $\text{RMSE}_x$ ,  $\text{RMSE}_y$  y  $\text{RMSE}_r$ .

**Tabla 10.**

*Estándares de precisión horizontal para datos geoespaciales*

Componente Horizontal de precisión	Exactitud Absoluta		
	RMSE <sub>x</sub> y RMSE <sub>y</sub> (cm)	RMSE <sub>r</sub> (cm)	Precisión horizontal al 95% de nivel de confianza (cm)
<b>X-cm</b>	$\leq X$	$\leq 1.414 * X$	$\leq 2.448 * X$

Fuente: Traducido y modificado de (ASPRS, 2014).

Además, existe un criterio para evaluar la componente de altura tal y como indica la tabla 11.

**Tabla 11.**

*Estándares de precisión vertical para datos de elevación digital*

Clase de precisión vertical	Exactitud Absoluta	
	RMSE <sub>z</sub> (cm)	Sin Vegetación NVA at 95% Nivel de confianza (cm)
<b>X-cm</b>	$\leq X$	$\leq 1.96 * X$

Fuente: Traducido de (ASPRS, 2014).

A continuación se presentan ejemplos de RMSE con la norma ASPRS con confiabilidad al 95%, tamaño del pixel aproximado y la escala del mapa a obtener (ver tabla 12).

**Tabla 12.**

*Precisión horizontal/ejemplos de calidad para datos planimétricos digitales*

ASPRS 2014				Equivalencia del mapa en:		Equivalencia de la escala del mapa en norma NMAS
Clase de precisión horizontal RMSE <sub>x</sub> y RMSE <sub>y</sub> (cm)	RMSE <sub>r</sub> (cm)	Precisión horizontal en el nivel de confianza del 95% (cm)	Tamaño del GSD aproximado en imágenes de origen (cm)	ASPRS 1990 Clase 1	ASPRS 1990 Clase 2	
27.5	38.9	67.3	13.8 to 27.5	1:1100	1:550	1:697
30.0	42.4	73.4	15.0 to 30.0	1:1200	1:600	1:760
45.0	63.6	110.1	22.5 to 45.0	1:1800	1:900	1:1200
60.0	84.9	146.9	30.0 to 60.0	1:2400	1:1200	1:1,600
75.0	106.1	183.6	37.5 to 75.0	1:3000	1:1500	1:2000

Fuente: traducido y modificado de (ASPRS, 2014).

## 2.7. Estadísticos del control de calidad

En este apartado se detallan algunos términos estadísticos y sus fórmulas:

### 2.7.1. Definiciones estadísticas

A continuación se detallan algunas definiciones de carácter estadísticos para este trabajo:

- Población.- “se refiere a todo el grupo o universo, los cuales tienen una variable común de estudio” (Murray & Larry, 2009); además, se puede distinguir entre población infinita (un número ilimitado de elementos) y población finita (Morales, 2012).

- Muestra.- “subconjunto de elementos representativos de la población, que se utiliza, para estudiar una población mucho más grande” (Pérez F. , 2006).
- Margen de error (e).- Según Lara, Cerpa, Rodríguez y Núñez (2006), el margen de error es un valor en porcentaje que indica el error máximo aceptado en el proceso de medición. Se describe en un intervalo, entre el valor medido  $\pm$  el error de la medición (Citado en Lisintuña y Molina, 2017, p. 71).
- Nivel de confianza.- Según Triola (2004), “es un valor expresado en porcentaje que expresa la certeza de que el dato se encuentre dentro del margen de error; las opciones más comunes son 90%, 95% y 99%” (Citado en Lisintuña y Molina, 2017, p. 72).
- Distribución normal.- “es conocida como una distribución de probabilidad continua o también, curva normal o distribución gaussiana” (Murray & Larry, 2009).
- Error.- en fotogrametría se define como “diferencia entre el valor medido y real; de los cuales se considera valor real a las coordenadas de los puntos de control fotogramétrico” (Quirós, 2014).
- Error de muestreo.- se define como el error permitido o tolerado en un proceso (Kirby, 2007); además, se indica la ecuación 16 al despejar  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\sigma \cdot Z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \quad [16]$$

Donde:

- $\tau$ , representa el valor del error de muestreo.
  - $\sigma$ , representa la desviación estandar.
  - $Z_{\alpha/2}$ , representa el valor del área bajo la curva de la distribución normal.
  - $n$ , representa la cantidad de elementos.
- Error media cuadrático.- (RMSE).- La raíz cuadrada del promedio del conjunto de diferencias cuadradas entre los valores de coordenadas del conjunto de datos y los valores de coordenadas de una fuente independiente de mayor precisión para puntos idénticos (ASPRS, 2014).
  - Intervalo de confianza para la media.- Según Bianco y Martínez (2004), se define como “un rango de valores, calculado en una muestra, que señala el valor del parámetro estimado con su margen de error” (citado en Lisintuña y Molina, 2017, p. 74); además, se indica la ecuación 17 según Sáez (2012):

$$\bar{x} \pm \frac{t_{\alpha/2} \cdot S}{\sqrt{n}} \quad [17]$$

Donde:



- $\bar{x}$ , representa el valor de la media.
  - $t_{\alpha/2}$ , representa el valor del área bajo la curva de la distribución t-student, a cierto nivel de confianza.
  - $S$ , representa el valor de la desviación estándar de la población.
  - $n$ , representa la cantidad de elementos de la muestra.
- 
- Sigma 0.- en la aerotriangulación indica la precisión general del ajuste; además, refleja la precisión de la medición de las coordenadas en la imagen, siempre y cuando las coordenadas de la imagen tengan un peso de 1.0. El valor es menor cuando se eliminan errores en los GCP y errores sistemáticos; al mismo tiempo dicho valor es utilizado como factor de escala en otros criterios estadísticos como desviación estándar, elipses de error, y otras pruebas estadísticas; así mismo, el valor está influenciado por: calidad de las imágenes, tamaño de píxel, puntos de control (precisión, señalado, natural), tipo de terreno (algoritmo de correlación), distribución de puntos de enlace, calidad de la cámara, posibilidad de compensar los efectos sistemáticos y observaciones GPS (Hinsken & Miller, 2002).
  - Elipses de error.- Son objetos bidimensionales en un plano de coordenadas (plano XY o YZ). La elipse de error es un intervalo bidimensional alrededor de un punto, de tal manera que permanece dentro de la elipse con una probabilidad del 95%; dicho criterio ayuda a evaluar la precisión de los puntos y los centros de proyección después del ajuste de aerotriangulación (Hinsken & Miller, 2002).

- Error medio.- se define como el error posicional en un conjunto de valores para una dimensión (x, y o z); obtenida al sumar todos los errores en una sola dimensión y luego dividir por el número total de errores para esas dimensiones (ASPRS, 2014), tal y como indica la ecuación 18:

$$\bar{x} = \frac{1}{(n)} \sum_{i=1}^n x_i \quad [18]$$

Donde:

- $\bar{x}$ , representa el error medio.
  - $n$ , representa la cantidad de elementos.
  - $x_i$ , representa los valores de diferencia de la coordenada observada menos el valor de la coordenada de control.
- Desviación estándar.- es una medida de dispersión, que indica cuanto se puede alejar un valor respecto a la media; representa el rango que puede tener un determinado valor (Kimera, 2018), siendo la ecuación 19:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [19]$$

Donde:

- $S_x$ , representa la desviación estándar.
- $x$ , representa el error en una dirección específica.
- $\bar{x}$ , representa la media del error.
- $n$ , representa la cantidad de puntos de la muestra.
- $i$ , representa un rango entre 1 y  $n$ .

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA

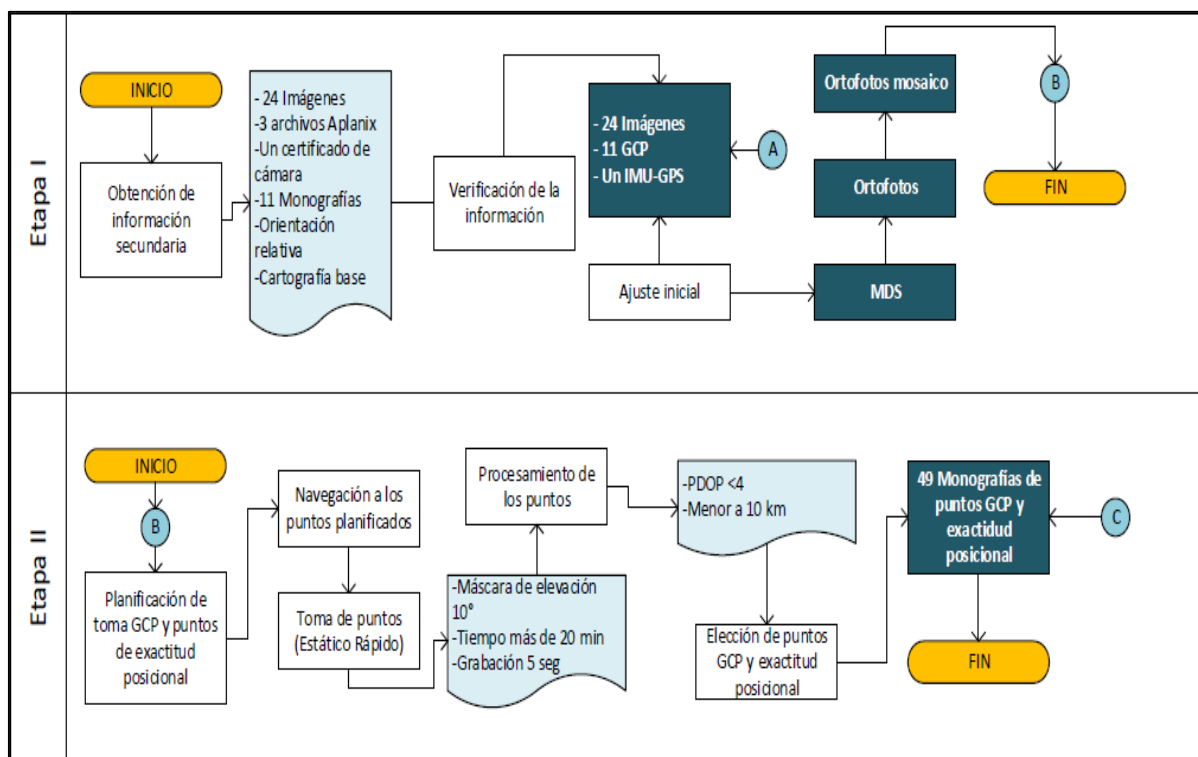
En este capítulo se presenta la metodología seguida del proceso fotogramétrico presentado en el marco teórico, excluyendo el contrato y la toma de imágenes, debido a contar con las imágenes de un vuelo realizado; por tanto, el capítulo se divide en: generalidades, recopilación de información secundaria, obtención de GCP de apoyo fotogramétrico-exactitud posicional, generación de ortofotos y el control de calidad de los productos.

#### 3.1. Generalidades

El presente estudio plantea analizar y comparar la influencia de los métodos de aerotriangulación existentes; así como, dos distribuciones espaciales de puntos de control fotogramétrico (GCP) en base a modificaciones de algunos autores, todo esto en programas como: LPS, ORIMA y ZI/Imagine, a fin de analizar su influencia sobre la exactitud posicional de las ortofotos, con estándares nacionales y la propuesta por ASPRS; por tanto, el desarrollo del proyecto, se definió en cuatro fases, que en términos generales se describen como:

- Fase 1.- Recopilación de información secundaria.
- Fase 2.- Generación de los GCP y puntos de exactitud posicional.
- Fase 3.- Generación de ortofotos con distribución homogénea de los GCP y métodos de aerotriangulación.
- Fase 4.- Analizar la exactitud posicional de los diferentes resultados.

En primer lugar, este estudio parte de una investigación previa del año 2015 titulada “Generación de ortofotos y cartografía 2D y 3D mediante procesos fotogramétricos digitales con Intergraph Erdas Imagine” cuyo autor es Barragán G., en cuya investigación se validan varias consideraciones como: imágenes, escala, IMU/GPS, altura de vuelo, traslapos e información de la cámara; en segundo lugar, la obtención de los GCP y puntos de exactitud posicional se realiza con tecnología GNSS y considerando una distribución homogénea dentro de la zona de estudio; así mismo, la aplicación de los métodos de aerotriangulación dependen de las facilidades del programa. Finalmente, el análisis sobre los productos fotogramétricos se realizará en base a los estándares antes expuestos; así pues, cada paso se describe de forma general en la Figura 51.



➔ *Continúa*

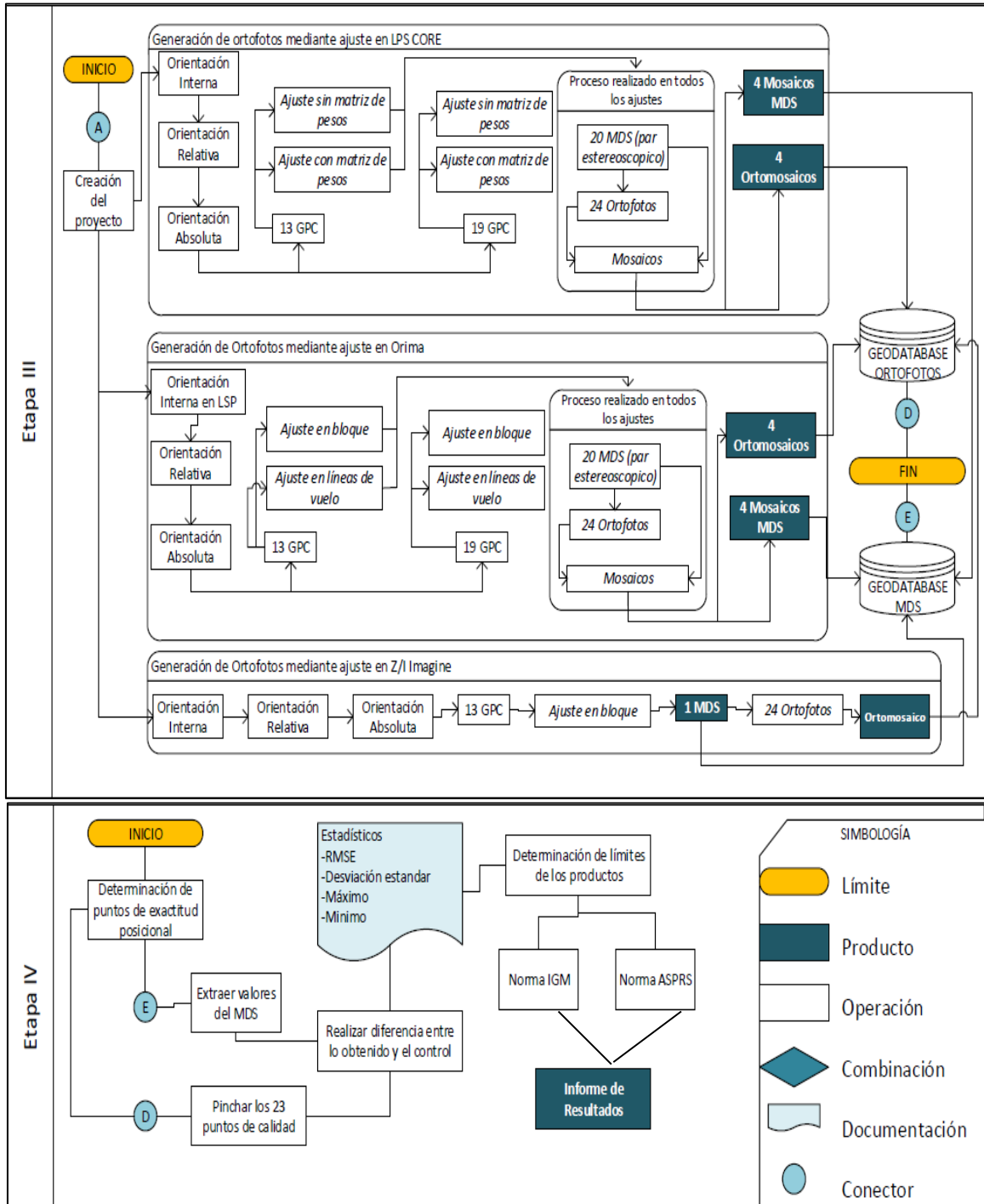


Figura 51. Metodología general del proyecto

### 3.2. Recopilación de información secundaria.

Se recopiló información secundaria como: imágenes, IMU/GPS, altura de vuelo, escala, traslapes e información de la cámara, de instituciones como: Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) e IGM, detalladas a continuación:

#### 3.2.1. Imágenes

Con petición formal al Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción (ESPE), se adquirieron 24 imágenes tomadas con cámara fotogramétrica matricial “Vexcel UltraCam XP”, con las bandas R, G, B, IR, cuya fecha de toma y línea de vuelo a la que pertenecen, se detallan en la tabla 13.

**Tabla 13.**

*Fecha y línea de vuelo de la imágenes utilizadas en el proyecto*

<b>Imágenes Entregadas del Proyecto Mejía Rumiñahui 30 cm</b>				
<b>Línea</b>	<b>Número de foto:</b>			<b>Fecha de toma</b>
	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Total</b>	
<b>18</b>	537	542	6	9 de Agosto 2012
<b>19</b>	829	834	6	19 de Septiembre 2012
<b>20</b>	930	935	6	19 de Septiembre 2012
<b>21</b>	1240	1245	6	19 de Enero 2013
			24	

Fuente: (Barragán, 2015).

En el entorno de trabajo de LPS, ORIMA y Z/I Imagen se decidió trabajar solo con las bandas R, G, B, de las 4 disponibles, dicha separación de bandas se realizó en Erdas Imagine y el formato

de exportación fue de TIFF con sus layers piramidales; además, los traslpos de las imágenes según Barragán (2015), son de 30% en transversal y 60% en longitudinal.

### 3.2.2. Escala y altura de vuelo

En el apartado 2.1.5 “Cámaras fotogramétricas” y de Barragán (2015), se indica que las imágenes digitales no tienen una escala definida; por tanto, se realiza una recopilación de información del tamaño de GSD en función de la escala y altura de vuelo con normativas nacionales, IGN de Perú y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia, para la toma de un proyecto similar, detallados en la tabla 14.

**Tabla 14.**

*Relación del GSD y escala de la foto para imágenes digitales.*

Altura de vuelo aproximada	GSD [cm]	Escala de la foto	Autor
5000 m	30	1: 50 000	(IGM, 2010)
-----	28	1: 20 000	(IGM, 2006)
-----	42	1: 30 000	
-----	30	1: 15 000	(IGN, 2011) de Perú
-----	15	1: 10 000	(IGAC, 2007)

Fuente: (Barragán, 2015)

Además, según la ASPRS (2014), existe una relación entre escala de la foto, altura de vuelo, GSD y la escala del mapa; en donde, para obtener un GSD de 30 cm la altura de vuelo es de 2200m, cuya la escala de la foto es 1: 14 400 (ver tabla 15).



**Tabla 15.**

*Relación entre escala de la foto y escala del mapa derivado.*

<i>Escalas comunes de fotografía (con cámara de formato de película de 9" y lente de 6")</i>				
<i>Escala de la foto</i>	1:3,600	1:7,200	1:14,400	1:28,800
<i>Alturas de vuelo</i>	550 m	1,100 m	2,200 m	4,400 m
<i>Distancia aproximada de muestreo de tierra (GSD) de escaneo</i>	7.5 cm	0.15 m	0.3 m	0.6 m
<i>Escalas compatibles de mapas / ortoimágenes e intervalos de curva</i>				
<i>GSD</i>	7.5 cm	15 cm	30 cm	60 cm
<i>Intervalo de curva</i>	30 cm	60 cm	1.2 m	2.4 m
<i>Escala del mapa</i>	1:600	1:1,200	1:2,400	1:4,800

Fuente: Modificado de (ASPRS, 2014)


Así mismo, existe una ecuación para calcular la altura de vuelo propuesta por Comer, Kinn, Light y Mondello (1998), en la que relaciona el producto entre el tamaño del pixel en el terreno (GSD), la distancia focal (f) de la cámara, sobre el tamaño del pixel en la cámara (CCD), representada en la ecuación 20 y reemplazando los datos se tiene:

$$\text{Altura de vuelo} = \frac{GSD * f}{CCD} = \frac{0.30 [m] * 0.1005 [m]}{0.000006 [m]} = 5025 [m] \quad [20]$$

Por lo expuesto anteriormente, existen diferentes apreciaciones en la escala de la foto y altura de vuelo; por tanto, en este estudio se siguen las recomendaciones de Barragán (2015) y la normativa del IGM (2010), con una altura de vuelo de 5000 m.

### 3.2.3. Información de la cámara

El IGM entregó un documento llamado certificado de calibración (ver Figura 52), perteneciente a la cámara que se empleó en la toma de las imágenes, cuyas características se han visto en el apartado 2.2.4 “Certificado de Calibración” y los valores más relevantes son: tamaño del pixel ( $6\mu\text{m}$ ), distancia focal (100.5 mm), y el punto principal de autocolimación (PPA).

Calibration Report			
Geometric Calibration			
			
<b>ULTRACAM</b> Large Format Digital Aerial Camera			
Camera:	UltraCam Xp, S/N UC-SXp-1-40112365		
Manufacturer:	Vexcel Imaging GmbH, A-8010 Graz, Austria		
Panchromatic Camera:	ck = 100.500mm		
Multispectral Camera:	ck = 100.500mm		
Date of Calibration:	Jul-26-2010		
Date of Report:	Aug-18-2010		
Camera Revision:	1.0		
Revision of Report:	1.0		
Panchromatic Camera			
Large Format Panchromatic Output Image			
Image Format	long track	67.860mm	11310pixel
	cross track	103.860mm	17310pixel
Image Extent		(-33.93, -51.93)mm	(33.93, 51.93)mm
Pixel Size		6.000 $\mu\text{m}$ *6.000 $\mu\text{m}$	
Focal Length	ck	100.500mm	$\pm 0.002\text{mm}$
Principal Point (Level 2)	X_ppa	0.000 mm	$\pm 0.002\text{mm}$
	Y_ppa	0.120 mm	$\pm 0.002\text{mm}$
Lens Distortion	Remaining Distortion less than 0.002mm		
Multispectral Camera			
Medium Format Multispectral Output Image (Upscaled to panchromatic image format)			
Image Format	long track	67.860mm	3770pixel
	cross track	103.860mm	5770pixel
Image Extent		(-33.93, -51.93)mm	(33.93, 51.93)mm
Pixel Size		18.000 $\mu\text{m}$ *18.000 $\mu\text{m}$	
Focal Length	ck	100.500mm	
Principal Point (Level 2)	X_ppa	0.000 mm	$\pm 0.002\text{mm}$
	Y_ppa	0.120 mm	$\pm 0.002\text{mm}$
Lens Distortion	Remaining Distortion less than 0.002mm		

**Figura 52.** Certificado de calibración Vexcel Ultracam XP

Fuente: (Vexcel Imaging, 2010)

Considerando el certificado de calibración, el punto principal de autocolimación (PPA) puede variar dependiendo de la rotación de la cámara; por tanto, se solicitó información de la cámara al IGM (ver Figura 53).

```

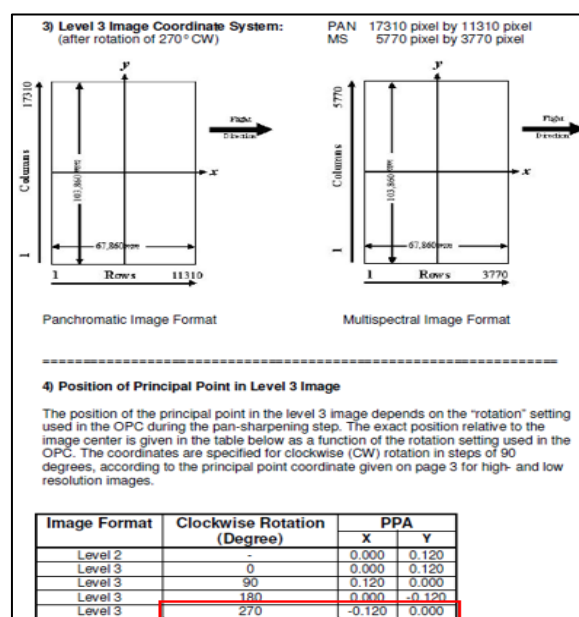
camera: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

begin camera_parameters Ecuador_UCXP
  focal_length: 100.5
  film_format: 67.86000000000257 103.8600000000039
  lens_distortion_flag: off
  post_correction_grids_enabled: off
  io_required: no
  camera_type: frame
  media_type: digital
  pixel_size: 6.000000000000227 6.000000000000227
  image_size_in_pixels: 11310 17310
  scanline_orientation: 4
  photo_coord_sys_orientation: 1
  photo_coord_sys_origin: 5634.5 8654.5
  focal_length_calibration_flag: off
  ppac_calibration_flag: off
  self_calibration_enabled_params: 0
  inertial_stabilization: off
end camera_parameters

```

**Figura 53.** Detalles de la cámara usada en proyectos fotogramétricos  
Fuente: (IGM, 2018).

Los valores obtenidos confirman la información entre el certificado de calibración y los utilizados por el IGM; sin embargo, el sentido de la rotación no se encuentra claramente; por tanto, según Barragán (2015), el valor del punto principal de autocolimación pertenece a una rotación de 270 grados (ver Figura 54).



**Figura 54.** PPA con rotación de 270 grados.  
Fuente: (Vexcel Imaging, 2010)

### 3.2.4. IMU/GPS

Se obtuvieron varios archivos, entregados por el IGM a la ESPE, llamados archivos APLANIX (ver Figura 55), que son los metadatos de las imágenes y que contienen información como: versión de uso, path de las imágenes descargadas, parámetros geodésicos, parámetros de la toma de vuelo, sistema de referencia, coordenadas de los centros de las imágenes, ángulos de rotación, altura ortométrica, línea de vuelo, orden de la toma, entre otras.

```

APLANIX.txt: Bloc de notes
-----
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
-----
POS exterior orientation computation utility      Version  3.3
Copyright (C) 1997-2008 by Applanix Corporation [Sep 24 2009]
All Rights Reserved.
-----
Parameter setup:
POSPROC SBT file: D:\CENTROS DIGITAL 2012-XP\09ago2012\APQ-09AGO\Mission 1\Proc\shot_Mission 1.out
Camera mid-exposure event file: D:\CENTROS DIGITAL 2012-XP\09ago2012\APQ-09AGO\Mission 1\Extract\event1_Mission 1.da
Event time shift: 0.000000 sec
Photo ID file: D:\CENTROS DIGITAL 2012-XP\09ago2012\APQ-09AGO\Mission 1\Extract\photoID1_Mission 1.txt
Photo ID file format: 3 Fields: (Time, Photo ID, Delay) format
Offset between PHOTO ID and EVENT file times: 0.000000 sec
PHOTO ID time tolerance: 0.300000 sec
wgs84 Height Output Selected
Mapping frame datum: wgs84 ; a = 6378137.000000; 1/f = 298.000000;
Coordinate transformation from WGS84 to mapping frame datum
dx = 0.000000; dy = 0.000000; dz = 0.000000; f = 1.000000000000;
R1 = 0.000000000000; R2 = 0.000000000000; R3 = 0.000000000000;
Sequence of the rotations: x,y,z,1
Mapping frame projection: TM
Central meridian = -81.000000 deg;
Latitude of the grid origin = 0.000000 deg; grid scale factor = 0.000000;
False easting = 500000.000000 m; false northing = 1000000.000000 m;
Sequence of the rotation from mapping to image frames:
First rotation is about the 'x' axis by the 'omega' angle.
Second rotation is about the 'y' axis by the 'phi' angle.
Third rotation is about the 'z' axis by the 'kappa' angle.
Kappa cardinal rotation: 0.000 deg
Boresight values: tx = -0.7800 arc min, ty = 0.0180 arc min, tz = 24.4980 arc min.
Lever arm values: lx = 0.0000 m, ly = 0.0000 m, lz = 0.0000 m.
Shift values: X = 0.000000 meter, Y = 0.000000 meter, Z = 0.000000 meter

POS/AV Computed Data at camera Perspective Centre
Grid: Universal Transverse Mercator ;Zone: UTM South 17 (84w to 78w) ;Datum: WGS84 ;Local Transformation: NONE ;
Record Format:
ID, # EVENT, TIME (s), EASTING, NORTHING, ORTHOMETRIC HEIGHT, OMEGA, PHI, KAPPA, LAT, LONG
(position in Meters, orientation in Degrees, lat, long in Deg)

308 2 395312.707427 754227.847 9919832.673 7519.657 -2.60915 3.95408 48.09875 -0.72471841 -78.715746
309 3 395379.615484 756238.130 9918635.183 8365.443 -0.00048 0.03373 -125.18911 -0.73553444 -78.697687
310 4 395587.531204 756852.075 9919531.282 8566.157 -0.02723 -0.00896 -124.85576 -0.72743093 -78.692178
311 5 395795.174270 757467.913 9920425.853 8366.771 0.02950 0.03403 -125.13805 -0.71914176 -78.686652
312 6 395603.147214 758078.512 9921322.995 8365.928 0.00775 0.00033 -124.34955 -0.7122844 -78.681173
313 7 395610.864810 758688.433 9922222.666 8364.912 -0.06593 0.00751 -124.89377 -0.70309281 -78.675700

```

**Figura 55.** Ejemplo de archivo APLANIX

Fuente: (IGM, 2012)

Para convertir un archivo APLANIX a un archivo IMU/GPS se debe someter a un proceso de depuración y así obtener las coordenadas de los centros con sus rotaciones; además, se debe corregir el tipo de altura; que en base a una entrevista con el director de aerotriangulación del IGM, Ing. Lenin Jaramillo manifiesta que “la altura expuesta en el archivo Aplanix es de carácter ortométrico corregida con el modelo EGM96”; con respecto a la información de las coordenadas, ángulos y línea de vuelo, son tal y como indica Barragán (2015) en su trabajo.

Considerando todos los parámetros anteriores, se procedió a seleccionar las coordenadas de los centros, rotaciones de la cámara (IMU/GPS) y la altura ortométrica, siendo esta última sujeto a depuración, debido a que utiliza el modelo EGM96 y según Tierra (2009), el modelo geoidal mencionado puede llegar a tener errores en el Ecuador de hasta 4m al reducir de altura elipsoidal a altura ortométrica; así pues, se obtuvo la ondulación geoidal con el programa F477 geoid, propuesto por “The National Geospatial Intelligence (NGA)/NASA”, respecto del elipsoide de referencia WGS84 (NGA/NASA, 2018), a fin de obtener la altura elipsoidal, proceso que es detallado en el Anexo1; así pues, el archivo IMU/GPS con las coordenadas y los ángulos de rotación, se muestran en la tabla 24 del apartado 4.1.1 del capítulo de resultados; posteriormente, al archivo IMU/GPS se convierte en un archivo de formato txt, requerido en la importación en distintos programas fotogramétricos (ver Figura 56).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
1	18_537	779600.63			9967843.603	8169.182
2	18_538	779601.626			9966757.464	8173.792
3	18_539	779606.87			9965671.801	8176.02
4	18_540	779608.866			9964587.236	8182.397
5	18_541	779611.025			9963501.216	8188.567
6	18_542	779610.071			9962415.35	8192.357
7	19_829	782920.95			9967843.163	8061.632
8	19_830	782924.813			9967396.877	8079.186
9	19_831	782920.221			9965671.433	8090.674
10	19_832	782910.383			9964585.809	8090.774
11	19_833	782903.72			9963500.567	8087.801
12	19_834	782910.113			9962414.371	8077.443
13	20_930	786049.019			9967842.943	7937.704
14	20_931	786038.15			9966756.893	7938.27
15	20_932	786047.979			9965670.502	7942.211
16	20_933	786053.574			9964584.996	7941.944
17	20_934	786066.23			9963499.417	7941.904
18	20_935	786072.414			9962413.6	7941.751
19	21_1240	789242.761			9962417.508	7970.547
20	21_1241	789237.764			9963503.244	7968.981
21	21_1242	789232.637			9964588.848	7967.548
22	21_1243	789232.489			9965674.486	7967.643
23	21_1244	789229.065			9966759.892	7969.621
24	21_1245	789224.838			9967845.702	7970.452

**Figura 56.** IMU/GPS de importación

Fuente: (IGM, 2012)

### 3.2.5. Recopilación de monografías y bloque fotogramétrico con puntos Von Gruber.

Mediante petición formal, se solicitó la información de once monografías de los GCP y un bloque fotogramétrico con la orientación relativa generada por Barragán (2015), con el fin de generar una ortofoto preliminar con parámetros por defecto (Molina, Redondo, Zamorano,

Hermosilla, & Caturla, 2010), que servirán como insumos para la navegación y posterior captura de puntos de apoyo fotogramétrico y de exactitud posicional.

El resultado de las monografías (ver tabla 25) y el bloque fotogramétrico con los puntos Von Gruber se presenta en el apartado 4.1.2, cuya ortofoto preliminar se muestra en la Figura 57.



*Figura 57.* Ejemplo de ortofoto preliminar.

### **3.3. Obtención de los GCP de apoyo fotogramétrico y de exactitud posicional**

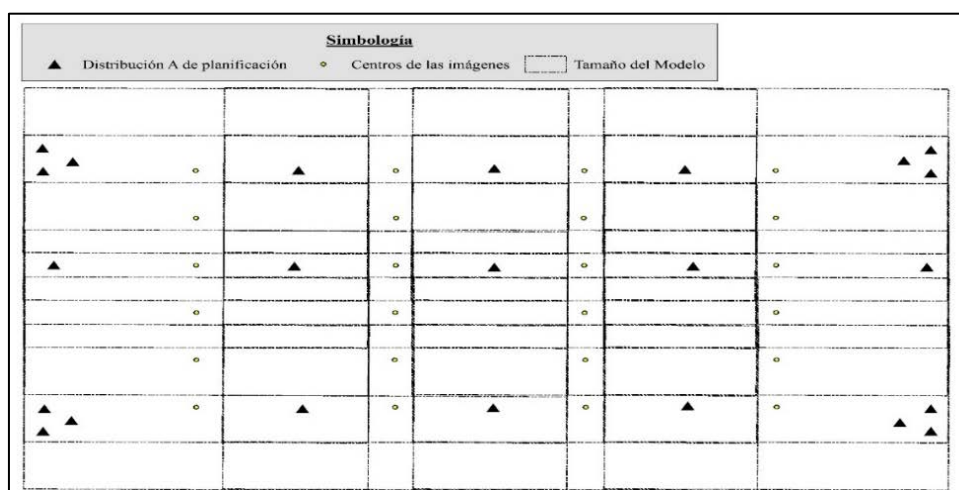
En el apartado 2.2.3.4 “Puntos de apoyo fotogramétrico (GCP)” se indica la importancia de un GCP; así como, el uso que tendrán los mismos. Los puntos fueron planificados en base las teorías expuestas en 2.5.1 “Ubicación de los puntos de control fotogramétrico”, obtenidos y procesados como se indica a continuación:

#### *3.3.1. Planificación*

En la planificación de la toma de GCP del apoyo fotogramétrico y las muestras de la exactitud posicional se consideró el método de posicionamiento, estaciones REGME más cercanas, tiempo de posicionamiento, máscara de elevación, distribución apropiada, accesibilidad, entre otras;

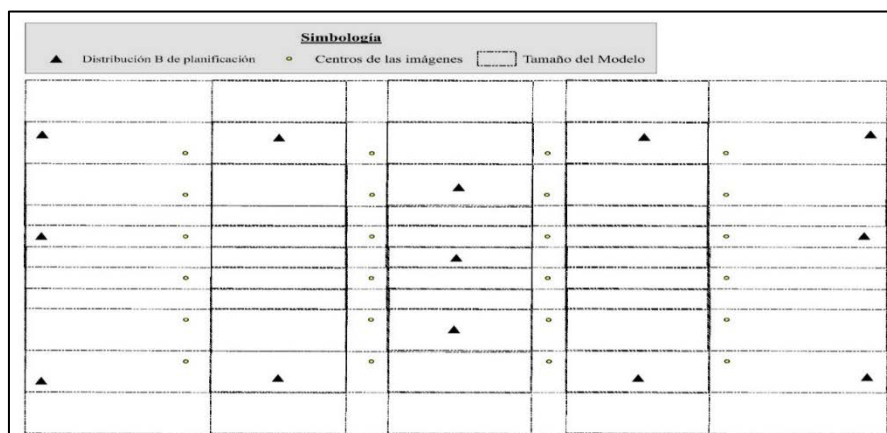
detalladas en el apartado 2.2.3 “Control geodésico o control terrestre” y las teorías expresadas en 2.5 “Distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico (GCP)”.

Las distribuciones de los GCP fueron elegidas en base a las teorías de los siguientes autores: según Ackermann (1990), al ubicar los puntos en las esquinas del proyecto de una manera múltiple y según el IGN de Perú (2011), con puntos distribuidos homogéneamente cada tercer modelo perpendicular a las líneas de vuelo y en zonas de triple traslapo; (ver Figura 58), a la que se denomina “Distribución A de planificación” con una total de 23 GCP



**Figura 58.** Distribución A de planificación

Segundo, considerando lo expuesto por Ackermann (1987), se distribuye los puntos al contorno del proyecto; además de puntos en el interior en zonas de triple traslapo, expuesto por el Departamento de Transporte de Colorado (2015) y Milkhail et al. (2001), dando un total de 13 GCP (ver Figura 59), y se lo denomina “Distribución B de planificación”.



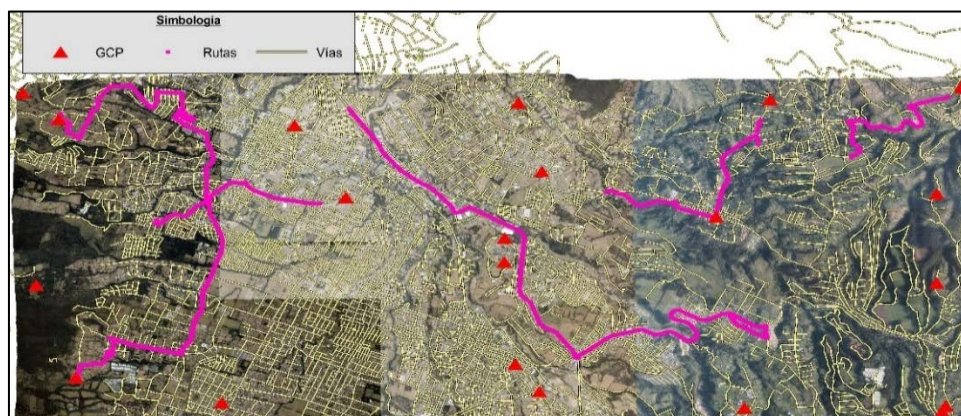
**Figura 59.** Distribución B de planificación.

A pesar de seguir las consideraciones del apartado 2.5.1 “Ubicación de los puntos de control fotogramétrico” se realizaron ciertas modificaciones en campo debido inconvenientes como: inexistencia del objeto planificado, lugares con accesos privados y temporalidad muy larga entre las líneas de vuelo 20 y 21; por tanto, las muestras de campo de los GCP obtenidos se presentan en el apartado 4.2.1.

### 3.3.2. Navegación y toma de puntos

La navegación a los puntos se realizó mediante un equipo GPS navegador marca Magellan Triton, conectado a un computador con un Sistema de Información Geográfico denominado ArcGis, el cual contiene la ortofoto preliminar, además de la cartografía básica de la zona de acceso libre obtenida del Geoportal del IGM; este proceso es detallado por Kirby (2009), en su trabajo “Metodología para navegación en Arcgis a través del uso del GPS”; por tanto, en la Figura 60 se muestra las rutas seguidas y los puntos obtenidos.





**Figura 60.** Navegación a los GCP y puntos de control posicional.

Así pues, se realizaron ocho salidas de campo, para obtener un total de 48 puntos (ver tabla 16), rastreados con un equipo GNSS marca Trimble R3 de una frecuencia y las mediciones al ápice de la muesca de la antena.

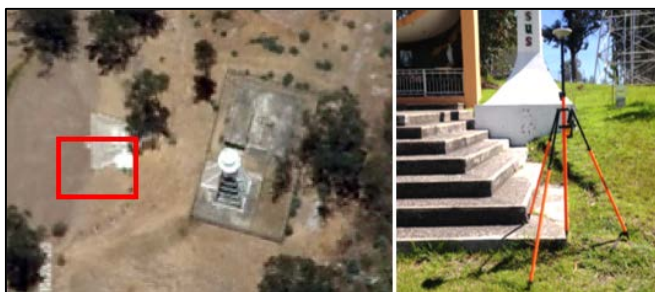
**Tabla 16.**

*Fechas y cantidad de puntos obtenidos en campo.*

No	Fechas	Cantidad de puntos obtenidos
<b>1</b>	20 de abril de 2016	3
<b>2</b>	22 de abril de 2016	5
<b>3</b>	30 de julio de 2016	4
<b>4</b>	31 de julio de 2016	2
<b>5</b>	13 de marzo de 2017	1
<b>6</b>	14 de marzo de 2017	11
<b>7</b>	15 de marzo de 2017	8
<b>8</b>	25 de septiembre de 2017	7
<b>Total de puntos</b>		<b>41</b>

Además, se siguieron varias recomendaciones de Kirby (2012), en la toma de puntos de control fotogramétrico GCP, detallados a continuación:

- Método de posicionamiento estático rápido (Fast Static), con una base (Estación REGME – EPEC) y un móvil (Trimble R3). La máxima distancia a la base fue de 7950 m y la distancia mínima de 40 m.
- Puntos foto identificables (ver Figura 61 y Figura 62) en varias zonas como: cruces de vías, construcciones, pasos a desnivel, entre otros.
- Tiempo de estacionamiento de 20 a 41 minutos y un ángulo de enmascaramiento de  $10^\circ$ .
- Número mínimo de satélites observados: 5 satélites y un PDOP  $< 4$ .



**Figura 61.** Lugar foto identificable sector ESPE.



**Figura 62.** Lugar foto identificable sector Alcazar 2.

### 3.3.3. Procesamiento

Los puntos fueron procesados con el software comercial Trimble Business Center, con el uso de candado de procesamiento, considerando la constelación GPS, sin efemérides finales siguiendo

las recomendaciones de Portilla, Tierra y Godoy (2016). La base fue fijada con las coordenadas de la base EPEC, la cual garantiza la consistencia de las coordenadas a partir del 17 de abril de 2016, ajustadas al ITRF08, época de referencia 2016.4; todo esto debido al evento sísmico que sufrió el Ecuador el 15 de abril de 2016; sin embargo, la vigencia de las coordenadas variará en función de la magnitud de las réplicas sísmicas (IGM, 2017).

Además, los GCP deben cumplir con ciertas características como: un PDOP menor a 4, precisión mayor a la cartografía a generar (ver apartado 2.6.4); por tanto, al utilizar el criterio del IGM, se tiene 0.1 por el módulo de la escala ( $0.1\text{mm} * 5000=500\text{mm}$ ), dando un valor de 50cm al evaluar cartografía 1:5000; sin embargo, también se puede aplicar la ecuación 21:

$$P_{GCP} = \frac{PH}{4} \quad [21]$$

Donde:

- $P_{GCP}$ , representa el valor de la precisión de los puntos de control de control fotogramétrico, con un valor de 25cm
- $PH$ , representa el valor de la precisión horizontal de la cartografía a generar, siendo escala 1:5000 con la norma ISO (0.2mm) ( $5000*0.2\text{mm}=1000\text{mm}$ ), siendo 1m.

De la misma forma, la norma Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data de la ASPRS de la tabla 12 el valor del RMSE del mapa es de 63.6cm (tamaño del GSD de 30 dentro

del intervalo de la tabla 12) y al aplicar la ecuación 11 se tiene, de la misma norma resulta 16cm en precisión X e Y de los puntos de control de exactitud posicional.

$$RMSE_x \text{ o } RMSE_y = \frac{1}{4} * [RMSE_{x-y}(Mapa)] = \frac{45 [cm]}{4} = 11.25 [cm] \quad [11]$$

Donde:

- $RMSE_x$  o  $RMSE_y$ , representa el valor de la precisión de los puntos de control de control fotogramétrico, con un valor de 11.25cm.
- $[RMSE_{x-y}(Mapa)]$ , representa el valor del RMSE del mapa, de la tabla 12 con un GSD de 30cm; es decir, 45cm en RMSE<sub>x</sub> o RMSE<sub>y</sub>

Entonces, se tiene que el procesamiento de los datos se descarta 5 puntos, debido a un PDOP mayor a 4, y a precisiones fuera de los límites, detallados en la tabla 17.

### **Tabla 17.**

*Informe de procesamiento de puntos con inconvenientes.*

ID	Norte [m]	Este [m]	Altura Elip. [m]	Tiempo [minut.]	P. Horizontal [m]	P. Vertical [m]	PDOP
<b>X100</b>	9963877.71	784411.76	2524.69	25	0.59	1.55	15.45
<b>I045</b>	9962449.41	781145.81	2537.25	25	0.01	0.01	11.41
<b>G026</b>	9962828.05	782527.12	2522.94	20	0.02	0.03	8.02
<b>K051</b>	9966866.13	777719.97	2801.54	20	0.01	0.02	4.32
<b>K050</b>	9962416.33	785065.98	2544.39	20	0.02	0.03	4.16

Nota: P (Precisión), Elip (Elipsoidal).

En total se obtuvieron 36 puntos con las condiciones descritas de GNSS y foto identificables aceptables, a las que se les añadió los puntos de control obtenidos por Barragán (2015) (ver tabla 25); sin embargo, se descartaron los puntos GCPG y GCPI al no contar con información del PDOP. Finalmente, la cantidad de puntos en el ajuste fotogramétrico y puntos de control en la exactitud posicional fueron de 45 puntos, cuyos detalles de precisiones están bajo los límites de la norma más estricta (Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data=16cm) se indican en la tabla 26 y su localización en la Figura 128 respectivamente del apartado 4.2.2 de los resultados; además, la documentación de cada punto está representada en una monografía, cuyas características se han visto en el apartado 2.5.2 “Documentación de puntos de control” y sus resultados en el mismo apartado.

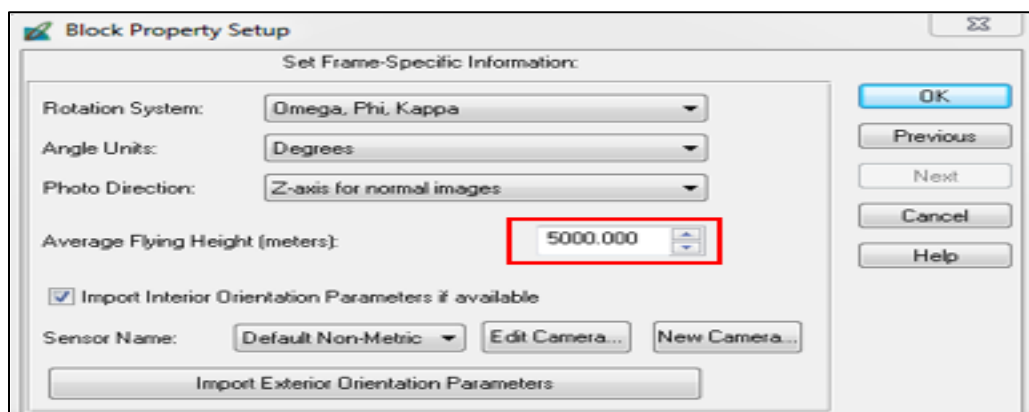
### **3.4. Generación de ortofotos mediante ajuste en LPS Core**

El ajuste fotogramétrico se realizó en el programa LPS Core cuyas características, modelos matemáticos y funcionalidades son detalladas en el apartado 2.4.1 “Erdas-LPS”; por tanto, en LPS se realiza la creación del proyecto, importación de los centros, las diferentes orientaciones, la aerotriangulación por diferentes métodos, generación de MDS, las ortofotos y los diferentes mosaicos. Este proceso se realiza con la distribución 19 y 13 de los puntos de control fotogramétrico (GCP).

### 3.4.1. Generación de ortofotos sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS

#### 3.4.1.1. Creación del bloque en LPS

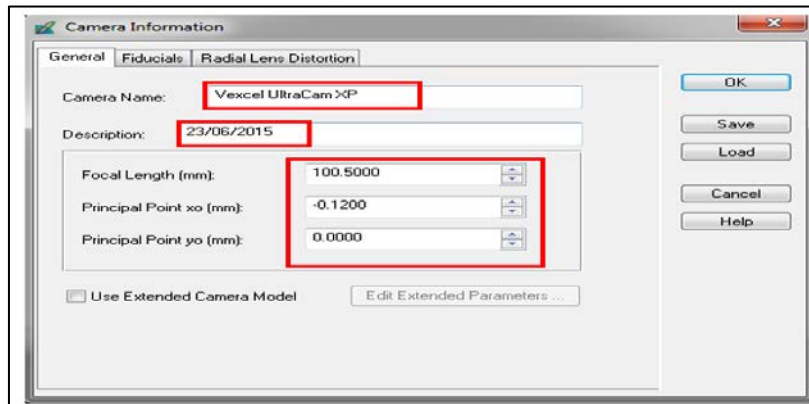
En el programa fotogramétrico ERDAS Imagine 2011 se debe elegir el módulo LPS para la creación del proyecto fotogramétrico y escoger en “Model Setup”, el sensor de cámara digital; posteriormente, ingresar el sistema de coordenadas WGS84 proyección UTM zona 17 Sur y una altura de vuelo de 5000m del apartado 3.2.2 “Escala y altura de vuelo” y ejemplificado en la Figura 63. La explicación detallada de este proceso, así como la orientación interior se manifiesta a detalle en el Anexo 3.



**Figura 63.** Altura de vuelo ingresada en el programa.

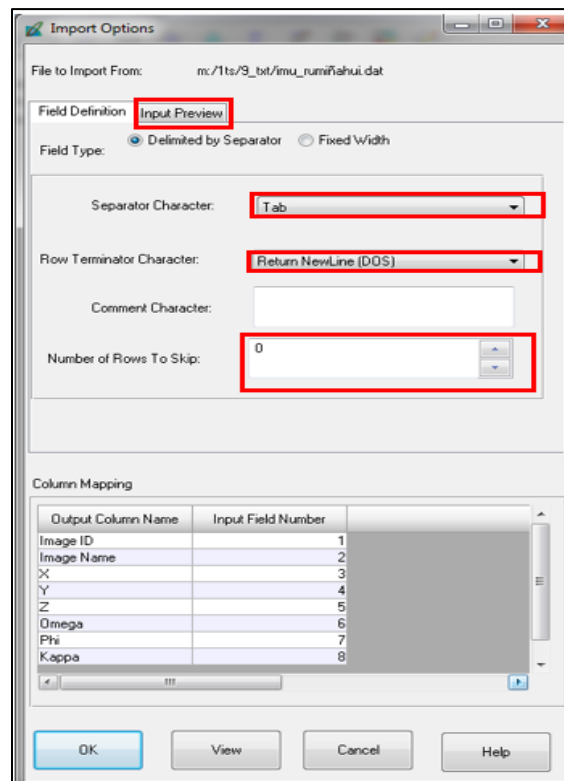
#### 3.4.1.2. Ingreso de los parámetros de la cámara y centros IMU/GPS

A continuación se procede a ingresar los valores de acuerdo al certificado de calibración de la cámara digital, vistos en el apartado 3.2.3 y ejemplificado en la Figura 64.



**Figura 64.** Parámetros de la cámara.

Posteriormente, se debe insertar el IMU/GPS del apartado 4.1.1 en formato txt (ver Figura 65) en la pestaña “Import Exterior Orientation Parameters” de la ventana Block Property Setup.



**Figura 65.** Izq. Importación IMU/GPS.

Culminados los pasos anteriores, se procede a direccionar todas imágenes del archivo IMU/GPS, que contienen las tres bandas (RGB) y cuentan con sus layers piramidales, teniendo un entorno de trabajo como la Figura 66, donde el color verde representa los pasos terminados.

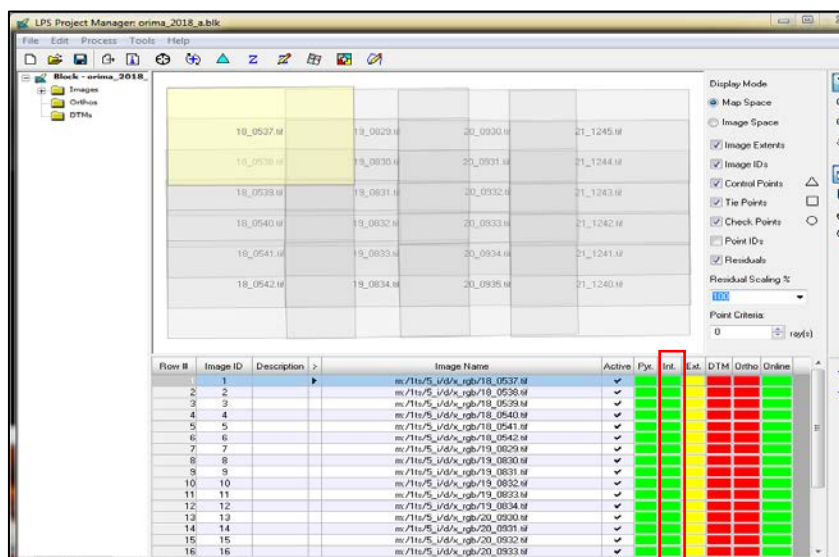
Row #	Image ID	Description	Image Name	Active	Pyr	Int	Ext	DTM	Ortho	Index
1	1		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\10_0537.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
2	2		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\18_0538.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
3	3		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\18_0539.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
4	4		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\18_0540.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
5	5		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\18_0541.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
6	6		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\18_0542.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
7	7		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0829.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
8	8		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0830.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
9	9		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0831.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
10	10		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0832.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
11	11		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0833.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
12	12		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\19_0834.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
13	13		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\20_0930.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
14	14		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\20_0931.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
15	15		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\20_0932.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green
16	16		m:\1ts\5_vdgp\c_rgb\20_0933.tif	✓	Green	Red	Red	Red	Red	Green

**Figura 66.** Imágenes direccionadas.

### 3.4.1.3. Configuración de la orientación interior en LPS

Como se indicó en el apartado 2.2.5, la orientación interna de la cámara digital viene dada por el certificado de calibración; por tanto, se incluyen los valores del apartado 3.2.3 “Información de la cámara” pertenecientes a un tamaño de pixel de  $6\mu\text{m}$  y se aplica para todas las imágenes activas en el menú “Interior Orientation” de la ventana “Digital Camera Frame Editor”; así pues, en la ventana general de LPS en la columna “Int” se vuelve de color verde, indicando que el proceso ha finalizado (ver Figura 67).



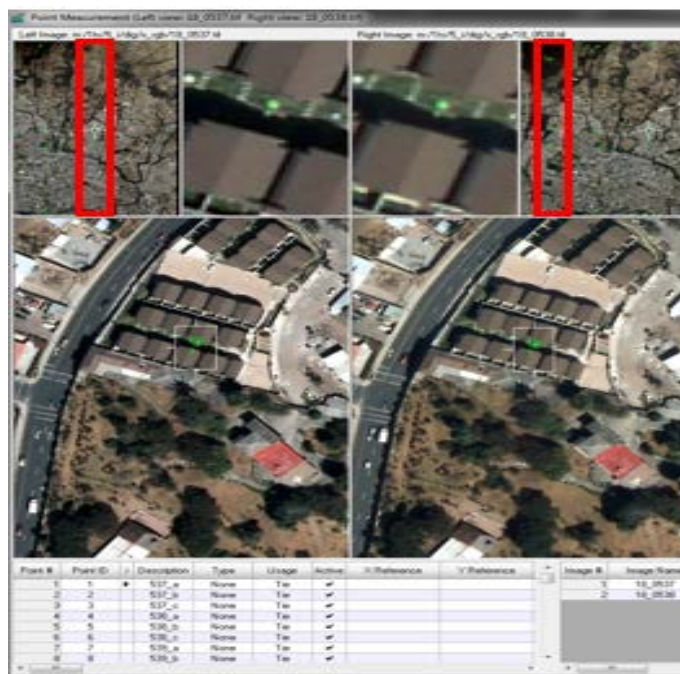


**Figura 67.** Proyecto con orientación interior.

#### 3.4.1.4. Configuración de la orientación relativa en LPS

Como se indicó en el apartado 2.2.6.1, la orientación relativa se relaciona cada objeto de una imagen con su homólogo en la imagen posterior, usando la distribución de la teoría de los puntos de Von Gruber visto en el apartado 2.2.6.2. Este proceso en LPS Core es de forma monocópica (vista 2D) y se deben tener en cuenta las distorsiones de las imágenes tales como: distorsión por parámetros de orientación, por el relieve, por la inclinación de la imagen, entre otras; detalladas en el apartado 2.1.8 “Distorsiones y afectaciones fotogramétricas”

Por tanto, se procede a importar los puntos de la orientación relativa de Barragán (2015), que fueron pinchados manualmente por el autor y con ayuda de la herramienta Point Measurement, siguiendo la conceptualización del apartado 2.2.6.2 “Puntos de Von Gruber (ver Figura 68), logrando 72 puntos de Von Gruber en total.



**Figura 68.** Distribución puntos Von Gruber.

### 3.4.1.5. Configuración de la orientación absoluta con 13 GCP en LPS

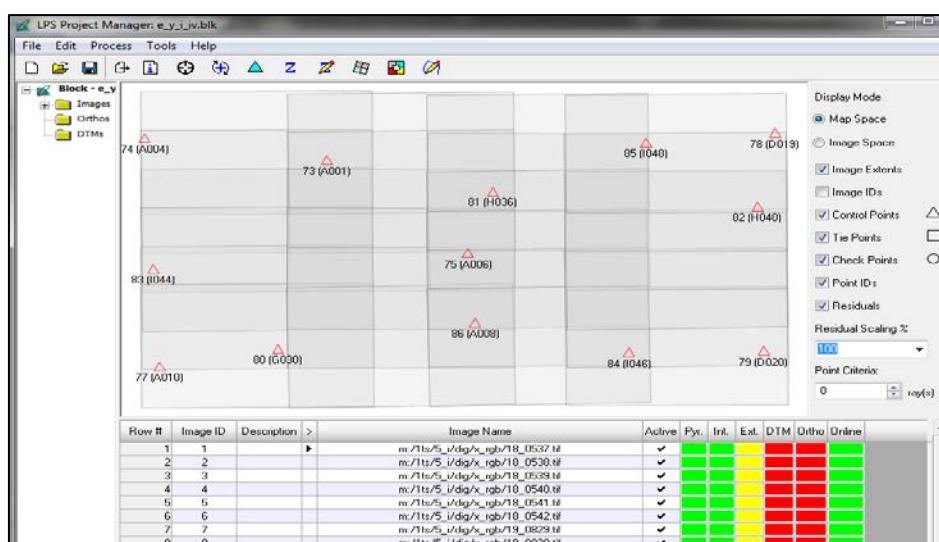
Como se indicó en el apartado 2.2.6.3 “Orientación absoluta”, los puntos de control escalarán el modelo con respecto al terreno; por tanto, se procede a pinchar los 13 puntos de control (GCP) de la tabla 18, en todas las imágenes a lo largo del proyecto.

#### **Tabla 18.**

*Identificadores de los GCP en la Distribución 13.*

NO	13 GCP		
1	A001	D019	I044
2	A004	D020	I046
3	A006	G030	I048
4	A008	H036	
5	A010	H040	

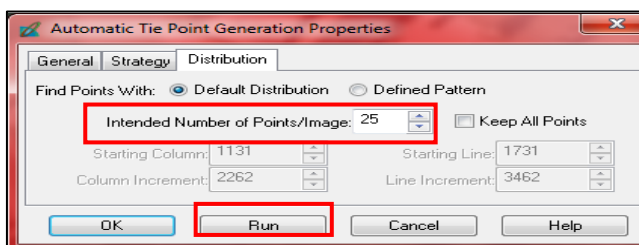
La distribución de los puntos de control pinchados vistos desde la ventana general de LPS se indica la Figura 69; además, vale destacar que el valor de altura de los GCP en el los programas LPS y Orima son de carácter elipsoidal con el fin analizar la influencia directa de la aerotriangulación sobre los productos; debido a que la transformación de altura elipsoidal a altura ortométrica puede tener errores de hasta 4m dependiendo del modelo geoidal usado (EGM96 o EGM08) (Tierra, 2009) .



**Figura 69.** Distribución 13 en Erdas - LPS

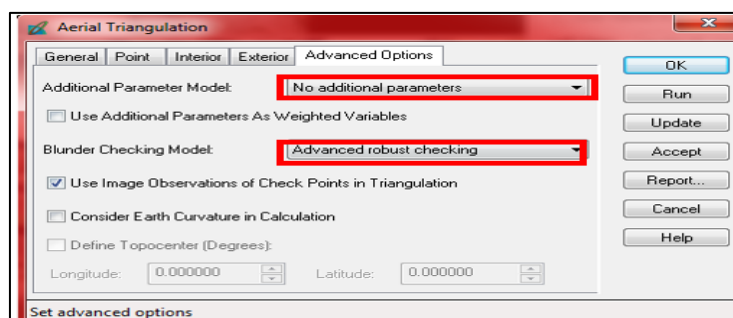
### 3.4.1.6. Configuración de la aerotriangulación sin matriz de pesos en LPS

Una vez pinchados los GCP e importados los puntos de Von Gruber, se procede a la densificación de puntos (Tie Points), con la ayuda de la herramienta Automatic Tie Point Generation Properties; en donde, se configura la distribución y cantidad de puntos de paso por modelo (25), ver Figura 70.



**Figura 70.** Generación de Tie Points.

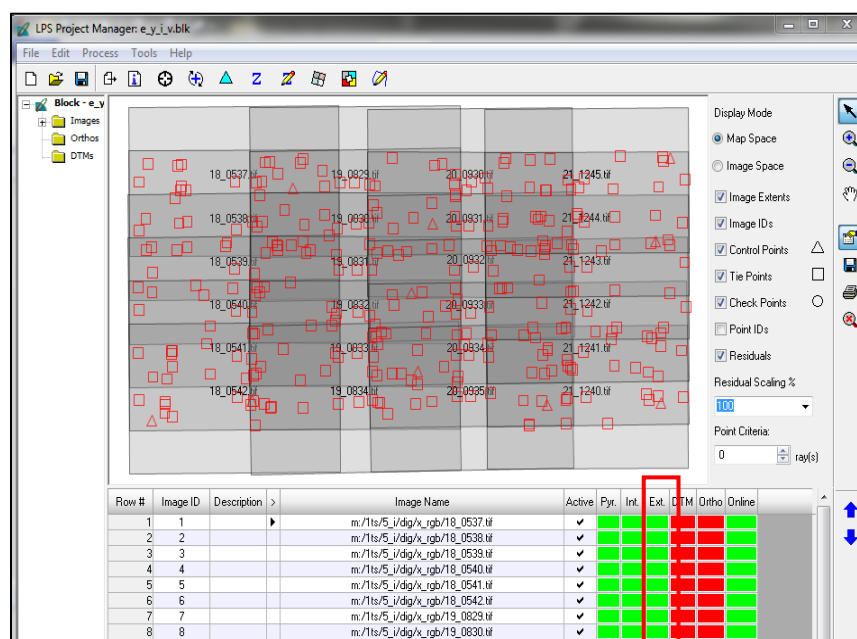
A continuación, se realiza la compensación del modelo matemático en LPS, detallado en el apartado 2.4.1 “Erdas-LPS”, en el cual se coloca la cantidad de iteraciones (10), la desviación estándar del punto principal ( $X=Y=0.33$ , por defecto) y las opciones avanzadas de eliminación robusta de los errores groseros “Advanced Robust Checking”, sin parámetros adicionales por modelo (Figura 71).



**Figura 71.** Aerotriangulación sin parámetros adicionales.

Al correr el programa (Run) se genera una ventana con el valor del RMS final del ajuste presente en el capítulo de resultados 4.3.1.1 (ver Figura 130); el cual se refiere al “Método de haces de luz en ajuste de bloques”, sin matriz de pesos en su compensación, tal y como se definió en el apartado 2.3.5; además, se ejemplifica el reporte del ajuste de la aerotriangulación en la Figura 131. Una

vez aceptada la aerotriangulación aparece en color verde la columna “Ext” en la ventana de LPS (Figura 72).

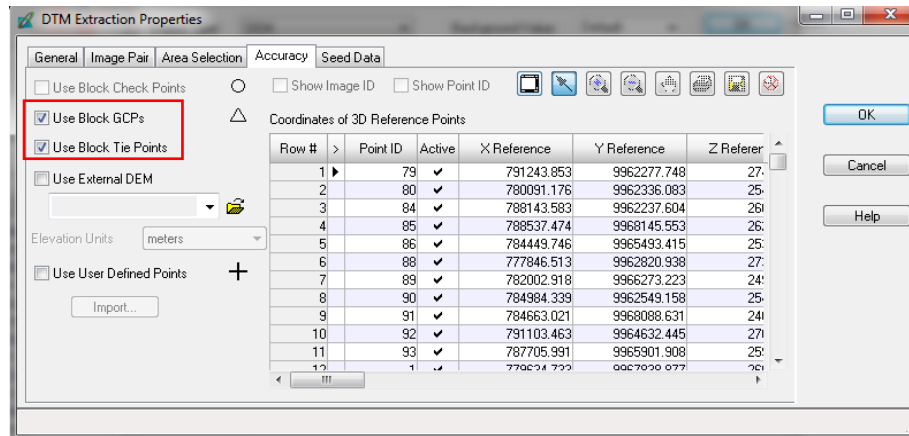


**Figura 72.** Orientación exterior concluida.

### 3.4.1.7. Generación de los MDS sin matriz de pesos y 13 GCP

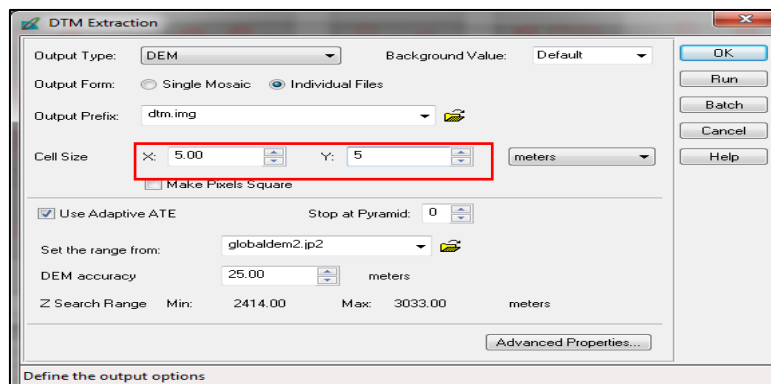
Como se indicó en el apartado 2.3.8.1 “Modelo digital de superficie”, el mismo representa la superficie del terreno con sus elementos y como tal, en este proyecto representa el valor de altura de carácter elipsoidal.

Al crear un MDS en el entorno de Erdas – LPS se utiliza la opción “Start DTM Extraction – Classic ATE” donde se configura “Advanced Properties” al activar los puntos de control y los puntos tie de la pestaña “Accuracy” (Ver Figura 73).



**Figura 73.** Advanced Properties, Accuracy.

Una vez aceptados los cambios de Advanced Properties, en la ventana DTM Extraction, se deben ingresar los valores de Cell Size que pueden tener varias consideraciones, entre ellas: criterio de la cartografía 1:5000, con un intervalo de curva de 5 metros o el tamaño del pixel como en el caso de Barragán (2015), donde se introduce un valor de 0.33 m; sin embargo, estudios como el de Mora (2013), indican que al colocar valores más pequeños de celda, crean grandes variaciones en las curvas de nivel; por tanto, se procede a insertar un valor de 5m (ver Figura 74), del criterio de la cartografía a obtener.

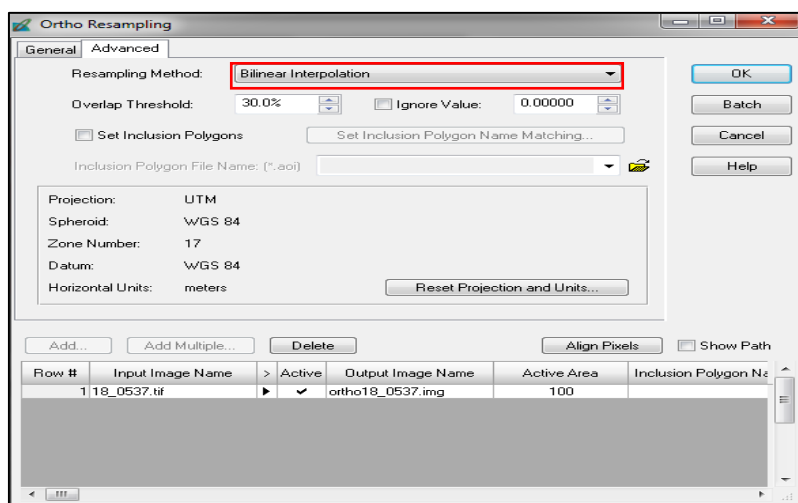


**Figura 74.** Creación del MDS

Este procedimiento se realiza solo una vez y el programa genera un MDS por cada par de imágenes de la misma línea de vuelo; por tanto, se generan cinco MDS por cada línea de vuelo, dando un total de 20 archivos, este proceso puede tardar de entre 3 a 5 horas, dependiendo de la capacidad del computador.

#### 3.4.1.8. Generación de Ortofotos sin matriz de pesos y 13 GCP

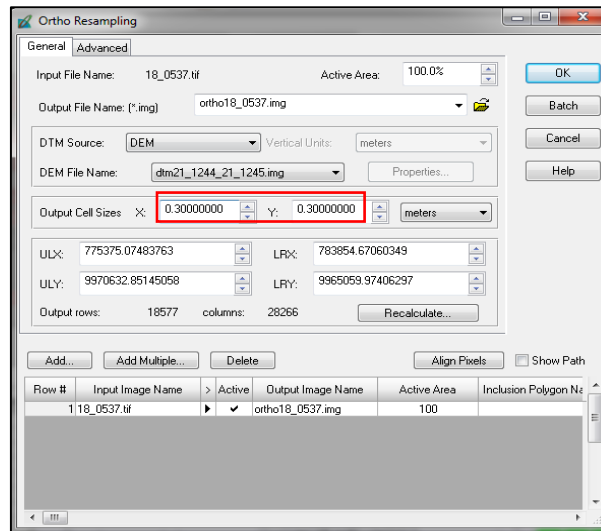
Una vez generado los MDS se procede a rectificar cada imagen, con la herramienta “Ortho Resampling”, considerando los estudios de Serra, Moré y Pons (2010); Fallas (2011); donde, indican que el método de resamplio bilineal es el más recomendable al trabajar con fotografías aéreas digitales y el resto de valores son por defecto (ver Figura 75).



**Figura 75.** Método de resamplio Bilineal.

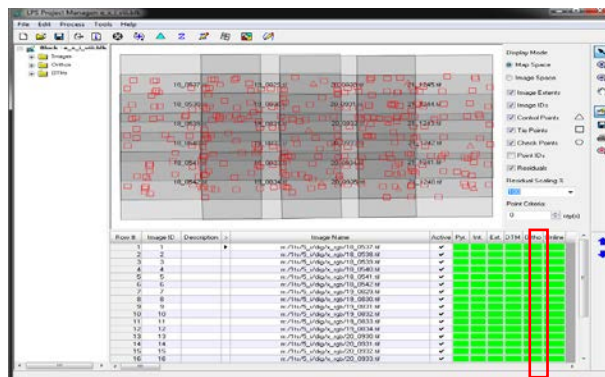
En la pestaña “General” de la ventana anterior, se debe seleccionar cada MDS creado, del apartado 3.4.1.7, correspondiente a la imagen del traslapo; además, insertar el tamaño del pixel en cada una, cuyo valor corresponde a la teoría del apartado 2.1.4 “Resolución imagen-sensor”; donde

el mínimo objeto a distinguir en cartografía 1:5000 es de 1m; por tanto, se necesita de 3 a 4 píxeles para visualizar dicho objeto; por tanto, se inserta un valor de 30cm como tamaño de celda (ver Figura 76).



**Figura 76.** Tamaño del pixel de la ortofoto.

Dicho proceso se realiza para las 24 imágenes y al culminar con todas, la columna Ortho aparece de color verde (ver Figura 77).

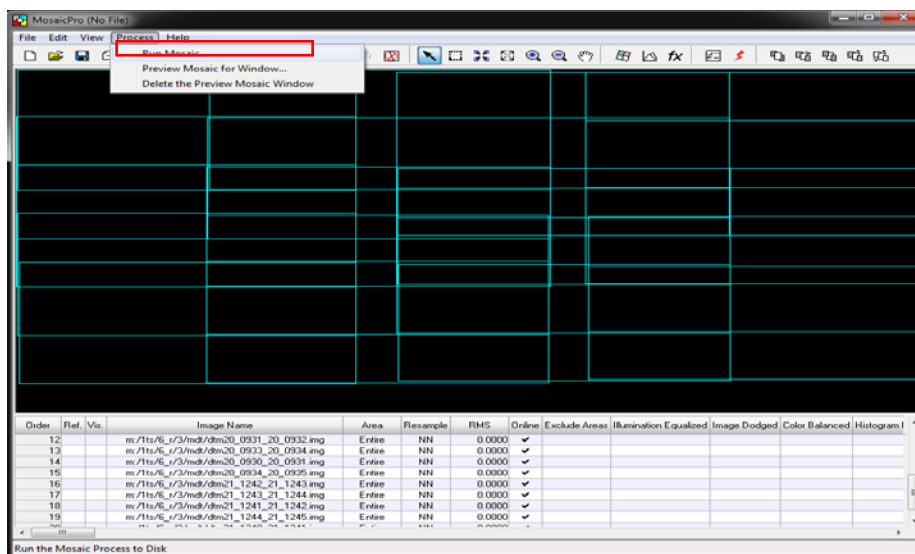


**Figura 77.** Columna Ortho terminada.



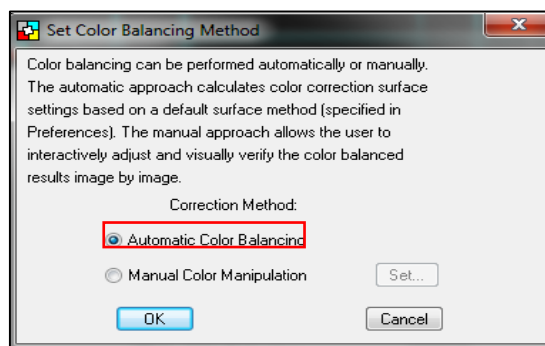
### 3.4.1.9. Generación de mosaicos sin matriz de pesos y 13 GCP

Como se indicó en el apartado 2.3.8.4, un mosaico es la unión entre imágenes con cierto recubrimiento en el caso de un MDS se denomina mosaico y en las ortofotos se denomina ortomosaico. La herramienta que se utilizó en la creación de los mosaicos es “Mosaic Pro” de Erdas, tanto en el MDS como en la Ortofoto, la elaboración del mosaico es detallado en el Anexo 5. En el caso de realizar un mosaico de MDS, se importa los 20 archivos generados previamente y con la herramienta “Display Add Images” (ver Figura 78), se procede a realizar el mosaico con parámetros por defecto, pues es de interés conocer sus valores sin modificaciones digitales.



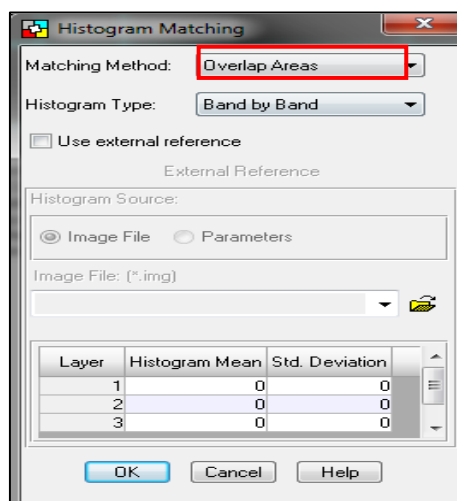
**Figura 78.** Mosaico del MDS.

En el caso de las ortofotos, se deben homogenizar su resolución radiométrica, vista en el apartado 2.1.4, a fin de dar continuidad a los elementos de las ortofotos; por tanto, se utiliza la herramienta “Color Corrections” y el método “Automatic Color Balancing” (ver Figura 79).



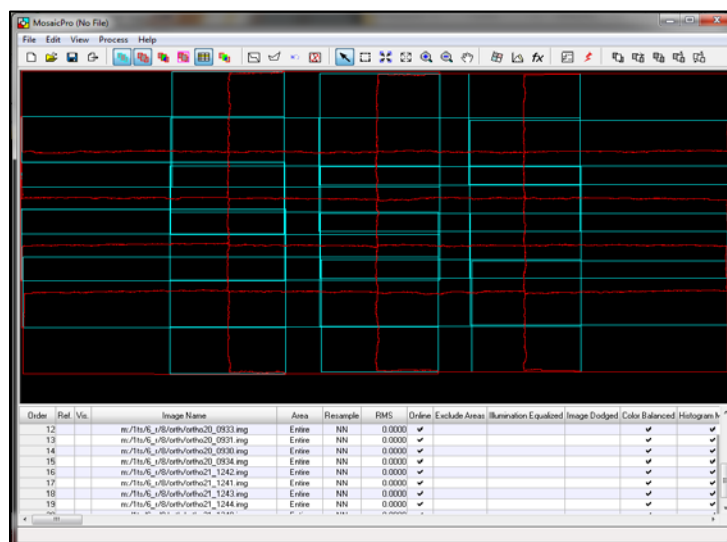
**Figura 79.** Correcciones de color.

Además, se utiliza el histograma de unión por áreas de traslapo (ver Figura 80).



**Figura 80.** Unión de histograma.

En las líneas de unión del mosaico se utilizó la herramienta Seamline Generation Options, que indica la vista más perpendicular a la cámara (Most Nadir); posteriormente, se procede a generar el mosaico, ilustrado en la Figura 81 (para mayor detalle de este proceso se puede consultar el Anexo 5). El resultado del mosaico del MDS se presenta en el apartado 4.4.1 y el resultado del ortomosaico se indica en el en el apartado 4.5.1 de los resultados.



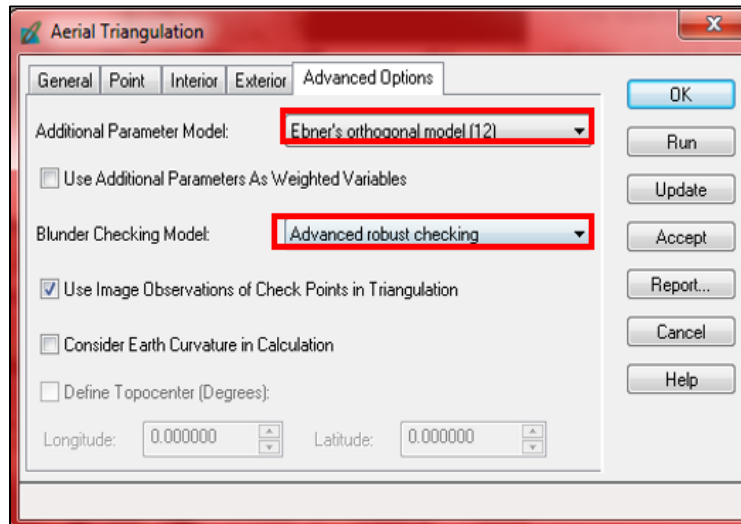
**Figura 81.** Generación de Ortomosaico.

### 3.4.2. Generación de ortofotos con matriz de pesos y 13 GCP en LPS

Al realizar un nuevo ajuste considerando una matriz de pesos en la aerotriangulación, es necesario seguir los mismos pasos desde el apartado 3.4.1.1 “Creación del bloque en LPS” hasta el apartado 3.4.1.5 “Configuración de la orientación absoluta con 13 GCP en LPS” y cambiar el tipo de aerotriangulación por una diferente, detallada a continuación:

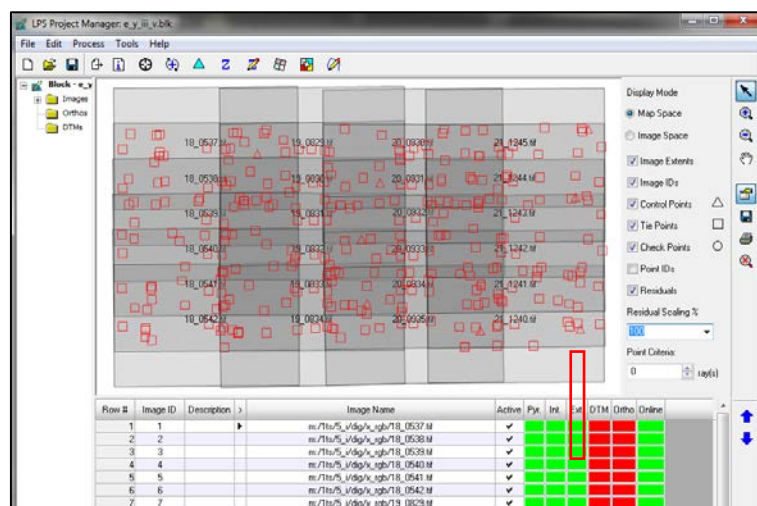
#### 3.4.2.1. Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos en LPS

Con los puntos de control pinchados y los puntos de Von Gruber importados, se procede a generar los Tie points con los parámetros descritos en el apartado 3.4.1.6, pero la compensación se realizará considerando la matriz de “Ebner’s” (ver Figura 82), pues es la ideal de los modelos presentados en el apartado 2.4.1 “Erdas-LPS”, al disponer de una considerable cantidad de puntos de control y nueve puntos de enlace por imagen.



**Figura 82.** Aerotriangulación con modelo Ebner's

Al ejecutar el programa (Run) se genera un ventana con el valor del RMS final de la aerotriangulación presentado en el apartado 4.3.1.2 (ver Figura 133) y al aceptar los resultados, se actualizan las coordenadas en los puntos tie y aparece de color verde la columna "Ext", que indica la culminación del proceso (Ver Figura 83).



**Figura 83.** Orientación absoluta culminada.

#### *3.4.2.2. Generación de los MDS con matriz de pesos y 13GCP*

Así mismo, al realizar los MDS con 13 GCP y considerando la matriz de pesos (modelo de Ebner's) se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.7, que serán utilizados en la elaboración del mosaico del apartado 3.4.2.4.

#### *3.4.2.3. Generación de Ortofotos con matriz de pesos y 13 GCP*

Al realizar las 24 ortofotos de las 24 imágenes, con 13 GCP y considerando la matriz de pesos (modelo de Ebner's), se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.8, cuyas ortofotos serán utilizadas en la elaboración del mosaico del apartado 3.4.2.4.

#### *3.4.2.4. Generación de Mosaicos con matriz de pesos y 13 GCP*

En la realización del mosaico del MDS con 13 GCP y considerando el modelo de Ebner's se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9; además, sus resultados se muestran en el apartado 4.4.2 "Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 13 GCP en LPS"; mientras que, el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.2 "Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS".

#### *3.4.3. Generación de ortofotos sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS*

En la creación de un nuevo ajuste, pero considerando una distribución y cantidad diferente de los puntos de control, es necesario seguir los mismos pasos del apartado 3.4.1.1 "Creación del

bloque en LPS” hasta el apartado 3.4.1.4 “Configuración de la orientación relativa en LPS” y cambiar la distribución de puntos de control (orientación absoluta), detallada a continuación:

### 3.4.3.1. Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP

En la orientación absoluta se pincharon los 19 GCP de la tabla 19 con altura elipsoidal, de la distribución 19 de los puntos de control

#### Tabla 19.

Identificadores de los GCP en la Distribución 19.

NO	19 GCP			
1	A001	B012	D020	I044
2	A004	C014	G025	I046
3	A005	C015	G030	I047
4	A010	C017	G035	I048
5	A011	D019	H042	

La distribución de los 19 GCP a lo largo del bloque en el entorno de LPS se ilustra la Figura 84.

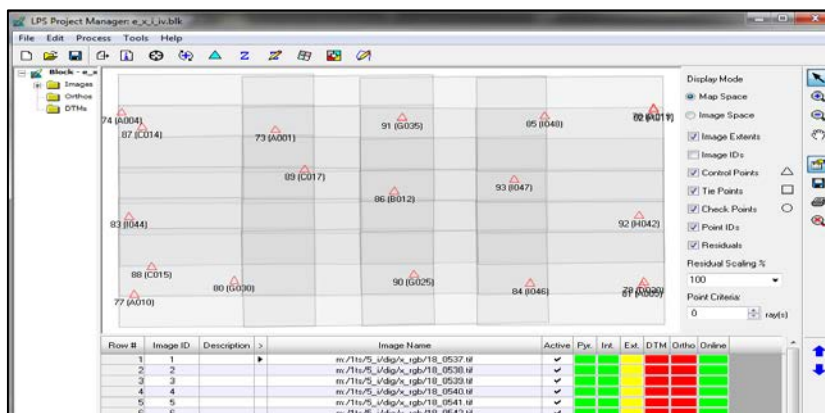


Figura 84. Distribución 19 en Erdas- LPS.



#### *3.4.3.5. Generación de Mosaicos sin matriz de pesos y 19 GCP*

En la realización del mosaico del MDS con 19 GCP y sin considerar la matriz de pesos se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran en el apartado 4.4.3 “Resultado del mosaico MDS sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS”; mientras que el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.3 “Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS”.

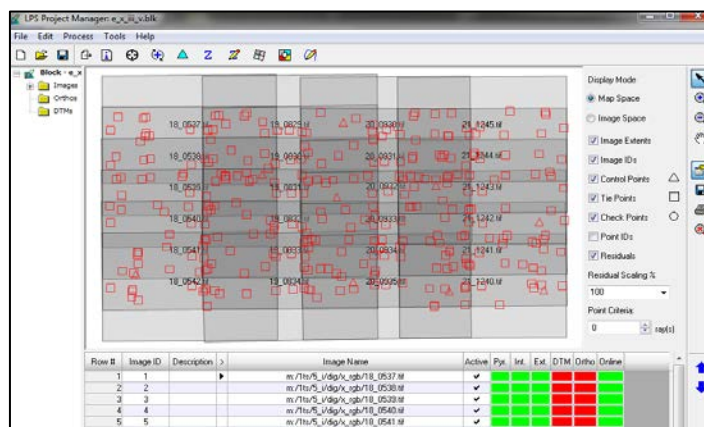
#### *3.4.4. Generación de ortofotos con matriz de pesos y 19 GCP en LPS*

En la realización de un nuevo ajuste con los 19 GCP considerando la matriz de pesos, es necesario seguir los mismos pasos del apartado 3.4.1.1 “Creación del bloque”, hasta el apartado 3.4.1.4 “Configuración de la orientación relativa”; así mismo, considerar el mismo pinchado de los 19 puntos de control del apartado 3.4.3.1 “Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP”, pero se debe cambiar la matriz de pesos, vista en el apartado 3.4.2.1 “Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos en LPS”, que se muestra a continuación:

##### *3.4.4.1. Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos en LPS y 19GCP*

Al generar los tie points se siguieron los mismos pasos de apartado 3.4.2.1 “Configuración de la aerotriangulación con matriz de pesos”, con una distribución de 19 GCP, cuyos resultados se encuentran en el apartado 4.3.1.4. En la ventana general de LPS la casilla “Ext”, muestra de color verde que el proceso culminado (ver Figura 86).





**Figura 86.** Distribución 19 en Erdas- LPS.

#### 3.4.4.2. Generación de los MDS con matriz de pesos y 19 GCP

En la realización de los 20 MDS con 19 GCP y considerando la matriz de pesos (Modelo Ebner's), se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.7; además, sus resultados se utilizarán en la elaboración del mosaico del apartado 3.4.4.4.

#### 3.4.4.3. Generación de Ortofotos con matriz de pesos y 19 GCP

Al realizar las 24 ortofotos de las 24 imágenes del proyecto, con 19 GCP y considerando la matriz de pesos (Modelo Ebner's), se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.8; además, las ortofotos se utilizarán en el mosaico del apartado 3.4.4.4.

#### 3.4.4.4. Generación de Mosaicos con matriz de pesos y 19 GCP

En la realización del mosaico del MDS con 19 GCP y sin considerar la matriz de pesos (modelo de Ebner's) se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran el apartado 4.4.4 "Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 19 GCP en LPS"; mientras que,

el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.4 “Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS”.

### **3.5. Generación de ortofotos mediante el ajuste en Orima**

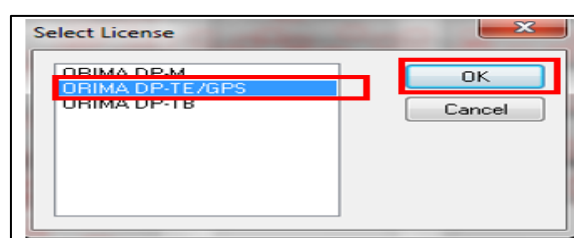
El nuevo ajuste fotogramétrico se realizó en el programa Orima cuyas características, modelos matemáticos y funcionalidades son detalladas en el apartado 2.4.2 “Orima”. Este programa depende de LPS-Core en cuanto a la creación del proyecto y la orientación interna; por tanto, se realizan los mismos pasos desde el apartado 3.4.1.1 “Creación del bloque” hasta el apartado 3.4.1.3 “Configuración de la orientación interior”, para todos los proyectos; además, se conserva la distribución 19 y distribución 13 de los puntos de control fotogramétrico (GCP) con altura elipsoidal; así mismo, en la aerotriangulación con Orima es la denomina ajuste en bloque y ajuste en líneas de vuelo.

#### *3.5.1. Generación de ortofotos con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima*

Al trabajar en el entorno de Orima es necesario conocer todas las funcionalidades del programa, como: herramientas de las diferentes ventanas (Leica Photogrammetry y Orima Orientation Management), importar puntos de control fotogramétrico, configuraciones iniciales, insertar parámetros de calidad, visualización de resultados (Object Display Features), pinchado de puntos monoscópicos y estereoscópicos, entre otras funcionalidades detalladas en el Anexo 6; además, es necesario configurar los umbrales del proyecto, la visualización y otros parámetros de cálculo, propios del ajuste y aerotriangulación, vistos a detalle en el Anexo 7.

### 3.5.1.1. Pasos introductorios de Orima

La versión 11.00 de Orima se abre desde Erdas-LPS; donde, se debe escoger el tipo de licencia para trabajar con cámara digital y apoyo GPS denominado Orima DP-TE/GPS (ver Figura 87); otras licencias de Orima son detalladas en el apartado 2.4.2.



**Figura 87.** Licencias de Orima.

En la ventana siguiente de Orima se encuentra una opción que permite insertar el nombre del usuario, unidades y otros parámetros; al aceptar dicha preferencia, se abren dos ventanas de trabajo, Leica Photogrammetry usada para la visualización, pinchado de puntos y cualquier modificación visual de la imagen seleccionada; y la segunda ventana llamada Orima Orientation Management (ver Figura 88), que se usa en los procesos de cálculo, inserción de parámetros, mediciones, entre otras funcionalidades detalladas en el Anexo 6.

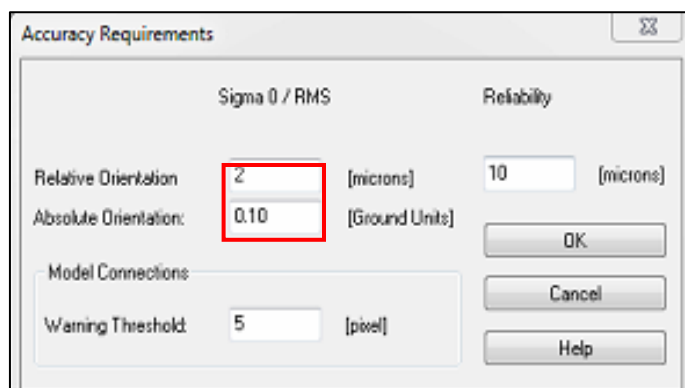


**Figura 88.** Visualización de las ventanas de Orima.

### 3.5.1.2. Umbrales de calidad de las orientaciones

Orima permite la visualización de los puntos que están fuera de un rango o umbral previamente insertados; por tanto, se insertan primero los parámetros antes de las mediciones, con el fin de tener un control más exhaustivo de los pinchados.

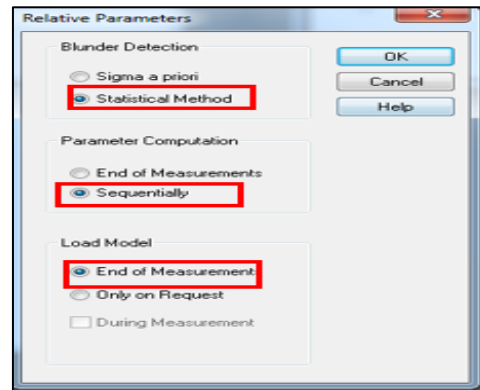
Los primero parámetros a ser insertados son: “Accuracy Requirements” en la que se introduce el valor de 2 en Relative Orientation, que se refiere al tamaño del pixel de la cámara de 6µm entre tres ( $\text{Sigma}_0 = 1/3$  tamaño del pixel) (Hinsken, 2010), el valor de Absolute Orientation se calcula considerando la calidad del producto a obtener (Cartografía 1:5000 con norma ISO 0.2mm) y el número de macro procesos y microprocesos para generar la cartografía (3 macro procesos: digitalización de cartografía, ortofoto, puntos de control y a su vez tres la aerotriangulación con micro procesos (orientación interna, relativa y absoluta); es decir, dividir 1m entre todos los procesos que intervienen, dando un valor aproximado de 0.10m al el resto de valores por defecto (ver Figura 89), para mayores detalles consultar Anexo 7 (Tema: Pasos introductorios).



	Sigma 0 / RMS	Reliability
Relative Orientation	2 [microns]	10 [microns]
Absolute Orientation:	0.10 [Ground Units]	
Model Connections:		
Warning Threshold:	5 [pixel]	

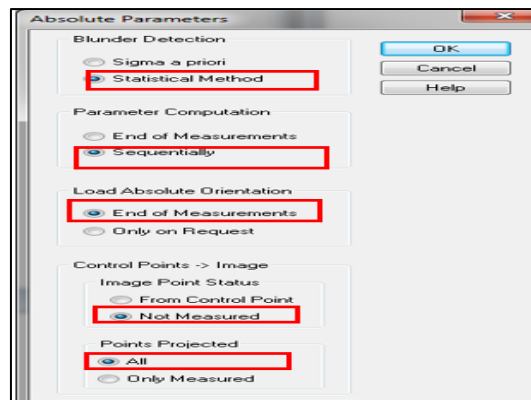
**Figura 89.** Parámetros de vista del proyecto.

También se debe configurar los cálculos simultáneos en la orientación relativa, cuyas características son: detección de errores (método estadístico), cómputo de parámetros (secuencialmente) y lectura de modelos (al finalizar las mediciones) (ver Figura 90).



**Figura 90.** Parámetros de O. Relativa.

Los parámetros de cálculo en la orientación absoluta tiene cierta similitud con la relativa, pero difiere en cuanto a los puntos de control siguiendo las siguientes configuraciones: puntos de enlace proyectados independientemente (Not Measured) y proyectar todos los puntos de control (All) (ver Figura 91).



**Figura 91.** Parámetros de O. Absoluta.

### 3.5.1.3. Orientación relativa en Orima

Orima utiliza la medición monoscópica con plantillas en el pinchado de puntos Tie o de amarre; donde, se conduce una cruz a la posición escrita en la plantilla; ahora, el operador puede escoger que objeto o detalle es adecuado para pinchar; a todo este proceso se le conoce como orientación relativa. Las coordenadas de la plantilla son coordenadas locales de la imagen cuya distribución y cantidad dependen del operador; se puede utilizar el criterio de los puntos de Von Gruber o el programa ofrece plantillas con distribuciones y cantidades diferentes.

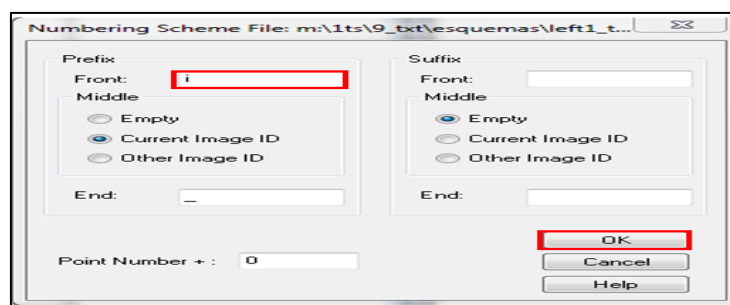
Este criterio de plantillas permite una repetición uniforme del mismo proceso en todos los modelos estereoscópicos; así pues, en este proyecto se generaron dos plantillas llamadas: Left1\_tes y Right1\_tes, con tres puntos por plantilla y una codificación en múltiplos de 10; aquellos IDs de número impar, pertenecen a la plantilla izquierda y con número par pertenecen a la plantilla derecha. Las coordenadas (X, Y) de la plantilla se detallan en la tabla 20, al mismo tiempo la coordenada en Z representa el valor de la distancia focal del certificado de calibración de la cámara. Estas plantillas son importadas directamente al directorio de Orima en Project Files (Scheme) en formato \*.sch.

#### **Tabla 20.**

##### *Disposición de las plantillas con los puntos de von Gruber.*

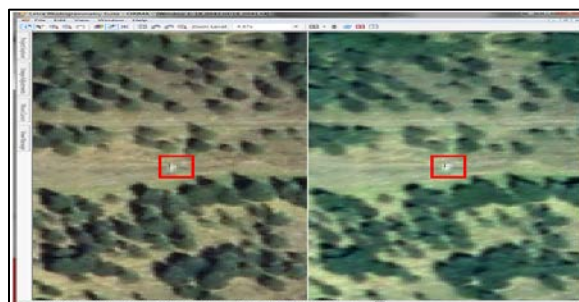
Archivo	Colum. 1	Descripción	Colum. 2	Descripción	Colum. 3	Descripción	Colum. 4	Desc.
<b>Left1_tes</b>	10	ID de los puntos	0	Coordenada del eje x en mm	100	Coordenada del eje y en mm	-100.0	Coordenada del eje Z en mm
	30		0		0		-100.0	
	50		0		-100		-100.0	
<b>Right1_Tes</b>	20		80		0.0		-100.0	
	60		80		-100.0		-100.0	
	40		80		100.0		-100.0	

Una vez creada la plantilla e importada dentro de Project Files, es necesario codificar los puntos de Von Gruber para su medición en Orima, el cual como ejemplo de un punto codificado es: i\_18\_0537\_10 (Sufijo i, 18 línea de vuelo, 0537 Imagen, 10 ID del punto de von Gruber), (ver Figura 92); los detalles de este proceso se detallan en el Anexo 7 (Tema: Orientación Relativa).



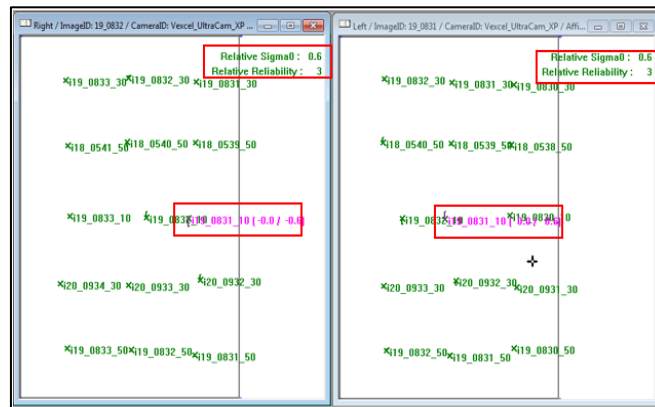
**Figura 92.** Codificación de los puntos de von Gruber.

En la medición de un punto Tie de von Gruber, es necesario ayudarse de las herramientas de la ventana Orima Orientation Management para transferir los puntos y de la ventana Leica Photogrammetry al pinchar los mismos. El pinchado se realiza en pares estereoscópicos (vista Split) (ver Figura 93).



**Figura 93.** Ejemplo de punto de von Gruber.

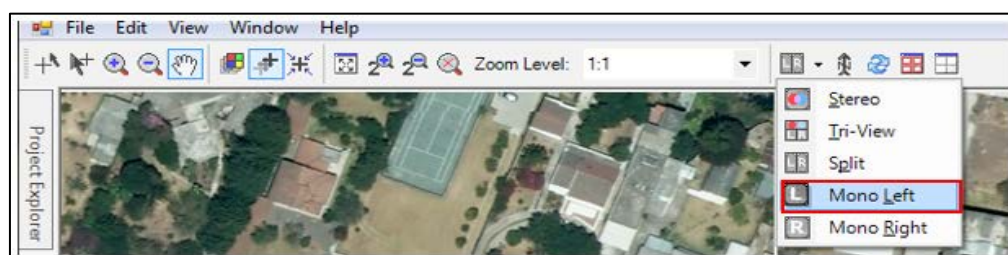
Este proceso se realiza en todas las imágenes hasta que el par estereoscópico cumpla con los parámetros ingresados en el apartado 3.5.1.2. El color verde representa los puntos dentro de los umbrales del proyecto y el color rosado el punto con el máximo de los valores (Ver Figura 94).



**Figura 94.** Modelo correctamente pinchado.

#### 3.5.1.4. Orientación absoluta con 13 GCP en Orima

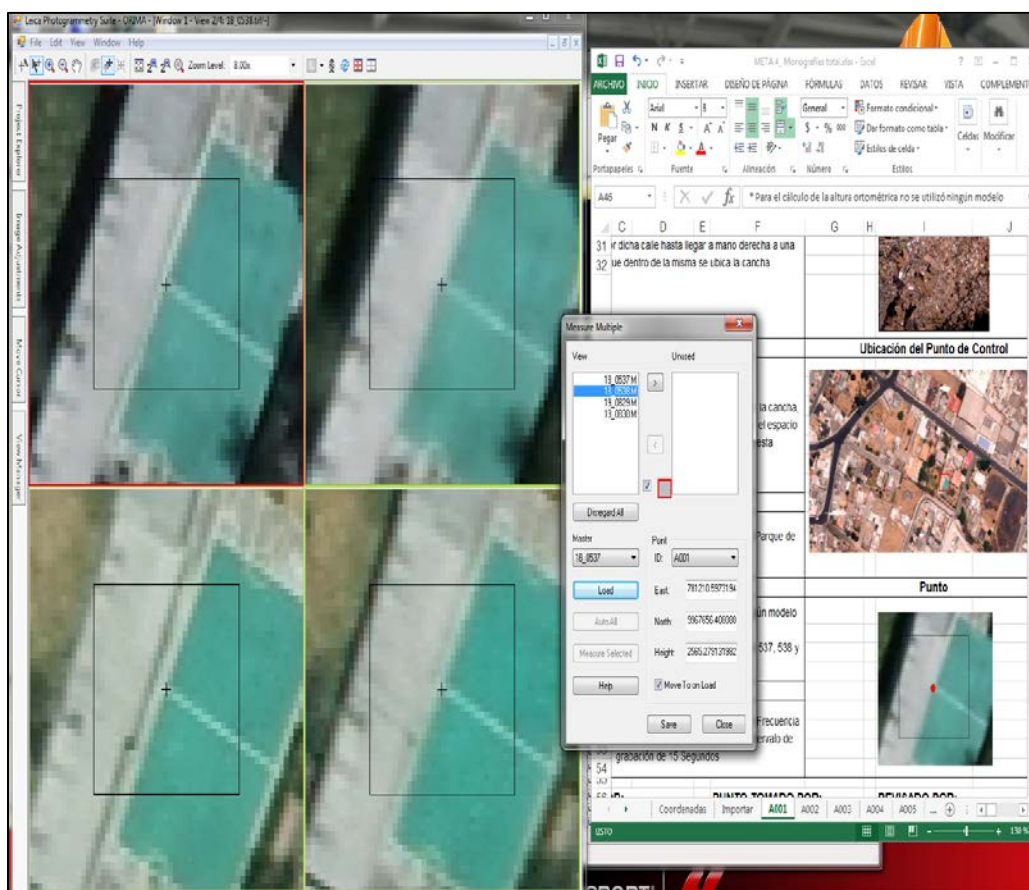
En el entorno de Orima se requiere importar las coordenadas (Este, Norte y Altura) y los IDs de los puntos de control de la tabla 18, en formato txt, con la herramienta Import Control Point; posteriormente, se debe cambiar el tipo de vista de Split a Mono Left, que indica una vista por imagen (ver Figura 95).



**Figura 95.** Tipo de vista para el pinchado de GCP.

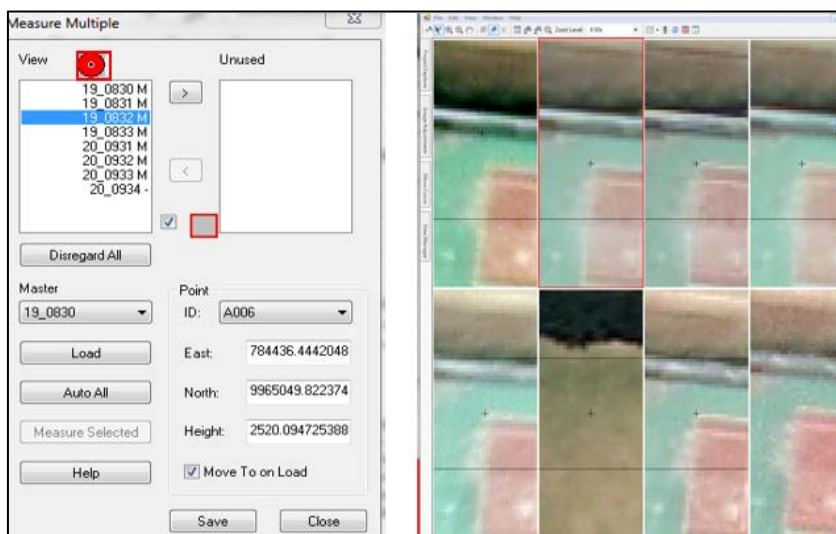


En el pinchado de los puntos de control, el programa Orima localiza el GCP automáticamente de una manera aproximada, con la herramienta Measure Multiple y el operador debe pinchar uno a uno, los puntos de control, en cada imagen con la ayuda visual de las monografías (Anexo 2) (ver Figura 96), hasta obtener los 13 GCP del proyecto marcados.



*Figura 96.* GCP pinchado.

Cabe mencionar que el programa también cuenta con el pinchado automático de los puntos, con la herramienta de correlación automática, pero no se utilizó en los puntos de control, debido a pruebas que se realizaron en su pinchado generaban mucho error (ver Figura 97).



**Figura 97.** GCP pinchado con correlación.

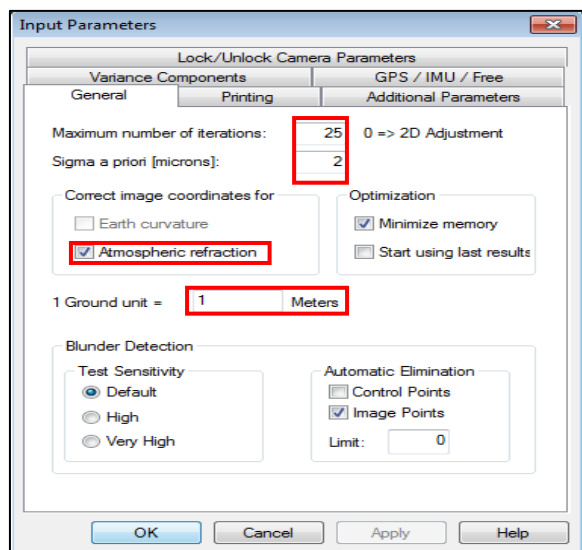
### 3.5.1.5. Aerotriangulación preliminar a la generación de tie points en Orima

Con la orientación relativa y el marcado de los puntos de control completados, se procede a realizar un primer ajuste, que disminuirá la propagación de errores en el pinchado de los puntos Tie (von Gruber) o de los puntos de control (GCP); además, este proceso da una apreciación preliminar del estado de los puntos de control, que son los puntos que mayormente aportan a la aerotriangulación.

El ajuste preliminar se realiza con el programa de Orima llamado CAP-A (Combined Adjustment Program for Aerial Triangulation), cuyos parámetros se insertan en la ventana Input Parameters.

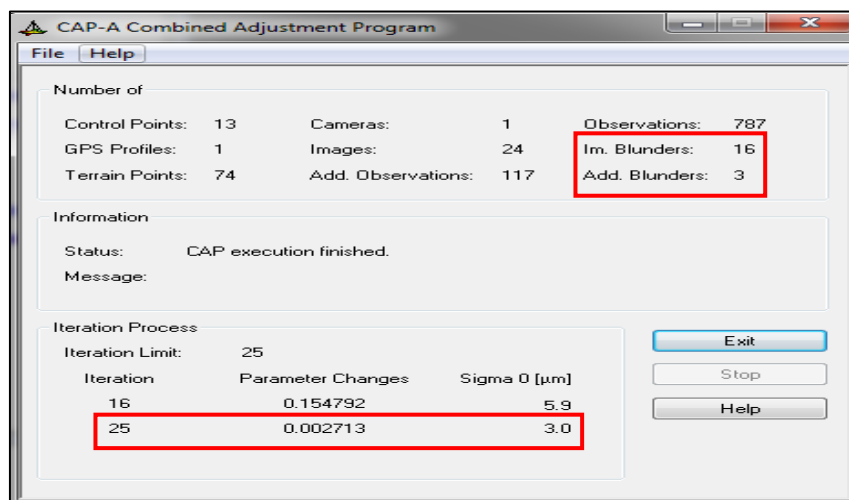
A continuación se insertan los siguientes valores máximo número de iteraciones 25 (Recomendación del Dr. L. Hinsken creador de Orima para observaciones medidas manualmente),

Sigma a priori de 2 (1/3 del tamaño del pixel de  $6\mu\text{m}$ ), corregir las coordenadas por refracción atmosférica (visto en el apartado 2.1.8 “Distorsiones y afectaciones fotogramétricas”), unidades en metros y el resto de valores por defecto (ver Figura 98); así mismo, el detalle del contenido de la ventana Input Parameters se especifica en el Anexo 6 (Tema: Menú Triangulation).



**Figura 98.** Valores de Input Parameters.

Al realizar el primer ajuste, el programa crea un reporte indicando cantidades de: puntos de control, puntos tie, imágenes, observaciones, cámaras, archivos IMU/GPS, entre otros; los valores más relevantes son de Im. Blunders que indica el número de puntos tanto de control como Tie que tienen algún error, los valores de Add. Blunders que indica los posibles errores de: cámara, centros de proyección, parámetros GPS, entre otros; y el valor de Sigma 0 (ver apartado 2.7.1) que es un valor aproximado al insertado en Sigma a priori = 2 (ver Figura 99 recuadros de color rojo)



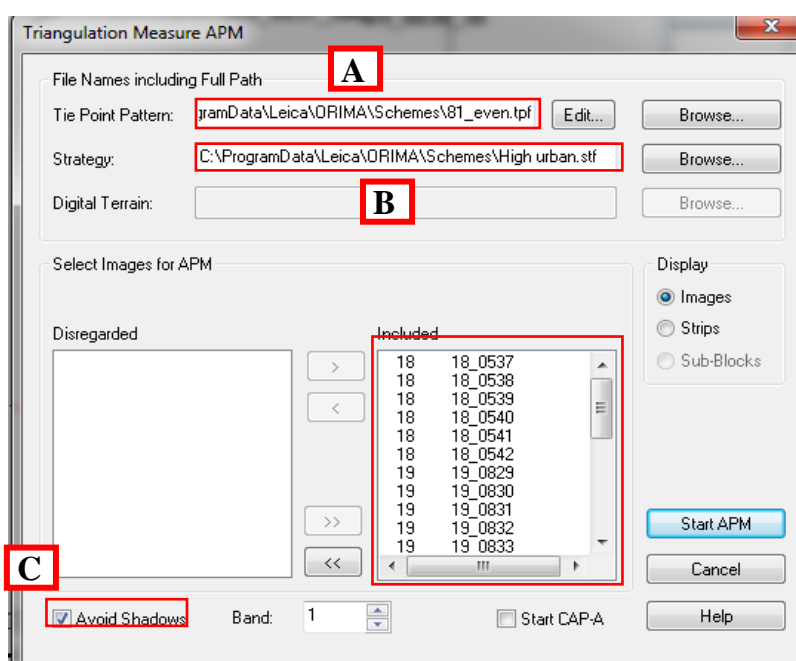
**Figura 99.** Ajuste preliminar con 13GCP y puntos Von Gruber.

En este proyecto se corrigieron los valores de Im. Blunders hasta llevar al menor valor posible siguiendo las consideraciones del Dr. L Hinsken; la corrección de dichos puntos se detallan en el Anexo 7 (Tema: Triangulación - Depuración de GCP y Tie).

### 3.5.1.6. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de bloque en Orima.

A continuación, se debe realizar la densificación de puntos tie, en la que se utiliza la herramienta APM (Automatic Point Measurement) de Orima (ejemplificado en los cuadros de color rojo), en la cual se considera la cantidad de puntos por imagen (81), debido a varias pruebas realizadas con distribuciones de 25, 49, 81 y 121, siendo el más conveniente el de 81 (A); sin embargo, el usuario puede crear una distribución de puntos tie propia (ver Anexo 6 Tema: APM). El siguiente parámetro considerado fue la estrategia del terreno, que en este caso para todo el proyecto es de tipo: Alto Urbano (High Urban) (B); es decir, que para cada imagen buscará 81 puntos tie según el

algoritmo para terreno urbano, evitando las sombras (Avoid Shadow)(C) (ver Figura 100). A esta aerotriangulación se la denomina ajuste en bloque secuencial visto en el apartado 2.3.5.

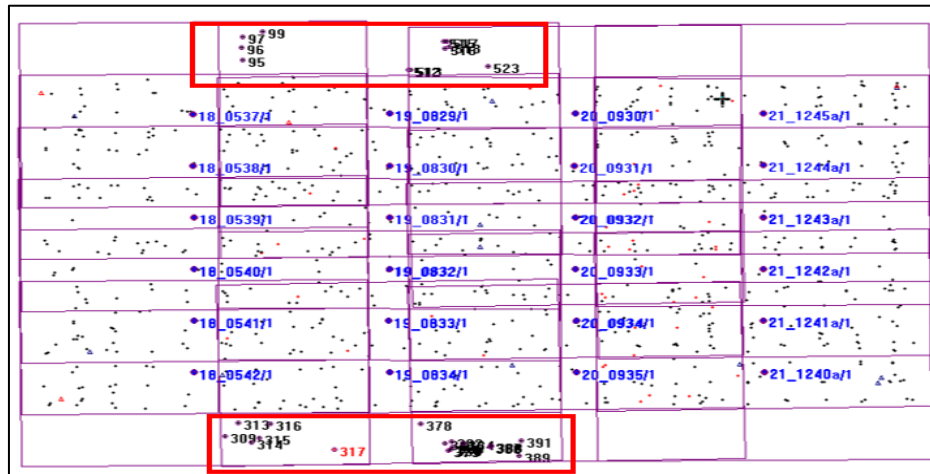


**Figura 100.** Generación de los tie points para todo el bloque.

La generación de los puntos tie puede tardar varios minutos u horas dependiendo de la capacidad del computador; al finalizar, se debe ejecutar el programa CAP-A, cambiando el valor de las iteraciones por 50 en Input Parameters, que es la recomendación del autor de Orima con mediciones realizadas automáticamente. Al finalizar el ajuste de CAP-A, se muestra el mensaje general con la cantidad de puntos y el  $\Sigma_0$ , visto en el apartado 3.5.1.5; así mismo, se debe tener en cuenta los valores de Im. Blunders y de  $\Sigma_0$ , para iniciar la edición de puntos.

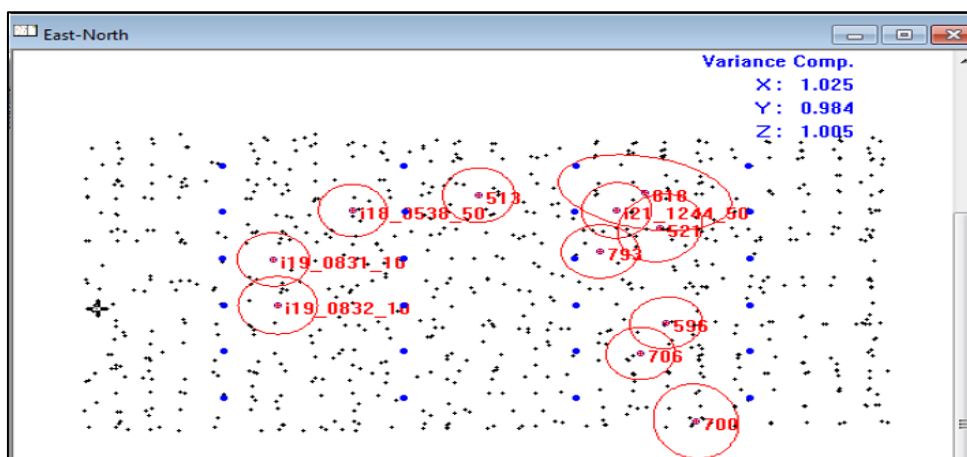
La edición es importante debido a la existencia de errores como: puntos fuera del área de triple traslapo (ver Figura 101), puntos no pinchados en todas las imágenes posibles, mala correlación

entre imágenes, puntos en zonas erróneas, objetos que no se encuentran en todas las imágenes, entre otras.



*Figura 101.* Puntos fuera de la zona de triple traslapo.

Estos errores se pueden visualizar utilizando las elipses de error (ver apartado 2.7.1) y son de color rojo tal como se ilustra en la Figura 102.



*Figura 102.* Puntos erróneos y sus elipses de error.

El autor de Orima recomienda la edición ante la eliminación de puntos, debido a la importancia de mayor cantidad de datos en su compensación; por tanto, al terminar una edición de puntos se debe seguir ejecutando CAP-A, hasta que el valor de Im. Blunder disminuya o el operador considere necesario, ayudándose de las herramientas de visualización de Orima detalladas en el Anexo 6 (Tema: Object Display Features). El resultado final de la aerotriangulación se detalla en el apartado 4.3.2.1. Culminados estos pasos, la orientación relativa de LPS se coloca en verde; por tanto, se puede continuar con los siguientes pasos.

#### *3.5.1.7. Generación de los MDS con ajuste en bloque y 13 GCP*

En la realización de los 20 MDS con 13 GCP y considerando un ajuste en bloque, se trabaja en el entorno de Erdas – LPS y como tal se siguen los mismos pasos del apartado 3.4.1.7, cuyos MDS se utilizaron en la elaboración del mosaico del apartado 3.5.1.9.

#### *3.5.1.8. Generación de Ortofotos con ajuste en bloque y 13 GCP*

En la realización de las 24 ortofotos de las 24 imágenes, con 13 GCP y considerando un ajuste en bloque, se trabaja en el entorno de Erdas – LPS y como tal se siguen los mismos pasos del apartado 3.4.1.8, cuyas ortofotos se utilizaron en el mosaico del apartado 3.5.1.9.

#### *3.5.1.9. Generación de Mosaicos con ajuste en bloque y 13 GCP*

La realización de un mosaico de MDS con 13 GCP y considerando un ajuste en bloque, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran el apartado 4.4.5 “Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima”; mientras que el resultado

del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.5 “Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima”

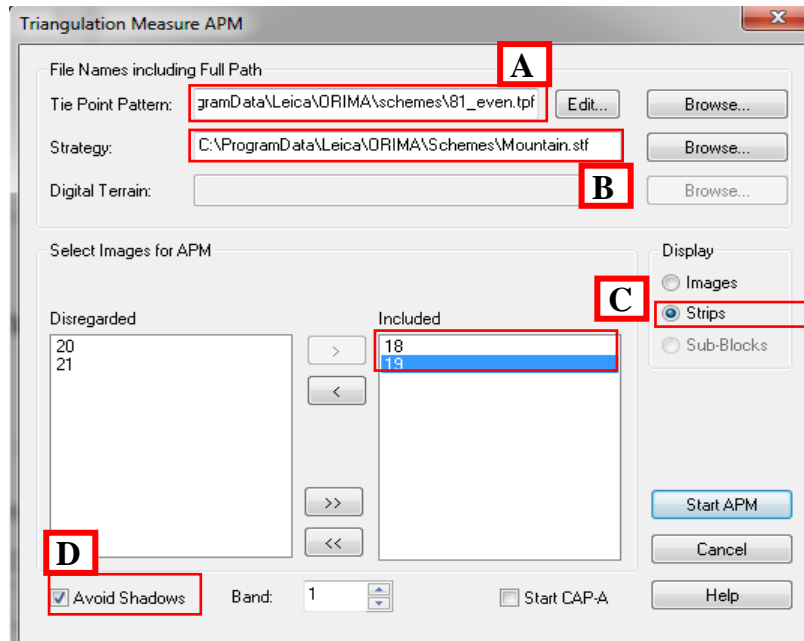
### *3.5.2. Generación de ortofotos con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima*

En la realización de un nuevo ajuste en el entorno de Orima, realizaron los mismos pasos desde el apartado 3.5.1.1 “Pasos introductorios de Orima” hasta el apartado 3.5.1.5 “Aerotriangulación preliminar a la generación de tie points en Orima”; cambiando solo la densificación de puntos y aerotriangulación detallada a continuación:

#### *3.5.2.1. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de líneas de vuelo en Orima.*

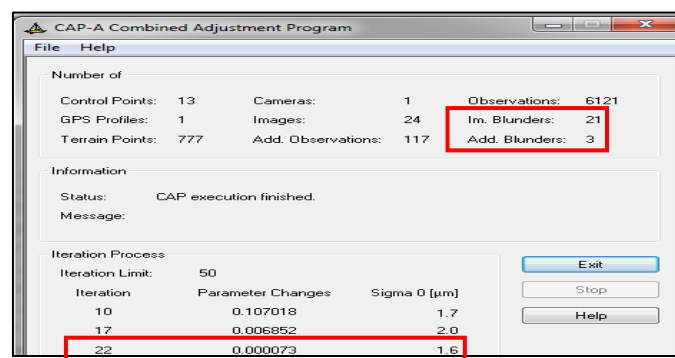
La densificación de puntos tie se utilizó la herramienta APM (Automatic Point Measurement) de Orima, con un valor de 81 por imagen de 81 (A), la estrategia del terreno es por líneas de vuelo, siendo las líneas 18 y 19 de tipo: Montaña (Mountain) (B); es decir, que para cada imagen de la línea 18 y 19 (12 imágenes) (C) buscará 81 puntos tie siguiendo el algoritmo para terreno montañoso, y las líneas de vuelo 20 y 21 con estrategia de terreno urbano (High Urban); además, se mantiene la configuración de evitar las sombras (Avoid Shadow) (D) (ver Figura 103). A este proceso se lo denomina “Aerotriangulación respecto a la unidad de trabajo” según Pérez J. (2001), del apartado 2.3.3.3.





**Figura 103.** Generación de los tie points por línea de vuelo.

Cabe mencionar que este proceso se realiza primero para la línea 18 y 19, y al finalizar se continua con las líneas 20 y 21; posteriormente, se debe cambiar el valor de las iteraciones por 50 y ejecutar el programa CAP-A, con ello se genera el reporte típico con los Im Blunders y el Sigma 0 (ver Figura 104); por tanto, es necesario modificar los puntos mencionados y continuar ejecutando CAP-A, con cada edición de puntos realizada.



**Figura 104.** Ajuste con 13 GCP sin edición.

Después de las ediciones, visualizar el estado de los puntos, proceso detallado en Anexo 7 (Tema: Depuración de los GCP y Tie). El resultado final de la aerotriangulación se detalla en el apartado 4.3.2.2. Con dicho ajuste el proceso de la orientación relativa en LPS se culmina y la columna “Ext” se muestra de verde (ver Figura 105).

Flow #	Image ID	Description	Image Name	Active	Pbr	Int	Ext	TIM	Ortho	Order
1	1		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0527.tif				Green			
2	2		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0530.tif				Green			
3	3		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0538.tif				Green			
4	4		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0540.tif				Green			
5	5		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0541.tif				Green			
6	6		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0542.tif				Green			
7	7		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0549.tif				Green			
8	8		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0590.tif				Green			
9	9		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0831.tif				Green			
10	10		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0832.tif				Green			
11	11		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0833.tif				Green			
12	12		m:\11a75_Vdigi_Scrg\19_0834.tif				Green			
13	13		m:\11a75_Vdigi_Scrg\20_0930.tif				Green			
14	14		m:\11a75_Vdigi_Scrg\20_0931.tif				Green			
15	15		m:\11a75_Vdigi_Scrg\20_0932.tif				Green			
16	16		m:\11a75_Vdigi_Scrg\20_0933.tif				Green			

**Figura 105.** O. Exterior culminada.

### 3.5.2.2. Generación de los MDS con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP

La realización de los 20 MDS con 13 GCP y considerando un ajuste de líneas de vuelo se siguen los mismos pasos del apartado 3.4.1.7, cuyos MDS se utilizaron en la elaboración del mosaico del apartado 3.5.2.4.

### 3.5.2.3. Generación de Ortofotos con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP

En la realización de las 24 ortofotos de las 24 imágenes, con 13 GCP y considerando un ajuste en líneas de vuelo, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.8, cuyos ortofotos se utilizaron en el mosaico del apartado 3.5.2.4.

#### *3.5.2.4. Generación de Mosaicos con ajuste de líneas de vuelo y con 13 GCP*

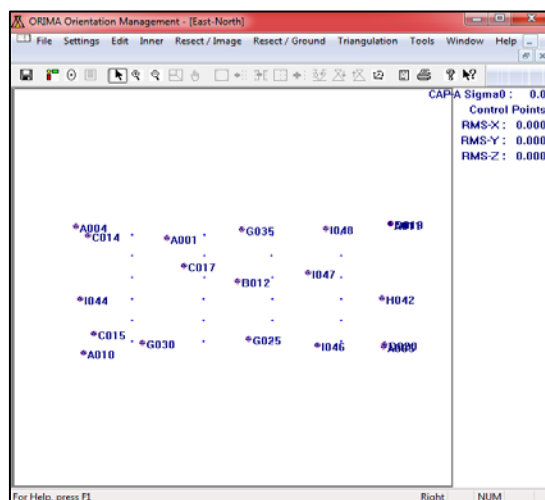
La realización del mosaico del MDS con 13 GCP y considerando un ajuste en líneas de vuelo se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran en el apartado 4.4.6 “Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima”; mientras que el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.6 “Resultado del ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.”

#### *3.5.3. Generación de ortofotos con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima*

En la realización de un nuevo ajuste en el entorno de Orima, se siguen los mismos pasos del apartado 3.5.1.1 “Pasos introductorios de Orima” hasta el apartado 3.5.1.3 “Orientación relativa en Orima” y el mismo tipo de aerotriangulación del apartado 3.5.1.6, pero cambiando la orientación absoluta, vista a continuación:

##### *3.5.3.1. Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP en Orima*

En la orientación absoluta se pincharon los 19 GCP, de la tabla 19 para la distribución 19, a lo largo del bloque, como en la Figura 106, siguiendo las mismas recomendaciones del apartado 3.5.1.4.



**Figura 106.** Distribución 19GCP en Orima

### 3.5.3.2. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de bloque en Orima y 19GCP

Al realizar el nuevo ajuste con los 19 GCP, se realizaron mismos pasos desde el apartado 3.5.1.5 “Aerotriangulación preliminar a la generación de tie points en Orima” hasta el apartado 3.5.1.6, pero con la distribución de 19 GCP y considerando la edición de puntos, hasta ajustar el proyecto, cuyos resultados se presentan en el apartado 4.3.2.3; y como tal se puede continuar con la generación del MDS y la ortofotos.

### 3.5.3.3. Generación de los MDS con ajuste en bloque y 19 GCP

En la realización de los 20 MDS con 19 GCP y un ajuste en bloque de Orima, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.7, cuyos MDS se utilizaron en la elaboración del mosaico del apartado 3.5.3.5.

#### *3.5.3.4. Generación de Ortofotos con ajuste en bloque y 19 GCP*

La realización de las 24 ortofotos de las 24 imágenes, con 19 GCP y un ajuste de bloque en Orima, se siguen los mismos pasos del apartado 3.4.1.8, cuyas ortofotos se utilizaron en el mosaico del apartado 3.5.3.5.

#### *3.5.3.5. Generación de Mosaicos con ajuste en bloque y 19 GCP*

La realización del mosaico de MDS con 19 GCP y un ajuste en bloque, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran el apartado 4.4.7 “Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima”; mientras que el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.7 “Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima”.

#### *3.5.4. Generación de ortofotos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima*

En este nuevo ajuste se realizaron los mismos pasos del apartado 3.5.1.1 “Pasos introductorios de Orima” hasta el apartado 3.5.1.3 “Orientación relativa en Orima” y el mismo marcado de los 19 puntos de control del apartado 3.5.3.1 “Configuración de la orientación absoluta con 19 GCP en Orima”; así mismo, los mismos pasos de la aerotriangulación detallada a continuación:

##### *3.5.4.1. Configuración de la aerotriangulación con ajuste de líneas de vuelo y 19GCP*

En la generación de los tie points se siguen los mismos pasos del apartado 3.5.2.1, para una distribución de 19 GCP y los pasos del apartado 3.5.2.1 “Configuración de la aerotriangulación con ajuste de líneas de vuelo en Orima.”, hasta la edición de los puntos; cuyos resultados se

encuentran en el apartado 4.3.2.4 “Resultado de la aerotriangulación en líneas de vuelo y 19GCP en Orima”; posteriormente, se puede continuar con la elaboración de los productos.

#### *3.5.4.2. Generación de los MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP*

En la realización de los 20 MDS con 19 GCP y un ajuste en líneas de vuelo en Orima, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.7, cuyos MDS se utilizaron en la elaboración del mosaico del apartado 3.5.4.4.

#### *3.5.4.3. Generación de Ortofotos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP*

La realización de las 24 ortofotos de las 24 imágenes, con 19 GCP y un ajuste en líneas de vuelo, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.8, cuyas ortofotos se utilizaron en el mosaico del apartado 3.5.4.4.

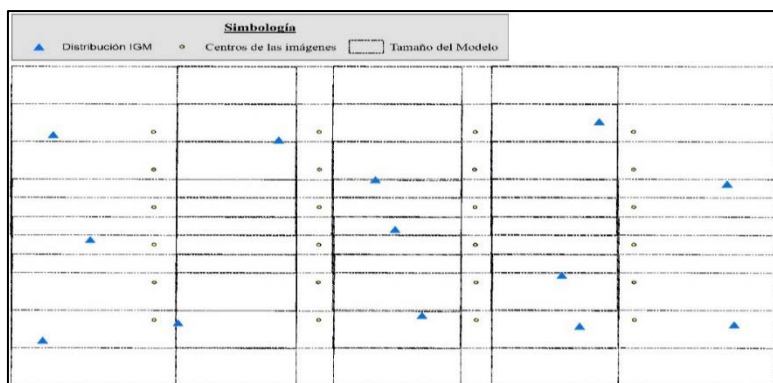
#### *3.5.4.4. Generación de Mosaicos con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP*

En la realización del mosaico de MDS con 19 GCP y un ajuste en líneas de vuelo en Orima, se siguieron los mismos pasos del apartado 3.4.1.9, cuyos resultados se encuentran el apartado 4.4.8 “Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19GCP en Orima”; mientras que el resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.8 “Resultado del ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima”.

### 3.6. Generación de ortofotos mediante ajuste en Z/I Imagine

Por último se realiza una aerotriangulación en el programa fotogramétrico Z/I Imagine, el cual realiza un ajuste de aerotriangulación por el modelo de haces de luz, cuyas ecuaciones utilizan el principio de colinealidad; además, la medición de puntos de paso y puntos de control es de forma tridimensional, tal y como se indicó en el apartado 2.4.3 “Z/I Imagine”.

Inicialmente, se planificó una distribución y cantidad de 19 puntos de control fotogramétrico (GCP); sin embargo, al realizar varias pruebas en el ajuste, se decidió no utilizar ciertos puntos, pues con ellos se incrementaba el RMSE y no pasaba el ajuste; por tanto, se determinaron 13 puntos de control ideales para el pinchado en 3D, cuya distribución se ilustra en la Figura 107, al considerar un punto cada tercer modelo y en las esquinas.



**Figura 107.** Distribución de 13 en el programa Z/I Imagine

#### 3.6.1. Creación del proyecto en Z/IImagine

El módulo de aerotriangulación del programa Z/I Imagine, se denomina ImageStation Automatic Triangulation versión 13.00 (2013), en el cual se configura el nombre del proyecto, el

tipo (Aerial Photography), sistema de referencia (UTM WGS84 Zona 17 Sur), unidades de trabajo (metros), unidades angulares (grados), entre otros; detallados en el Anexo 8.

Antes de insertar los datos de precisiones en Z/I Imagine, cabe señalar lo siguiente: el Ecuador presenta diversidad climática y morfológica; algo muy beneficioso desde el punto de vista de la biodiversidad; sin embargo, para fines fotogramétricos la presencia de nubosidad, brumas, clima muy variable en la toma, topografía muy irregular en zonas cortas, entre otros; ocasiona errores en la adquisición de las imágenes, llevando incluso a una nueva toma, es así que las precisiones se deben adaptar a las realidades del medio, a fin de tener amplitud al cumplir las características técnicas del proyecto, es por este motivo que se trabaja con los valores máximos, de las precisiones para la escala indicada (Jaramillo, 2018).

Considerando lo anterior, al generar cartografía 1:5000 con la norma IGM (0.3mm), la precisión del producto es de 1.5m (producto entre el módulo de la escala y el factor en metros); además, la precisión altimétrica es  $\frac{1}{4}$  del intervalo de curva ( $5m/4=1.25m$ ), dicho valor se inserta para todos los procesos, pues es el valor máximo que se debería cumplir el producto; sin embargo, los cálculos para generar cartografía a escala 1:5000 considerando un ajuste ideal; es decir, sin nubosidad, buenos centros de las imágenes, sin atemporalidad entre líneas de vuelo, topografía homogénea, entre otros factores; se realiza de la siguiente manera:  $5000 * 0.3mm = 1500mm$ ; obteniendo 1.5m del producto, sometido a tres macro procesos de producción (aerotriangulación, restitución y control geodésico) y al realizar la división, resulta un valor de 0.5m en planimetría para la aerotriangulación; en altimetría se tiene que es un cuarto del intervalo de curva obteniendo un valor de 1.25m.



Además, los valores de Sigma deberían ser de  $\frac{1}{2}$  del tamaño del pixel de la cámara (Intergraph, 2013) ( $6\mu\text{m}/2=3\mu\text{m}$ ); sin embargo, se utiliza los valores máximos de  $10\mu\text{m}$  en todas las orientaciones, tal y como se ilustra en la Figura 108.

The screenshot shows the 'User Settings' dialog box with the following values:

Section	Parameter	Value	Unit
Acceptable IO Limits	Max Sigma	3	$\mu\text{m}$
	Max Residual	10	$\mu\text{m}$
Acceptable RO Limits	Max Sigma	3	$\mu\text{m}$
	Max Y-Parallax	10	$\mu\text{m}$
Acceptable AO/Bundle Adjustment Limits	Max Sigma	3	$\mu\text{m}$
	Max RMS	0.5	(m)
	Max Residual	0.5	
		0.5	(m)
		1.25	

**Figura 108.** Valores de calidad de Z/I Imagine

### 3.6.2. Ingreso de los parámetros de la cámara y centros IMU/GPS

A continuación se procede a realizar la importación de los valores de la cámara obtenidos del apartado 3.2.3 y los datos de IMU/GPS, obtenidos del apartado 3.2.4, incluyendo en el archivo txt la ubicación de la carpeta de las imágenes (ver Figura 109), este proceso es detallado en el Anexo 8.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
537	18	779600.63	9967843.603	8143.278	0.0416	-0.04853	90.37356	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0537.tif	
538	18	779601.626	9966757.464	8147.815	-0.01069	-0.03016	90.36288	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0538.tif	
539	18	779606.87	9965671.801	8150.074	0.00764	0.02138	90.77048	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0539.tif	
540	18	779608.866	9964587.236	8156.376	-0.00806	0.01311	90.72516	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0540.tif	
541	18	779611.025	9963501.216	8162.578	-0.01906	-0.02381	90.49753	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0541.tif	
542	18	779610.071	9962415.35	8166.291	-0.01376	-0.04808	90.3844	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\18_0542.tif	
829	19	782920.95	9967843.163	8035.636	-0.003	-0.001	90.573	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0829.tif	
830	19	782924.813	9966756.877	8053.097	0.0115	0.03149	90.78829	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0830.tif	
831	19	782920.221	9965671.433	8064.636	-0.00313	0.01497	89.87836	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0831.tif	
832	19	782910.383	9964585.809	8064.662	-0.02632	-0.04906	89.80962	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0832.tif	
833	19	782903.72	9963500.567	8061.72	-0.07438	-0.06778	90.23134	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0833.tif	
834	19	782910.113	9962414.371	8051.286	-0.01064	0.01272	91.28653	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\19_0834.tif	
930	20	786049.019	9967842.943	7911.638	-0.00434	-0.04291	90.41697	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0930.tif	
931	20	786038.15	9966756.893	7912.132	-0.0074	-0.01244	89.73513	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0931.tif	
932	20	786047.974	9965670.502	7916.103	0.35136	-0.27173	91.15116	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0932.tif	
933	20	786053.574	9964584.996	7915.763	-0.00227	0.00818	90.92673	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0933.tif	
934	20	786066.23	9963499.417	7915.754	-0.00697	-0.00412	90.75133	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0934.tif	
935	20	786072.414	9962413.6	7915.526	0.01012	0.01319	91.21998	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\20_0935.tif	
1240	21	789242.761	9962417.508	7944.272	-0.00699	0.00717	-89.61191	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1240.tif	
1241	21	789237.764	9963503.244	7942.78	-0.01808	0.00813	-89.05275	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1241.tif	
1242	21	789232.637	9964588.848	7941.317	-0.02998	-0.06778	-89.0905	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1242.tif	
1243	21	789232.489	9965674.486	7941.484	0.00284	0.03265	-89.72829	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1243.tif	
1244	21	789229.065	9966759.892	7943.432	-0.01897	0.07312	89.61975	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1244.tif	
1245	21	789224.838	9967845.702	7944.334	0.00993	-0.04079	-89.62154	D:\T_01\Im\rgb\comprimida\21_1245.tif	

**Figura 109.** IMU/GPS importado en Z/I Imagine

Cabe mencionar, que la orientación interior es automática y se realiza secuencialmente con la importación de los valores del certificado de calibración de la cámara; tal como, se definió en el apartado 2.2.5 “Orientación interna”; así pues, se puede continuar con las siguientes orientaciones.

### 3.6.3. Configuración de la orientación exterior en Z/I Imagine

Como se ha definido en 2.2.6, la orientación exterior consta de la orientación relativa y orientación absoluta; que en el caso del programa Z/I Imagine, la orientación relativa no se realiza con todos los puntos de von Gruber, debido a que las imágenes se encuentran orientadas de manera aproximada con ayuda de los centros de las mismas; por esta razón, se aplica el concepto de los puntos de von Gruber solo en zonas donde la correlación entre imágenes es débil y no se han encontrado puntos homólogos, posterior a la densificación de puntos; de esta forma se procede a realizar primero la orientación absoluta.

### 3.6.3.1. Configuración de la orientación absoluta

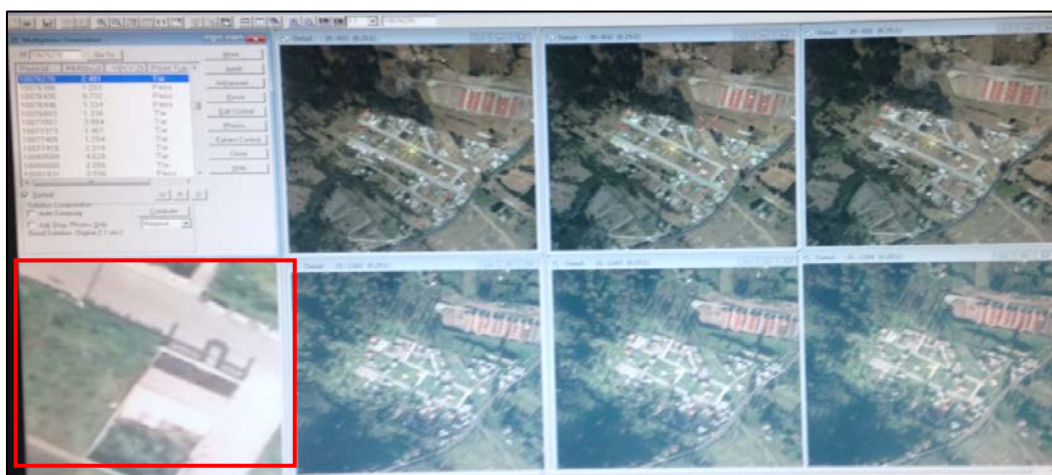
La orientación absoluta, busca orientar el modelo con respecto al terreno, con ayuda de los centros IMU/GPS, la correlación entre imágenes y los puntos de control fotogramétrico; por tanto, se importa los 13 puntos de control de la tabla 21, para realizar la orientación absoluta y a partir de ésta densificar los puntos de amarre o de paso a lo largo del proyecto.

#### **Tabla 21.**

*Identificadores de los GCP en el ajuste Z/I Imagine.*

NO	13 GCP		
1	A006	E023	H040
2	A009	G025	I046
3	A010	G029	I048
4	C014	G030	
5	D020	G034	

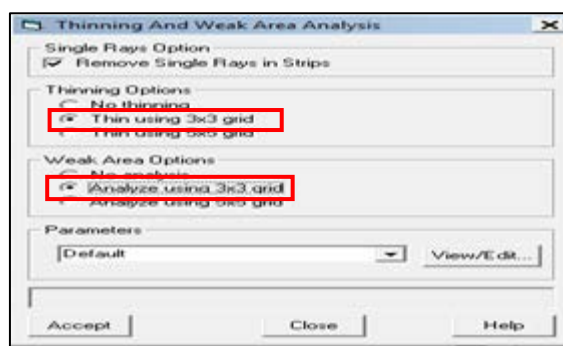
Los puntos de control (GCP), se importan con la opción Control Points del menú ISAT, en formato txt y siguen el orden de: ID, Este, Norte y Altura ortométrica, corregida con el modelo geoidal del IGM, pues es un modelo para el Ecuador; posteriormente, se debe pinchar cada GCP en vista estereoscópica (ver Figura 110), hasta tener los 13 GCP marcados.



**Figura 110.** Pinchado de GCP en estereoscopia

### 3.6.3.2. Densificación de los puntos de paso en Z/I Imagine

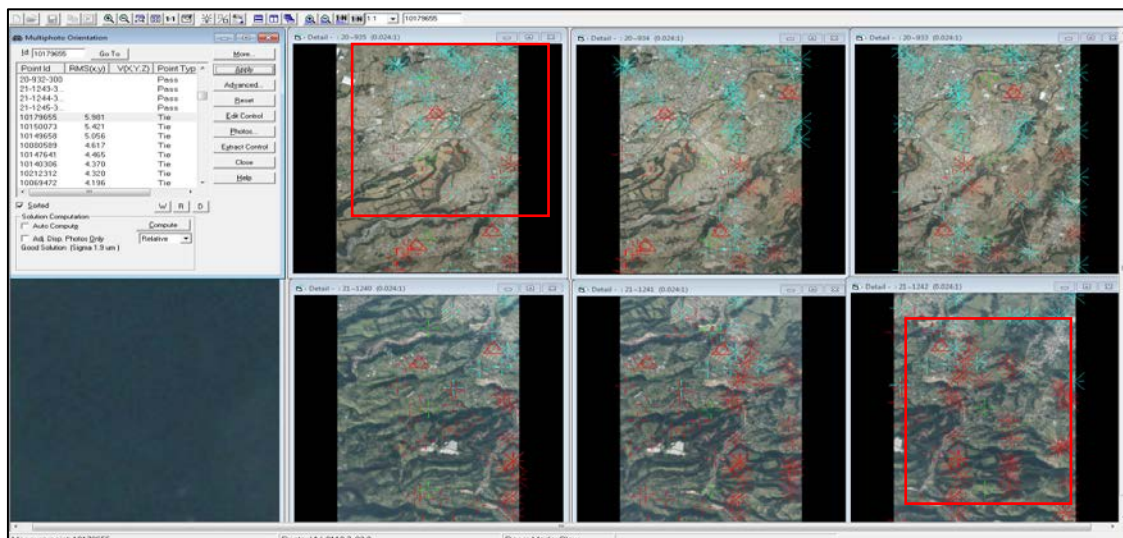
Con los puntos de control marcados, se procede a realizar la densificación de puntos de paso, con una grilla de 3x3 en cada imagen, con ayuda de la herramienta Thinning And Weak Area Analysis, ilustrada en la Figura 111.



**Figura 111.** Mallado de los puntos de paso

Al terminar la densificación de puntos, es necesario depurar varios de ellos, debido a errores como: mala correlación, atemporalidad entre líneas de vuelo (línea 20 y 21), desplazamientos en

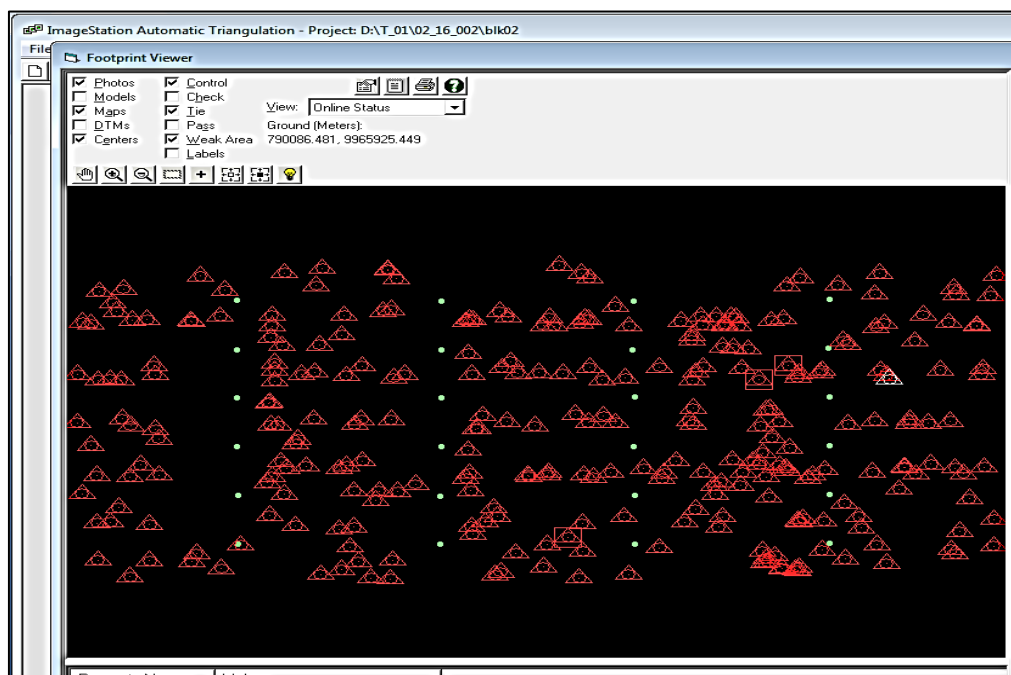
zonas limítrofes del proyecto, entre otros; su valor alto es representado de color rojo en el programa *Z/I Imagine* (ver Figura 112); además, los puntos en color verde y con símbolo de asterisco son puntos de amarre bien correlacionados y los puntos rojos con triángulo son puntos de control.



**Figura 112.** Densificación de puntos de paso

### 3.6.4. Ejecución de la aerotriangulación en *Z/I Imagine*

Al terminar con la depuración de datos (puntos Tie), se realiza la aerotriangulación, definida en el apartado 2.3.5 “Método de haces de luz en ajuste de bloques” en el programa *Z/I Imagine*, cuyo resultado se encuentra en el apartado 4.3.3 “Resultados de la aerotriangulación en *Z/I Imagine*”; y los puntos densificados pasan a tener la simbología de triángulos de color rojo, ilustrados en la Figura 113.

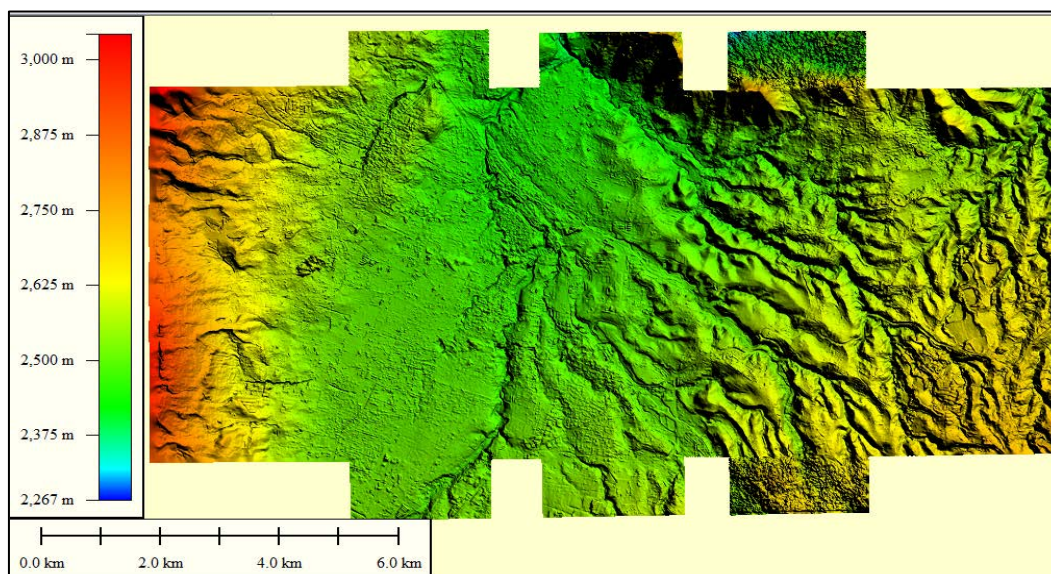


*Figura 113. Ajuste final en Z/I Imagine.*

### *3.6.5. Generación del mosaico de MDS del ajuste en Z/I Imagine*

El modelo digital de superficie se realizó en el programa Inpho del módulo Match-T Commander de la compañía Trimble, en el que se debe importar el ajuste de la aerotriangulación realizado en Z/I Imagine; entonces, es necesario configurar la elaboración de un mosaico de MDS, pues en este programa no se realiza un MDS por cada par estereoscópico como anteriormente se ha visto. Las principales configuraciones se refieren a la extensión del MDS, la altura media del terreno (2500m), el formato de salida (.dtm) y el tamaño del pixel, que el programa genera automáticamente de 9m; sin embargo, se puede considerar el intervalo de curva para generar cartografía 1:5000 (5m). Una vez configurados los parámetros se procesa el mosaico de MDS y su visualización se presenta en la Figura 114, este proceso es detallado en el Anexo 8.





**Figura 114.** Visualización del MDS preliminar.

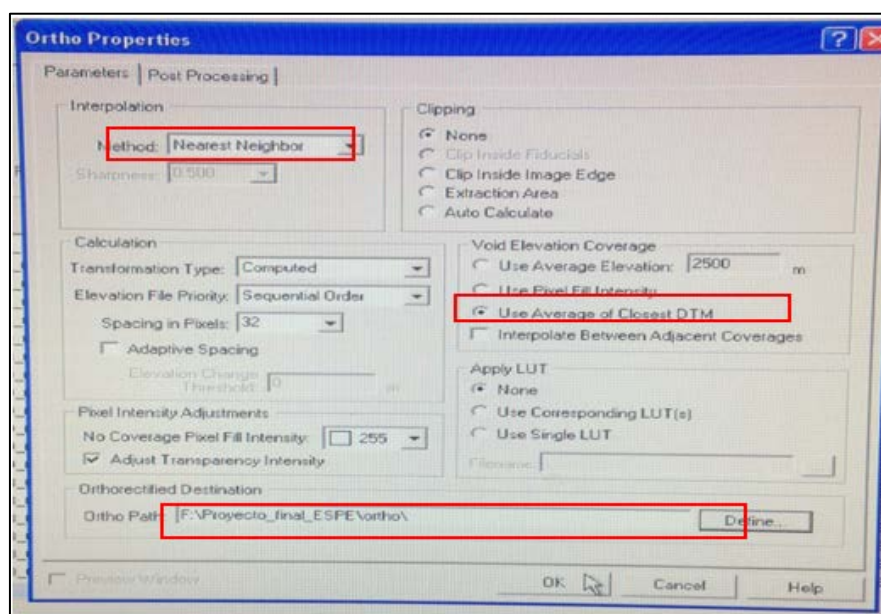
Al presentar el mosaico de MDS de los resultados es necesario cortar dichas zonas que están fuera de los puntos de control, como los recuadros de la figura anterior; cabe aclarar, que este resultado presenta alturas ortométricas corregidas con el modelo geoidal del IGM. El resultado final se presenta en 4.4.9 “Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine” de los resultados.

### *3.6.6. Generación de ortofotos del ajuste en Z/I Imagine*

La rectificación de las imágenes se realiza en el programa Geomedia el cual necesita del mosaico MDS del apartado 3.6.5 y de las imágenes con layers piramidales con sus tres bandas (RGB); cabe aclarar que no se realizó el MDS en Geomedia; debido a no contar con la licencia instalada.

En Geomedia el método de interpolación utilizado es del vecino más cercano, con un tamaño de pixel de 30cm (ver apartado 3.2.2), y con el uso del MDS anterior, tal como indica la Figura

115. Este proceso es de manera automática en las 24 imágenes del proyecto, cuyos resultados se utilizarán en el apartado 3.6.7.

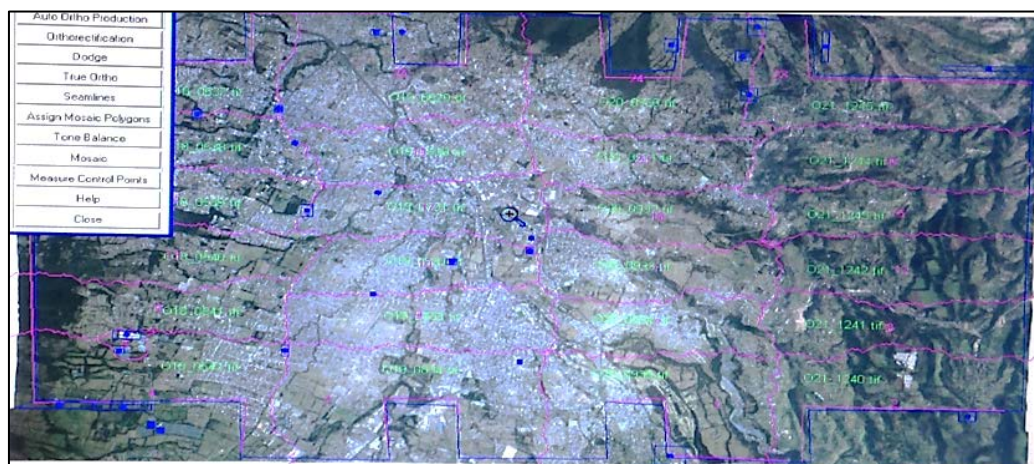


**Figura 115.** Parámetros para realizar las ortofotos.

### 3.6.7. Generación de ortomosaicos del ajuste en ZI Imagine

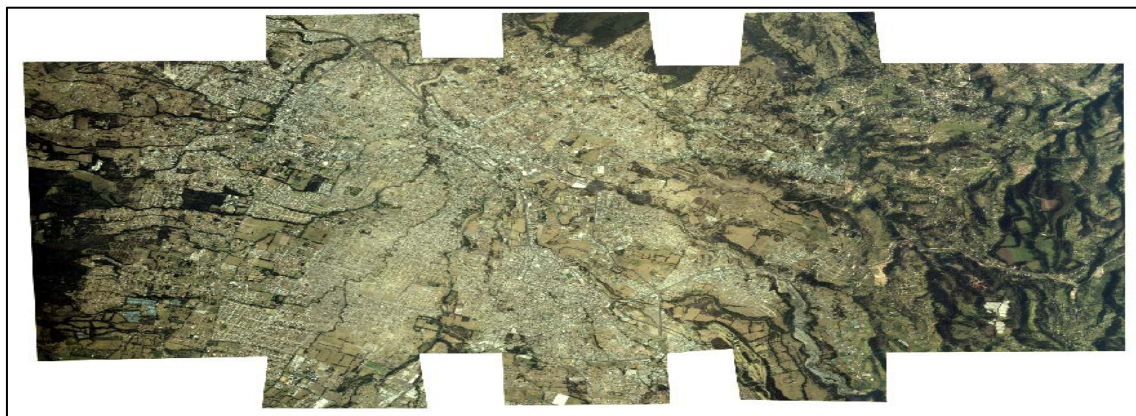
Al terminar las 24 ortofotos, se procede a generar un ortomosaico preliminar en Geomedia con todas las imágenes; dicho ortomosaico, debe ser sometido a un proceso de edición manual, para eliminar errores como: homogenización de colores, vista más vertical, edificios con desplazamientos, entre otros. En la Figura 116 se indica con líneas azules los límites del MDS y de color rosado las líneas la extensión de la ortofoto más vertical disponible.





**Figura 116.** Proceso de realizar un ortomosaico en Geomedia

Al finalizar la edición se inicia procesamiento del ortomosaico, el cual debe ser cortadas y eliminadas las zonas que no tienen triple traslapo (rectángulos), pues están fuera de la zona de cobertura de los puntos de control y tienen errores Figura 117.



**Figura 117.** Ortomosaico preliminar en Geomedia

El resultado del ortomosaico se presenta en el apartado 4.5.9 “Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine” de los resultados.

### 3.7. Control de calidad de los productos generados

A continuación se detallan los procedimientos del control de calidad de los mosaicos de MDS y la exactitud posicional de los ortomosaicos generados con diferentes puntos de control y métodos de aerotriangulación.

#### 3.7.1. Estructura de la información para la validación

La estructura de la información 9 mosaicos de MDS y 9 ortomosaicos generados con diferentes distribuciones de GCP, cantidades de GCP (13 y 19), diferentes métodos de aerotriangulación y en programas fotogramétricos distintos (LPS, Orima, ZI/Imagine); por tanto, llevan una nomenclatura individual, a fin de identificar mucho más rápido en una Geodatabase creada en Arcgis.

La primera estructura de la información con los resultados de los mosaicos de MDS, los cuales siguen la nomenclatura del programa de ajuste, el número de puntos de control, el tipo de aerotriangulación y el proceso realizado, se detallan en la tabla 22 y almacenados en una geodatabase denominada “Base\_datos\_MDS”.

**Tabla 22.**

*Nomenclatura de los mosaicos MDS en la geodatabase*

No	Programa		GCP		Aerotriangulación				Proceso MDS Mosaico	Nomenclatura final
	Erdas	Orima	19	13	Sin pesos Erdas	Con pesos	Ajuste en bloque	Líneas de vuelo		
Nomenclatura	<i>E</i>	<i>O</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>I</i>	<i>ii</i>	<i>iii</i>	<i>iv</i>	<i>VI_X</i>	
1	√			√	√				√	<b>E_X_i_VI_X</b>
2	√			√		√			√	<b>E_X_ii_VI_X</b>
3	√		√		√				√	<b>E_Y_i_VI_X</b>
4	√		√			√			√	<b>E_Y_ii_VI_X</b>



*Continúa*

5	√	√		√	√					O_X_iii_VI_X
6	√		√					√	√	O_X_iv_VI_X
7	√	√					√		√	O_Y_iii_VI_X
8	√	√						√	√	O_Y_iv_VI_X

Nota: El mosaico MDS de Z/I Imagine se denomina Z\_x\_iii\_vi\_x

La segunda estructura de la información, son los ortomosaicos generados con diferentes métodos, puntos de control y programas fotogramétricos, que a su vez llevan una nomenclatura parecida a la tabla 22; sin embargo, cambian en su parte final como se observa en la tabla 23 (columna proceso) y se almacenan dentro de una base de datos denominada “Base\_datos\_Ortomosaicos”.

**Tabla 23.**

*Nomenclatura de los ortomosaicos en la geodatabase.*

No	Programa		GCP		Aerotriangulación				Proceso	Nomenclatura final
	Erda	Orima	19	13	Sin pesos Erda	Con pesos	Ajuste en bloque	Líneas de vuelo	Orto Mosaico	
Nomenclatura	<i>E</i>	<i>O</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>i</i>	<i>ii</i>	<i>iii</i>	<i>iv</i>	<i>VII_X</i>	
1	√			√	√				√	E_X_i_VII_X
2	√			√		√			√	E_X_ii_VII_X
3	√		√		√				√	E_Y_i_VII_X
4	√		√			√			√	E_Y_ii_VII_X
5		√		√			√		√	O_X_iii_VII_X
6		√		√				√	√	O_X_iv_VII_X
7		√	√				√		√	O_Y_iii_VII_X
8		√	√					√	√	O_Y_iv_VII_X

Nota: El ortomosaico de Z/I Imagine se denomina Z\_x\_iii\_vii\_x

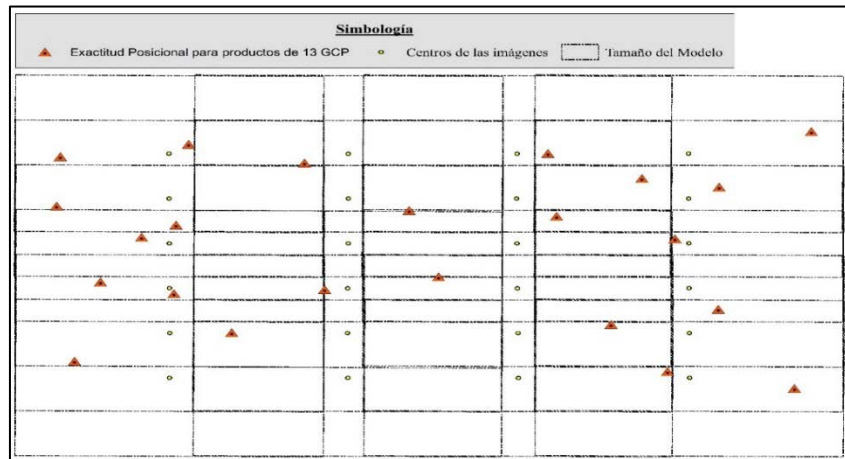
Los resultados de las geodatabases se presentan en el apartado 4.6.1 “Resultados de la estructuración de la información”.

### *3.7.2. Cantidad y distribución de los puntos de exactitud posicional*

Según la revisión bibliográfica del apartado 2.6.6, el tamaño de la muestra en los puntos de exactitud posicional es de un mínimo de 20 puntos, según la norma Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data de la ASPRS para un área menor a 500km<sup>2</sup>; criterio que es compartido por diferentes normas en la cantidad mínima de muestreo; así mismo, coincide con lo establecido en el Ecuador por el IGM; así pues, al evaluar la exactitud posicional en este proyecto, se estableció la cantidad de 23 puntos, con la finalidad de aumentar la confiabilidad de los datos.

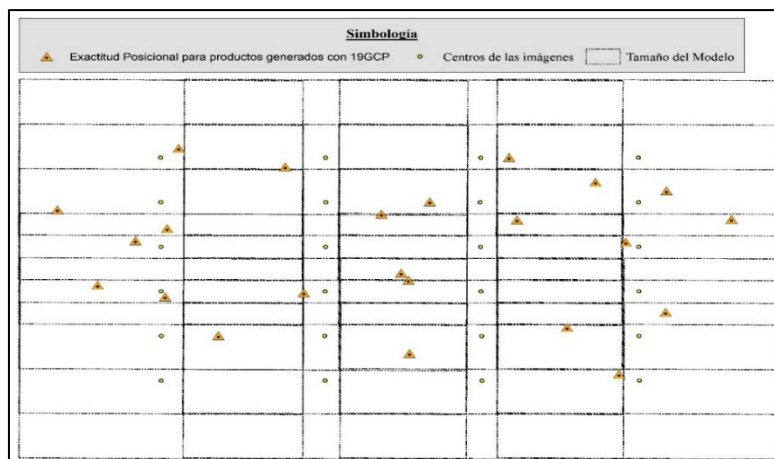
Los puntos utilizados en la exactitud posicional, son diferentes a los GCP del ajuste fotogramétrico y no deben participar en ningún proceso del ajuste; además, están distribuidos en distintos lugares de los GCP; y tienen las siguientes características: promedio en PDOP de 2.44 con una desviación estándar de 0.47; además, el promedio de las precisiones horizontales de 0.6cm con un máximo de 3.3cm y un promedio de 0.7cm en las precisiones verticales con un máximo de 2.5cm (ver tabla 26).

A continuación, se eligen los puntos de la base de datos de la tabla 26, los mismos que fueron organizados en tres grupos para evaluar la exactitud posicional; el primer grupo, de 23 puntos, se usará con productos generados con 13GCP, ilustrados en la Figura 118.



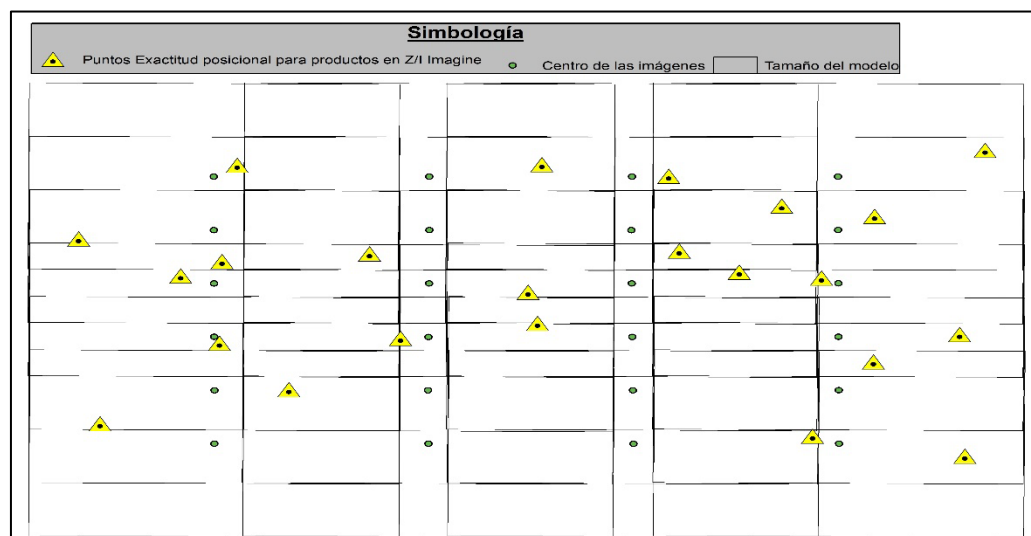
**Figura 118.** Puntos de exactitud posicional para productos con 13GCP

El segundo grupo de puntos, consta de 23 puntos para evaluar productos generados con 19GCP, ilustrados en la Figura 119, con las características y límites antes mencionados.



**Figura 119.** Puntos de exactitud posicional para productos con 19GCP

El tercer grupo de puntos consta de 23 GCP, para productos generados en Z/I Imagine ilustrados en la Figura 120.



**Figura 120.** Puntos de exactitud posicional para productos del ajuste en Z/I Imagine

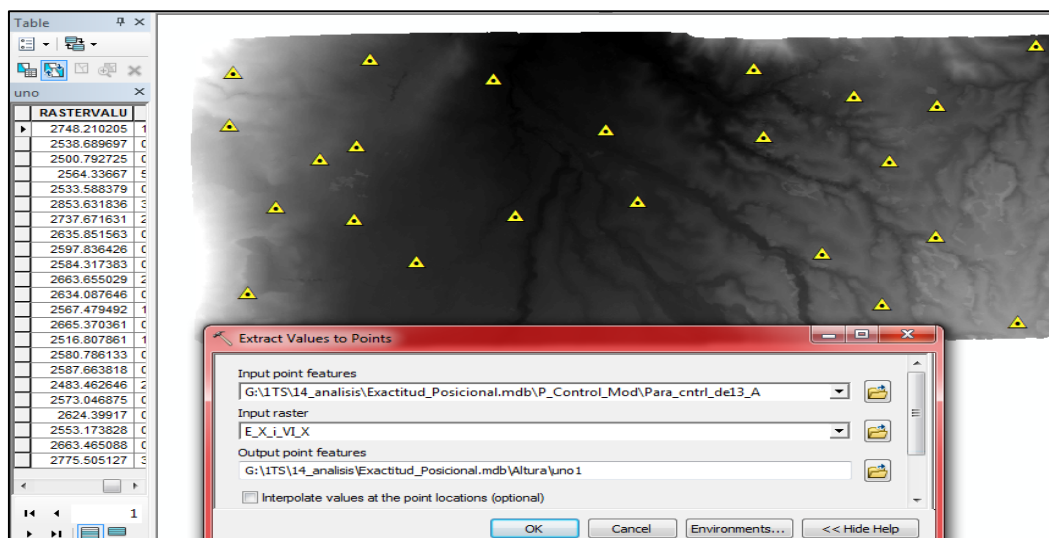
Además, los identificadores se presentan en el apartado 4.6.2 de los resultados tabla 28.

### 3.7.3. Control de calidad de los mosaicos de MDS

Al realizar la calidad de los mosaicos de MDS, se debe importar cada MDS, uno a la vez, de la base de datos "Base\_datos\_MDS" e importar los puntos de control de la tabla 28 (con sus coordenadas en el programa ARCGIS).

Dependiendo del producto a evaluar, por ejemplo: 13GCP o 19GCP, se utilizarán los 23 puntos de calidad para cada caso y se extrae el valor del pixel (valor de altura elipsoidal en el caso de LPS u Orima); así también, se extrae el valor de altura ortométrica en el caso del mosaico MDS producto del ajuste en Z/I Imagine, pues los puntos de control tenían el modelo geoidal propuesto por el IGM.

Según Kirby (2007) y Mancerto et al (2015), la extracción del valor del pixel se realiza con la herramienta “extract values to points”; a fin de determinar las diferencias entre la altura del raster con la altura del punto de control; tal y como se muestra en la Figura.121.



**Figura.121** Extracción de valores del MDS respecto de los puntos de control

Una vez obtenidos los valores de la diferencia de altura entre el valor del raster y el del control (altura elipsoidal en productos LPS u Orima y altura ortométrica en productos del ajuste Z/I Imagine), se procede a calcular los valores estadísticos como: mínimo, máximo, media y desviación estándar, RMSEz vistos en las “Definiciones de estadísticos” del apartado 2.7.1; así pues, se realiza el proceso de evaluación para cada mosaico de MDS detallado a continuación, cuyos resultados se presentan en el apartado 4.6.3.

La validación de los mosaicos de MDS, representa una dificultad extra, pues en este proyecto se utilizó la altura elipsoidal y los estándares de confiabilidad trabajan con MDE; es decir, eliminan manualmente de forma estereoscópica estructuras como: edificios, construcciones, y consideran

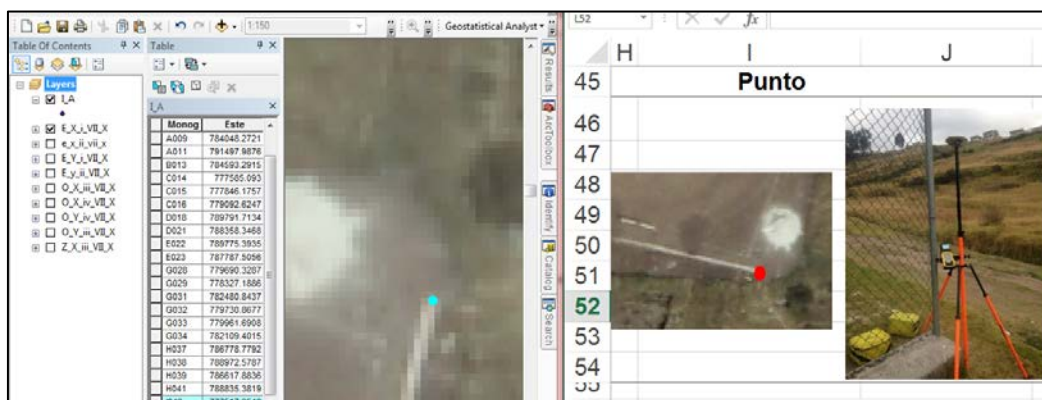
accidentes geográficos de la restitución, edición de la nube de puntos o insertan tecnología de nubes de puntos, como LIDAR para mejorar el producto (Soria, 2014); sin embargo, los puntos de exactitud están tomados a nivel de piso, eliminando así ciertas equivocaciones que pudieran ocurrir; además, se puede calcular el límite de aceptación con el criterio expuesto por el IGM, el cual indica el intervalo de curva y dividirlo para 4, ( $5m/4=1.25m$ ).

#### *3.7.4. Control de calidad de los ortomosaicos*

A continuación se realiza el control de calidad de la exactitud posicional de los ortomosaicos para escala 1:5000, considerando la norma “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” de la ASPRS y la propuesta por el IGM para fiscalizar proyectos obtenidos por métodos fotogramétricos; en los cuales, se utilizan las definiciones de RMSEr, así como la utilización de las ecuaciones 14 y 15 de los casos vistos en el apartado 2.6.7, con cierto nivel de confianza. Dicho proceso es secuencial con cada ortomosaico, detallado a continuación:

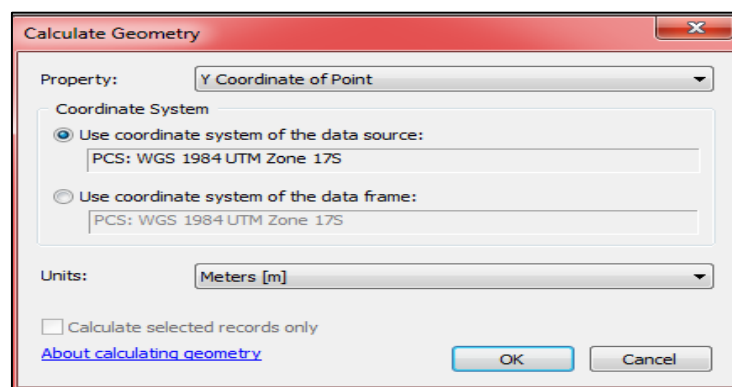
Realizar la exactitud posicional de ortomosaicos requiere la importación de los mismos, de la base de datos “Base\_datos\_ortomosaicos” en ARCGIS y crear un archivo de tipo vectorial (entidad de puntos, mismos ID que fueron utilizados en el MDS) por cada ortomosaico; posteriormente, con una escala adecuada (1:150, para este estudio) y fija se procede a pinchar cada detalle de acuerdo a la monografía, hasta obtener todos los puntos pinchados (ver Figura 122).





**Figura 122.** Ejemplo de punto pinchado en exactitud posicional

Una vez marcados los puntos en la imagen, se procede a calcular las coordenadas, Este (x) con la herramienta “Calculate Geometry”, sistema de referencia WGS84 UTM zona 17 Sur y luego, la coordenada Norte (y), con la misma herramienta (ver Figura 123).



**Figura 123.** Cálculo de la coordenada Norte en ARCGIS

Posteriormente, se realiza la diferencia entre las coordenadas Este y Norte calculadas del ortomosaico, con las obtenidas en los puntos de exactitud posicional (ver tabla 26), cuyos ID se indican en la tabla 28; generando así, un  $\Delta x$  y un  $\Delta y$ , a los cuales se les aplica la raíz cuadrada de

sus componentes al cuadrado para representar el error planimétrico (Pintos, 2016); tal y como se observa en la ecuación 22; donde, “r” representa el error planimétrico:

$$r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad [22]$$

Dichos valores se pueden representar en forma de círculos a lo largo del proyecto y para cada resultado, indicados en el apartado 4.6.4 “Resultados del error planimétrico de los ortomosaicos”, dando una apreciación de los errores a lo largo de cada ortomosaico.

Posteriormente, de cada ortomosaico se procede a calcular los siguientes estadísticos: máximo, mínimo, error medio (ecuación 18), desviación estándar (ecuación 19), RMSE<sub>x</sub>, RMSE<sub>y</sub> (ecuación 13 para X e Y) y RMSE<sub>r</sub>, indicados en la tabla 32 del apartado 4.6.5. Este es un proceso secuencial, realizado para todos los ortomosaicos; además, se calcula la relación entre RMSE<sub>min</sub>/RMSE<sub>max</sub>, para su aplicación en el tipo de ecuación, según los casos del apartado 2.6.7; donde, los valores menores a 0.6 indican la aplicabilidad de la ecuación 14, (ver tabla 33).

Luego, se debe calcular la confiabilidad de la exactitud posicional de cada ortomosaico; aplicando la normativa IGM (ver apartado 2.6.7), considera dos posibles casos; donde, RMSE<sub>x</sub> ≠ RMSE<sub>y</sub>, aplicar la ecuación 15 bajo las condiciones de RMSE<sub>min</sub>/RMSE<sub>max</sub> entre 0.6 y 1 (FGDC, 1998), con un 90% de confiabilidad; si dicho valor no se encuentra en dicho rango se aplica el RMSE<sub>r</sub> con la ecuación 14, tal como indica los ejemplos de la Figura 124 a continuación:

Cuando RMSEmin/RMSEmax menor a 0.6
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecuación 14</li> <li>• <math>Exactitud = 1.5175 * \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}</math></li> <li>• Ejemplo: <math>Exactitud = 1.5175 * \sqrt{0.26_x^2 + 0.673_y^2}</math></li> </ul>
Cuando RMSEmin/RMSEmax entre 0.6 y 1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecuación 15</li> <li>• <math>Exactitud = 2.146 * 0.5 * (RMSE_x + RMSE_y)</math></li> <li>• Ejemplo: <math>Exactitud = 2.146 * 0.5 * (0.308_x + 0.413_y)</math></li> </ul>

**Figura 124.** Ejemplos de la normativa IGM

Los resultados de dichos cálculos se presentan en la tabla 34 del apartado 4.6.5; así como, la escala máxima que podrían ser utilizados dichos ortomosaicos; además, el límite de la exactitud posicional se calcula con la normativa ISO (0.2mm), al realizar el producto del módulo de la escala (1:5000) por 0.2mm, dando un margen de exactitud de hasta  $\pm 1m$ .

En el caso de la normativa ASPRS, el límite de la exactitud posicional viene dado por la tabla 11 (ver apartado 2.6.7) cuyo valor máximo al 95% de confiabilidad es de 1.101m, para un GSD de 30cm aproximadamente y un RMSEr de 63.6cm; eso quiere decir, que el cálculo se realiza de la siguiente manera: se considera  $RMSE_x = RMSE_y$ ; por tanto,  $RMSE_r = \sqrt{2} * RMSE_x$ ; al despejar  $RMSE_x$  de la fórmula anterior y sustituir valores de la tabla 10 al 95% de confianza (2.448), quedaría:

$$Exactitud = 2.448 * \frac{RMSE_r}{\sqrt{2}} = 1.731 * RMSE_r$$

Los resultados de dichos cálculos se presentan en tablas del apartado 4.6.5 “Resultados estadísticos de los ortomosaicos”.

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS

A continuación se presenta los resultados de la metodología seguida en el capítulo III, el cual contiene los siguientes resultados: recopilación de información secundaria, puntos de control fotogramétrico, puntos de control de exactitud posicional, reportes de aerotriangulación, mosaicos de MDS, ortomosaicos y los resultados de la exactitud posicional.

#### 4.1. Resultados de la recopilación de la información secundaria

La información secundaria recopilada se compone de archivo IMU/GPS, 11 monografías y un bloque fotogramétrico con la orientación relativa, detallados a continuación:

##### 4.1.1. Resultados del archivo IMU/GPS

En la tabla 24 se presenta los resultados de la depuración de los datos del archivo APLANIX, convertidos en un archivo IMU/GPS, con alturas elipsoidales.

#### **Tabla 24.**

##### *Resultados del Aplanix a archivo IMU/GPS*

ID	ID Imagen	Este [m]	Norte [m]	Altura Elipsoidal [m]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]
1	18_537	779600.63	9967843.6	8169.182	0.0416	-0.04853	90.37356
2	18_538	779601.626	9966757.46	8173.792	-0.01069	-0.03016	90.36288
3	18_539	779606.87	9965671.8	8176.02	0.00764	0.02138	90.77048
4	18_540	779608.866	9964587.24	8182.397	-0.00806	0.01311	90.72516
5	18_541	779611.025	9963501.22	8188.567	-0.01906	-0.02381	90.49753


*Continúa*

6	18_542	779610.071	9962415.35	8192.357	-0.01376	-0.04808	90.3844
7	19_829	782920.95	9967843.16	8061.632	-0.00265	-0.00086	90.57297
8	19_830	782924.813	9966756.88	8079.166	0.0115	0.03149	90.78829
9	19_831	782920.221	9965671.43	8090.674	-0.00313	0.01497	89.87836
10	19_832	782910.383	9964585.81	8090.774	-0.02632	-0.04906	89.80962
11	19_833	782903.72	9963500.57	8087.801	-0.07438	-0.06778	90.23134
12	19_834	782910.113	9962414.37	8077.443	-0.01064	0.01272	91.28653
13	20_930	786049.019	9967842.94	7937.704	-0.00434	-0.04291	90.41697
14	20_931	786038.15	9966756.89	7938.27	-0.0074	-0.01244	89.73513
15	20_932	786047.979	9965670.5	7942.211	0.35156	-0.27173	91.15116
16	20_933	786053.574	9964585	7941.944	-0.00227	0.00818	90.92673
17	20_934	786066.23	9963499.42	7941.904	-0.00697	-0.00412	90.75133
18	20_935	786072.414	9962413.6	7941.751	0.01012	-0.01319	91.21998
19	21_1240	789242.761	9962417.51	7970.547	-0.00699	0.00717	-89.61191
20	21_1241	789237.764	9963503.24	7968.981	-0.01808	0.00813	-89.05275
21	21_1242	789232.637	9964588.85	7967.548	-0.02998	-0.06778	-89.0905
22	21_1243	789232.489	9965674.49	7967.643	0.00284	0.03265	-89.72829
23	21_1244	789229.065	9966759.89	7969.621	-0.01897	0.07312	-89.61975
24	21_1245	789224.838	9967845.7	7970.452	0.00993	-0.04079	-89.62154

#### 4.1.2. Resultados de la recopilación de monografías y bloque fotogramétrico.

Se presenta a continuación en la tabla 25, el elenco de coordenadas de los 11 puntos de control fotogramétrico tomados por Barragán (2015) con equipo GNSS de doble frecuencia (L1/L2).

**Tabla 25.**

*Elenco de coordenadas de las monografías de Barragán (2015)*

ID	NORTE [m]	ESTE [m]	Precisión Horizontal [m]	Precisión Vertical [m]	Altura elipsoidal [m]
<b>GCPC</b>	9967656.246	781210.625	0.012	0.014	2565.285
<b>GCPG</b>	9963447.427	787229.463	0.005	0.009	2560.211
<b>GCPI</b>	9967190.456	787605.817	0.007	0.010	2554.092
<b>GCPX</b>	9968275.126	777028.821	0.013	0.028	3007.168
<b>GCPY</b>	9962161.490	791186.294	0.014	0.025	2749.505
<b>GCPE</b>	9965033.915	784443.902	0.001	0.002	2520.095

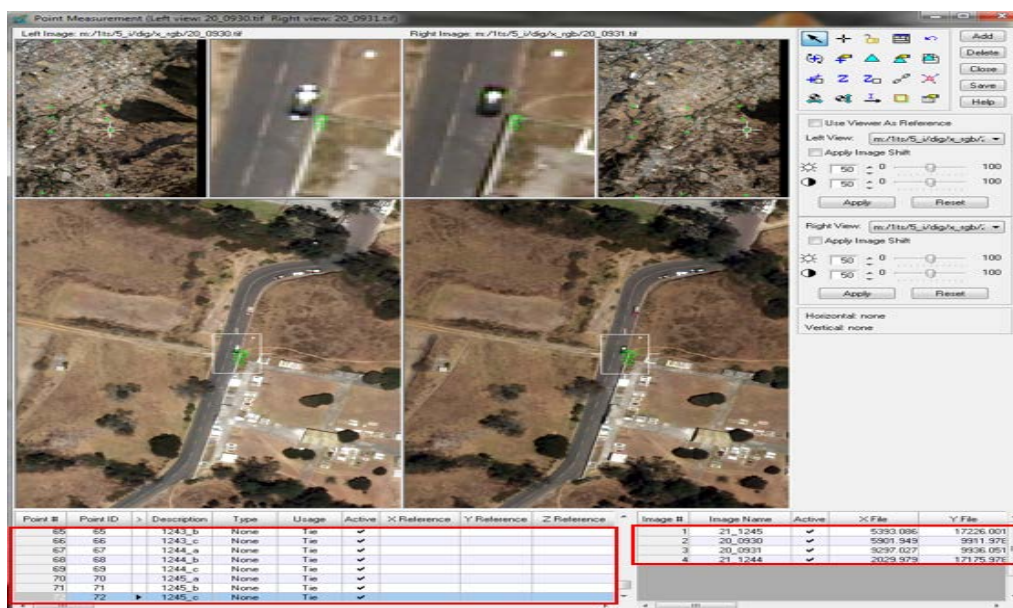


*Continúa*

<b>GCPA</b>	9963512.875	780761.586	0.005	0.006	2538.293
<b>GCPD</b>	9963076.165	784612.941	0.003	0.005	2551.316
<b>GCPF</b>	9966469.118	784048.411	0.002	0.003	2500.598
<b>GCPW</b>	9961837.692	777372.520	0.005	0.011	2839.422
<b>GCPZ</b>	9968378.800	791497.809	0.007	0.009	2566.699

Fuente: (Barragán, 2015)

Posteriormente se indica el resultado del bloque fotogramétrico de nombre “Bloque\_ruminahui\_gruber.blk” con la orientación relativa (72 puntos de Von Gruber) (ver Figura 125).



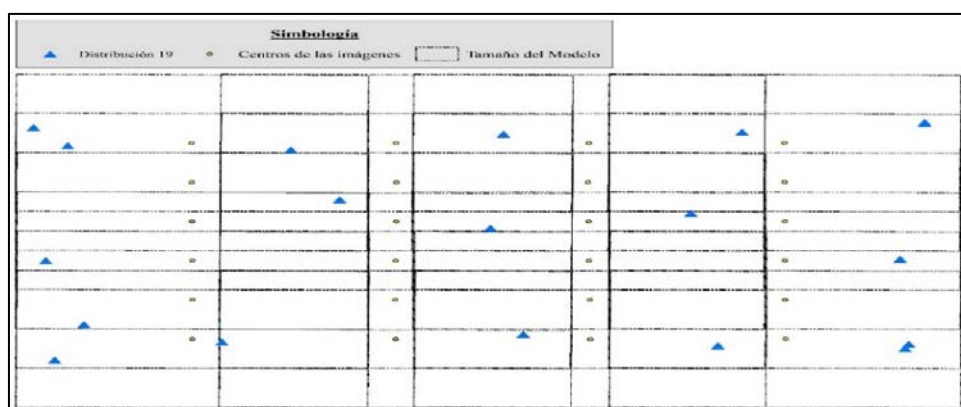
*Figura 125.* Bloque fotogramétrico con los puntos de Von Gruber

## 4.2. Resultados de las distribución de los GCP y puntos de exactitud posicional

A continuación se presentan las distribuciones de GCP, los resultados del procesamiento y sus monografías.

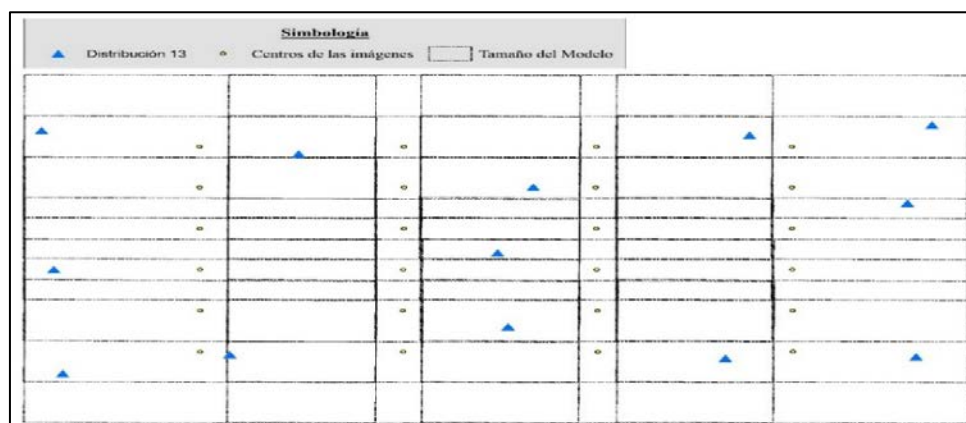
#### 4.2.1. Distribución resultante de los GCP

En las campañas de campo se logró obtener 19 puntos de control modificados, de los planteados en “Distribución A de planificación”, debido a los factores descritos, logrando una distribución final como la Figura 126, denominada “Distribución 19”.



**Figura 126.** Distribución 19 modificada de Ackermann e IGN

En la “Distribución B de planificación”, se logró obtener 13 puntos de control que se denominan “Distribución 13”, ver Figura 127.



**Figura 127.** Distribución 13 modificada de Ackermann, DTC y Mikhail et al

#### 4.2.2. Resultados de los puntos procesados

A continuación se presenta un resumen de los 45 puntos de control (ver tabla 26) en donde la columna “uso” representa la participación del punto: 1300 en “Distribución 13”, 1900 “Distribución 19”, 1319 puntos compartidos en ambas distribuciones y “9999” puntos solamente en control de calidad; además, los puntos obtenidos de Barragán (2015), tienen una codificación desde el A001 hasta A011.

**Tabla 26.**

*Detalles de los puntos a utilizar en el proyecto*

No	Mon.	Norte [m]	Este [m]	Altura Elip [m]	P. Horizontal [m]	P. Vertical [m]	Uso	PDOP	RMS [m]
1	A001	9967656.246	781210.625	2565.285	0.012	0.014	1319	3.901	0.001
2	A004	9968275.126	777028.821	3007.168	0.013	0.028	1319	2.738	0.001
3	A005	9962161.490	791186.294	2749.505	0.014	0.025	1900	2.262	0.002
4	A006	9965033.915	784443.902	2520.095	0.001	0.002	1300	1.831	0.001
5	A007	9963512.875	780761.586	2538.293	0.005	0.006	9999	1.792	0.001
6	A008	9963076.165	784612.941	2551.316	0.003	0.005	1300	2.645	0.001
7	A009	9966469.118	784048.411	2500.598	0.002	0.003	9999	1.795	0.001
8	A010	9961837.692	777372.520	2839.422	0.005	0.011	1319	1.85	0.001
9	A011	9968378.800	791497.809	2566.699	0.007	0.009	1900	2.55	0.001
10	B012	9965493.415	784449.746	2536.315	0.003	0.004	1900	2.31	0.035
11	B013	9964861.857	784593.351	2533.752	0.002	0.004	9999	2.943	0.019
12	C014	9967772.804	777584.835	2855.623	0.005	0.006	1900	2.351	0.017
13	C015	9962820.938	777846.513	2739.132	0.008	0.012	1900	3.65	0.05
14	C016	9965824.004	779092.843	2635.156	0.003	0.007	9999	3.055	0.032
15	C017	9966273.223	782002.918	2495.664	0.003	0.007	1900	2.234	0.028
16	D018	9967035.860	789791.892	2597.935	0.004	0.005	9999	1.661	0.008
17	D019	9968418.687	791501.879	2566.403	0.003	0.006	1319	4.006	0.022
18	D020	9962277.748	791243.853	2745.658	0.005	0.007	1319	2.191	0.025



*Continúa*



19	D021	9967244.513	788358.962	2584.207	0.009	0.012	9999	1.927	0.02
20	E022	9964078.560	789775.334	2665.371	0.007	0.010	9999	2.242	0.004
21	E023	9963708.520	787787.327	2633.524	0.004	0.005	9999	2.696	0.004
22	F024	9965176.010	784214.625	2513.177	0.009	0.009	9999	2.973	0.057
23	G025	9962549.158	784984.339	2542.502	0.003	0.005	1900	2.2	0.031
24	G027	9963771.070	781646.642	2525.163	0.003	0.006	9999	2.556	0.021
25	G028	9964456.279	779690.547	2566.468	0.005	0.007	9999	2.419	0.028
26	G029	9964739.779	778327.645	2665.444	0.004	0.006	9999	2.992	0.005
27	G030	9962336.083	780091.176	2548.380	0.005	0.008	1319	3.234	0.03
28	G031	9964555.417	782481.062	2515.589	0.004	0.008	9999	3.381	0.031
29	G032	9966117.958	779731.086	2580.365	0.004	0.011	9999	1.999	0.008
30	G033	9968074.305	779961.790	2588.003	0.004	0.007	9999	2.308	0.019
31	G034	9967618.262	782109.461	2481.900	0.007	0.008	9999	2.535	0.015
32	G035	9968088.631	784663.021	2467.400	0.008	0.009	1900	3.029	0.031
33	H036	9966770.619	785022.167	2520.288	0.004	0.005	1300	2.171	0.032
34	H037	9966330.902	786779.358	2574.013	0.003	0.004	9999	2.135	0.005
35	H038	9965783.320	788972.916	2624.833	0.003	0.006	9999	2.871	0.004
36	H039	9967850.290	786617.705	2553.060	0.004	0.006	9999	2.442	0.024
37	H040	9966343.337	791102.277	2643.703	0.005	0.006	1300	2.468	0.014
38	H041	9962567.981	788835.878	2662.558	0.004	0.005	9999	2.161	0.012
39	H042	9964632.445	791103.463	2702.164	0.003	0.006	1900	2.35	0.014
40	I043	9966579.049	777517.754	2777.439	0.004	0.006	9999	2.224	0.02
41	I044	9964590.208	777231.054	2883.821	0.008	0.013	1319	3.002	0.06
42	I046	9962237.604	788143.583	2668.340	0.008	0.009	1319	2.852	0.009
43	I047	9965901.908	787705.991	2599.474	0.033	0.015	1900	3.105	0.042
44	I048	9968145.553	788537.474	2625.437	0.007	0.012	1319	2.305	0.025
45	J049	9965154.951	784198.465	2513.230	0.002	0.003	9999	2.228	0.015

Nota: Mon (Monografía), P (Precisión), Elip (Elipsoidal).

La distribución espacial de todos los puntos se presenta en la Figura 128; en el cual el color verde representa los puntos de exactitud posicional y los triángulos rojos los puntos de control (GCP).

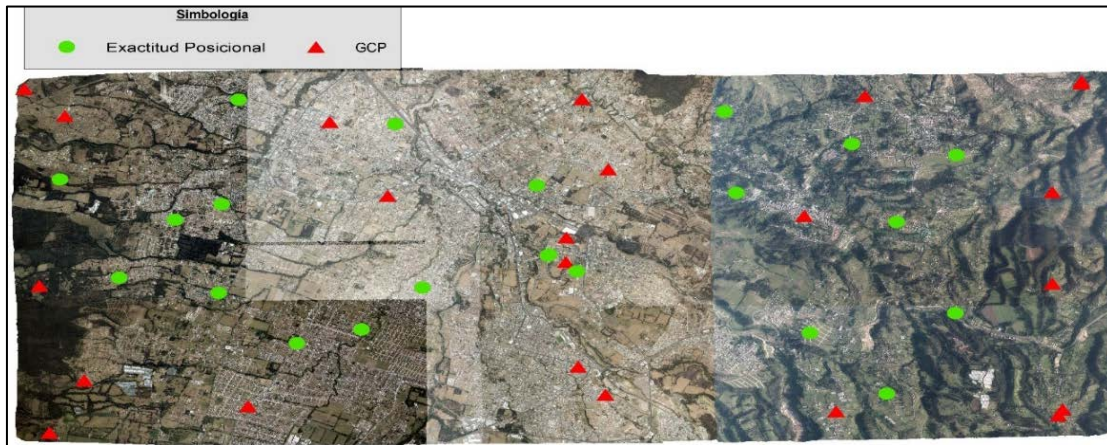


Figura 128. Distribución de GCP's y puntos de exactitud posicional.

El detalle de las características de cada punto se representa en una monografía, cuyo ejemplo se presenta en la Figura 129 y el resto de monografías se ubican en el Anexo 2; además, se realizaron las monografías de los puntos mencionados en la tabla 17, exceptuando el punto X100, debido a un PDOP excesivo.

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE PROYECTO CONTROL DE CALIDAD RUMIÑAHUI		ESPE ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE INGENIERÍA	
PROVINCIA: PICHINCHA	CANTÓN: Quito	PARROQUIA: Quito	
FECHA: 25-esp-17	ORDEN: PUNTO GPS	NOMBRE DEL PUNTO: I046	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS UTM:	
Latitud: <input s"="" type="text" value="0°20'28.87000"/>	ZONA: <input type="text" value="17"/>	Sistema de Referencia: <input type="text" value="ITRS"/>	<input type="text" value="2015-436"/>
Longitud: <input o"="" type="text" value="78°24'40.92887"/>	NORTE (m): <input type="text" value="9962237.854"/>	Época de Referencia: <input type="text" value="2008"/>	
Altura Elipsoidal (m): <input type="text" value="2898.540"/>	ESTE (m): <input type="text" value="781146.807"/>	Elipsoide de Referencia: <input type="text" value="GRS80"/>	
Altura m.a.s.n.m. (m): <input type="text" value="2840.854"/>	Precisión Horizontal (m): <input type="text" value="0.000"/>	Precisión Vertical (m): <input type="text" value="0.000"/>	
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<b>Identificación del sector en la fotografía aérea 1246</b>		
A partir de la entrada principal de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE según la Av. General Planchart hasta llegar al nivel del Coribit y tomar la Panamericana (E35). Girar en el desvío de la segunda etapa del campeonato, andenes del Tíade, recorrer aproximadamente 1.8 km, girar a la izquierda y en 150 m se encontrará el hecho de una casita de una cancha, está ubicado el punto.			
<b>MONUMENTACIÓN:</b>	<b>Ubicación del Punto de Control</b>		
El punto está ubicado en dirección suroriente en la esquina a nivel de la calle lateral.			
<b>ABASTECIMIENTOS:</b>	<b>Punto</b>		
<b>NOTA:</b>			
* Para el cálculo de la altura ortométrica se utilizó el modelo geoidal del Instituto Geográfico Militar. * El punto se encuentra ubicado en las fotografías aéreas 934, 935, 1240 y 1241 de la serie de vuelo 30 y 21 respectivamente.			
<b>OBSERVACIONES:</b>	Para la realización de este trabajo se utilizó el GPS de una frecuencia Frecuencia F3 durante 30 minutos de tiempo y con un intervalo de grabación de 5 Segundos		
<b>ELABORADO POR:</b> Christian Bona	<b>PUNTO TOMADO POR:</b> Alex Chiquizharco	<b>REVISADO POR:</b> Ing. Eduardo Kirby	

Figura 129. Monografía I046

### 4.3. Resultados de aerotriangulación con diferentes programas fotogramétricos

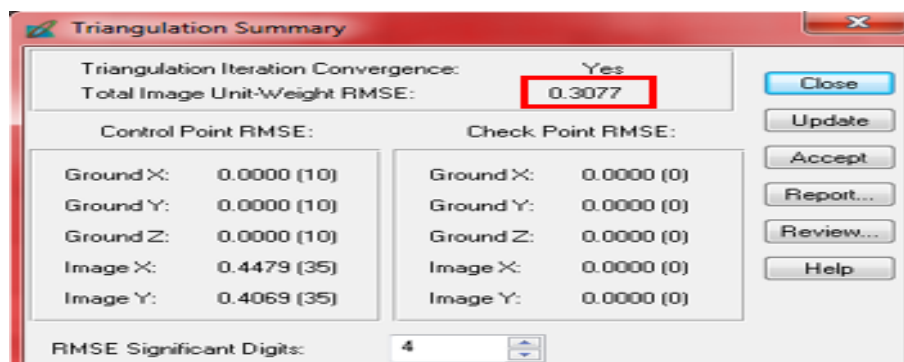
A continuación se presentan los 9 ajustes de la aerotriangulación de los programas fotogramétricos Erdas-LPS, Orima y Z/I Imagine.

#### 4.3.1. Resultados de la aerotriangulación en Erdas-LPS

Se realizaron 4 ajustes de la aerotriangulación, de la siguiente manera: dos ajustes con la distribución de 13 puntos de control, considerando la matriz de pesos y sin considerar la matriz; dos ajustes con la distribución de 19 puntos de control, considerando la matriz de pesos y sin considerar la matriz de pesos, los mismos que se muestran a continuación:

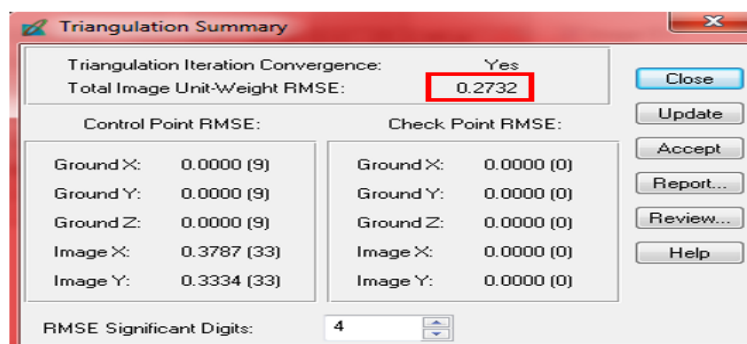
##### 4.3.1.1. Resultado de la aerotriangulación sin matriz de pesos y 13GCP en LPS

La aerotriangulación global no consideró en el ajuste los siguientes puntos de control: A004, I044 e I048; además, tiene un RMSE de 0.4479m en el eje X de las imágenes, un RMSE de 0.4079m en el eje Y de las imágenes y un RMSE total de 0.3077m (ver Figura 130).



**Figura 130.** Reporte A. sin matriz de pesos y 13GCP en LPS



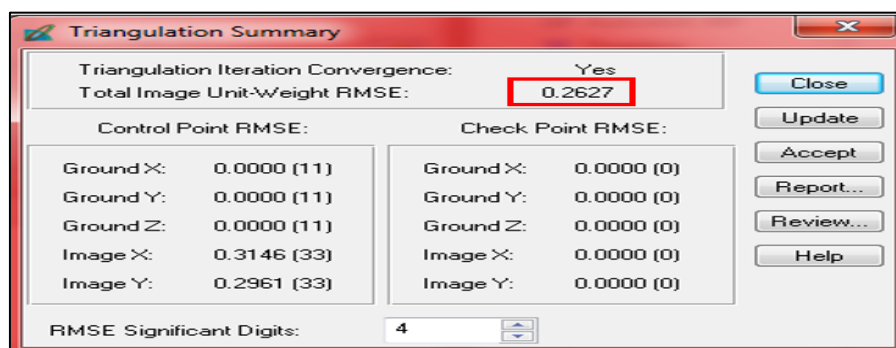


**Figura 132.** Reporte A. con matriz de pesos y 13GCP en LPS

También, se genera un reporte en el que incluye el total de los puntos considerados en el ajuste (307 tie points); de los cuales 143 de ellos se han pinchados en más de 4 imágenes; el resto del contenido del reporte se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.1.3. Resultado de la aerotriangulación sin matriz de pesos y 19GCP en LPS

La aerotriangulación global no consideró en el ajuste los siguientes puntos de control: A001, A004, A005 A010, A001, C014, D019, e I044; además, tiene un RMSE de 0.3146m en el eje X de las imágenes, un RMSE de 0.2961m en el eje Y de las imágenes y un RMSE total de 0.2627m (ver Figura 133).

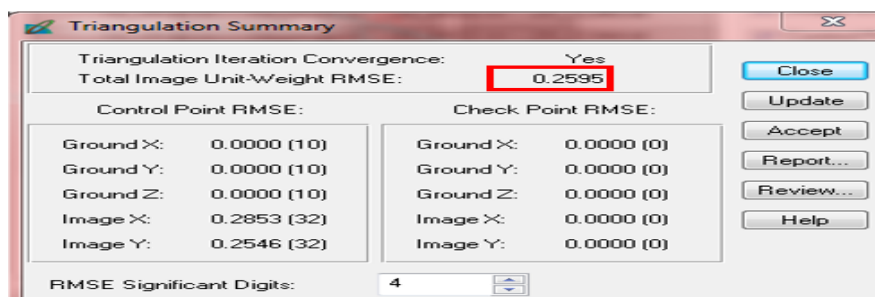


**Figura 133.** Reporte A. sin matriz de pesos y 19GCP en LPS

De la misma forma, se puede generar un reporte de la aerotriangulación con el total de puntos considerados en el ajuste (310 tie points); de los cuales 143 de ellos, se encuentran pinchados en más de 4 imágenes; el contenido completo del reporte se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.1.4. Resultado de la aerotriangulación con matriz de pesos y 19GCP en LPS

La aerotriangulación global no consideró en el ajuste los siguientes puntos de control: A001, A004, A005 A010, A001, C014, D019, I044 e I048; además, tiene un RMSE de 0.2853m en el eje X de las imágenes, un RMSE de 0.2546m en el eje Y de las imágenes y un RMSE total de 0.2595m (ver Figura 133).



**Figura 134.** Reporte A. con matriz de pesos y 19GCP en LPS

De la misma forma, se puede generar un reporte de aerotriangulación, que incluye el total de los puntos utilizado en el ajuste (310 tie points), de los cuales 144 de ellos han sido pinchados en más de cuatro imágenes; el contenido completo del reporte se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.2. Resultados de la aerotriangulación en ORIMA

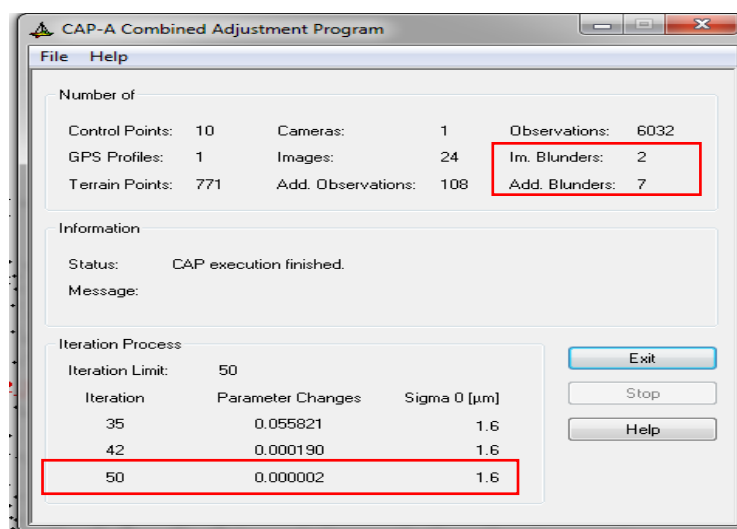
Se realizaron 4 ajustes de la aerotriangulación en el programa Orima 11.00 de la siguiente forma: dos ajustes con la distribución de 13 GCP, considerando un ajuste en bloque y un ajuste en línea

de vuelo; así mismo, dos ajustes con la distribución de 19 GCP, considerando un ajuste en bloque y un ajuste en línea de vuelo, los mismos que se detallan a continuación:

#### 4.3.2.1. Resultado de la aerotriangulación en bloque y 13 GCP en Orima

La aerotriangulación de Orima, resulta de un proceso de edición de puntos manual; donde, no se consideró los puntos de control: A010, I044 e I048, debido a residuales muy altos (RMS de 0.37m en cada componente). El RMSE de las componentes del ajuste resultante son: RMSE X (0.057m), RMSE Y (0.336m) y RMSE Z (0.144m).

Al correr el programa CAP-A del ajuste de Orima genera un reporte, con la cantidad de puntos con errores que sobrepasan los límites y no han sido eliminados (Im. Blunders = 2); además, presenta la cantidad de otros errores no corregidos (Add. Blunders = 7) y el valor de Sigma 0 (1.6 $\mu$ m) con el número de iteración de convergencia (ver Figura 135), entre otros valores.



**Figura 135.** Reporte A. en bloque y 13GCP en Orima

El reporte de Orima es de formato txt y contiene la ubicación de los diferentes archivos generados automáticamente como: parámetros del modelo, mediciones de las coordenadas de modelo, codificación de los puntos de amarre, coordenadas del centro de las imágenes, ángulos de rotación, entre otros datos (ver Figura 136), detallados en el Anexo 6 (Tema: Apertura de Orima); así mismo, el contenido completo del reporte se presenta en el Anexo 4.

```

*** CAP Combined Adjustment Program *** Rel. 11.00 (C) L.
Hinsken 1988-2010

Start of execution : 11-Jul-18  10:57:21

Job control parameters from file   : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\cap.prj

Printout file                       : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\printout.0
File with object coordinates       : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\object.cap
File with image coordinates       : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\images.mea
File with accuracy table          : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\accuracy.tab
File with additional observations  : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\addition.cap
File with GPS observations        : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\initialexori.dat
File with camera parameters      : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\camera.cap
File with exterior orientation    : M:\1TS\4_Prue\5\o_y_i_v
\o_y_i_iii\exterior.cap
Maximum number of iterations      :          50
Sigma0 a priori                   :          0.0020
Blunder elimination limit        :              0

```

**Figura 136.** Reporte de Aerotriangulación en Orima.

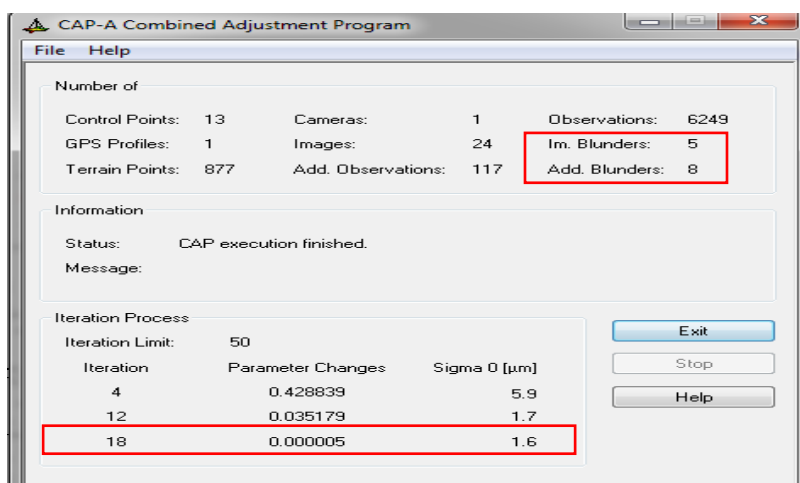
A su vez, la cantidad total de puntos utilizados en el ajuste fue de 781, de los cuales 410 de ellos fueron pinchados en más de cuatro imágenes.

#### 4.3.2.2. Resultado de la aerotriangulación en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima

La aerotriangulación de Orima, resulta de un proceso de editado de puntos manual. Al correr el programa CAP-A de ajuste de Orima genera un reporte, con la cantidad de puntos con errores que



sobrepasan los límites y no han sido eliminados (Im. Blunders = 5); además, presenta la cantidad de otros errores no corregidos (Add. Blunders = 8) y el valor de Sigma 0 (1.6  $\mu\text{m}$ ) con el número de iteración de convergencia (ver Figura 137), entre otros valores. Los valores de RMSE por componentes son: RMSE X (0.057m), RMSE Y (0.099m) y RMSE Z (0.02m).



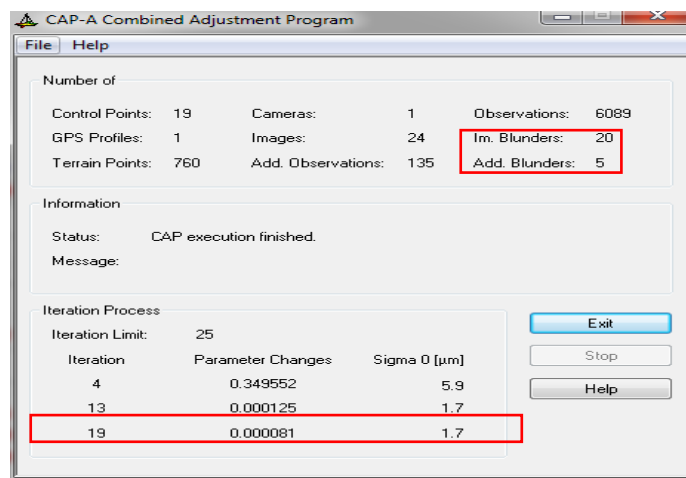
**Figura 137.** Reporte A. en líneas de vuelo y 13GCP en Orima

Además, el número total de puntos utilizados en el ajuste es de 890 tie points; donde, 391 de ellos han sido pinchados en más de 4 imágenes. El contenido completo del reporte de aerotriangulación se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.2.3. Resultado de la aerotriangulación en bloque y 19GCP en Orima

Como se ha mencionado la aerotriangulación final de Orima, resulta de un proceso de editado de puntos manual, al ejecutar el programa CAP-A de ajuste que genera una ventana con la cantidad de puntos con errores que sobrepasan los límites y no han sido eliminados (Im. Blunders = 20); además, presenta la cantidad de otros errores no corregidos (Add. Blunders = 5) y el valor de

Sigma0 (1.7  $\mu\text{m}$ ) con el número de iteración de convergencia (ver Figura 138), entre otros valores. El RMS por componentes del ajuste son: RMSE X (0.053m), RMSE Y (0.071m) y RMSE Z (0.018m).



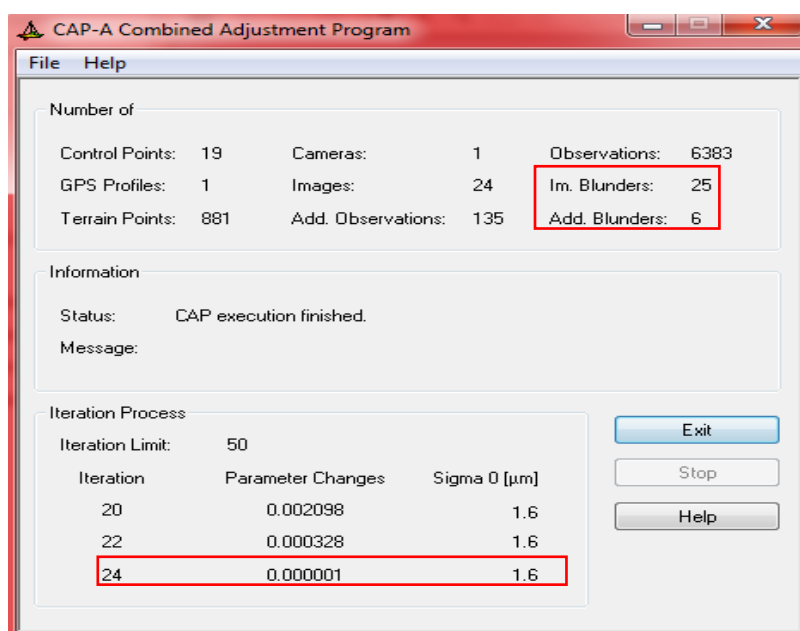
**Figura 138.** Reporte A. en bloque y 19 GCP en Orima

Así mismo, en el reporte se presenta la cantidad de puntos utilizados en el ajuste (779 tie points), de los cuales 417 han sido pinchados en más de 4 imágenes. El contenido completo del reporte se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.2.4. Resultado de la aerotriangulación en líneas de vuelo y 19GCP en Orima

La aerotriangulación de Orima, resulta de un proceso manual de edición de puntos y al ejecutar el programa CAP-A de ajuste se genera un reporte, con la cantidad de puntos con errores que sobrepasan los límites y no han sido eliminados (Im. Blunders = 25); además, presenta la cantidad de otros errores no corregidos (Add. Blunders = 6) y el valor de Sigma 0 (1.6 $\mu\text{m}$ ) con el número

de iteración de convergencia (ver Figura139), entre otros valores. El valor de RMSE por componentes son los siguientes: RMSE X (0.056m), RMSE Y (0.07m) y RMSE Z (0.023m).

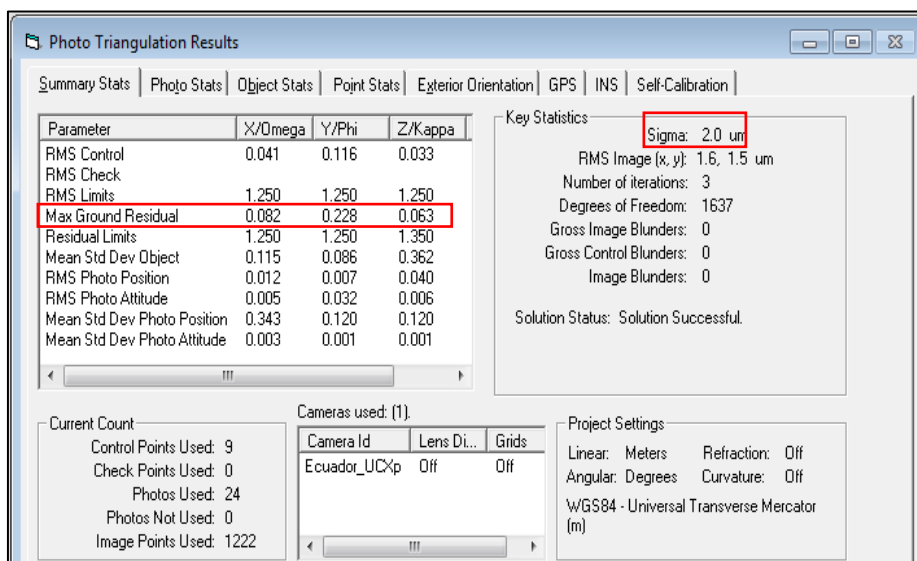


**Figura139.** Reporte A. en líneas de vuelo y 19GCP en Orima

A continuación, en el reporte se indica la cantidad total de puntos utilizados en el ajuste (900), de los cuales 400 de ellos han sido pinchados en más de 4 imágenes. El contenido completo del reporte se presenta en el Anexo 4.

#### 4.3.3. Resultado de la aerotriangulación en Z/I Imagine

Se realizó un ajuste en el módulo ImageStation Automatic Triangulation, del programa Z/I Imagine con los 13 puntos de control; sin embargo, el programa eliminó automáticamente los puntos: A010, D020, G030 y H040; además, se presenta un RMS por componentes cuyos valores son: RMS X (0.082m), RMS Y (0.228m) y RMS Z (0.063m) (ver Figura 140) y un sigma de 2um.



**Figura 140.** Reporte A. en bloque y 13GCP en Z/I Imagine

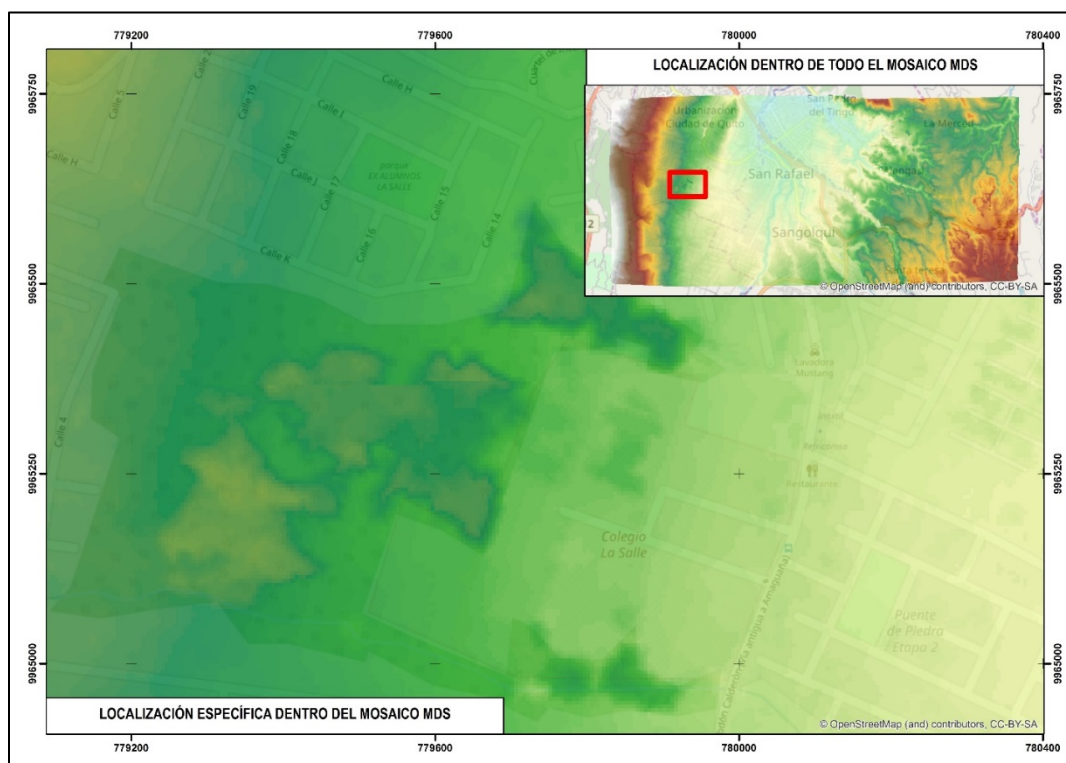
A pesar de que en la configuración del programa se insertaron los umbrales máximos, el proyecto no sobrepasa dichos valores (1.25m); además, los valores máximos de los residuales son: 0.082m, 0.228m y 0.063m en cada componente; también, en el reporte del ajuste en Z/I Imagine se indica que se utilizaron 284 puntos; donde, 183 fueron pinchados en más de cuatro imágenes. El contenido completo del reporte se encuentra en el Anexo 4.

#### 4.4. Resultados de los mosaicos de Modelos Digitales de Superficie

Se generaron en total 161 modelos digitales de superficie, distribuidos de la siguiente manera: 80 MDS con la aerotriangulación en Erdas, 80 MDS con la aerotriangulación en ORIMa y un MDS generado del ajuste en ZI/Imagine, detallados sus mosaicos a continuación:

#### 4.4.1. Resultado del mosaico MDS sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste con 13 GCP y sin considerar la matriz de pesos en LPS-Core, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3030.17m y mínimo de 2440.38m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 141); además se presenta una zona representativa de color verde (vegetación) de ejemplo.

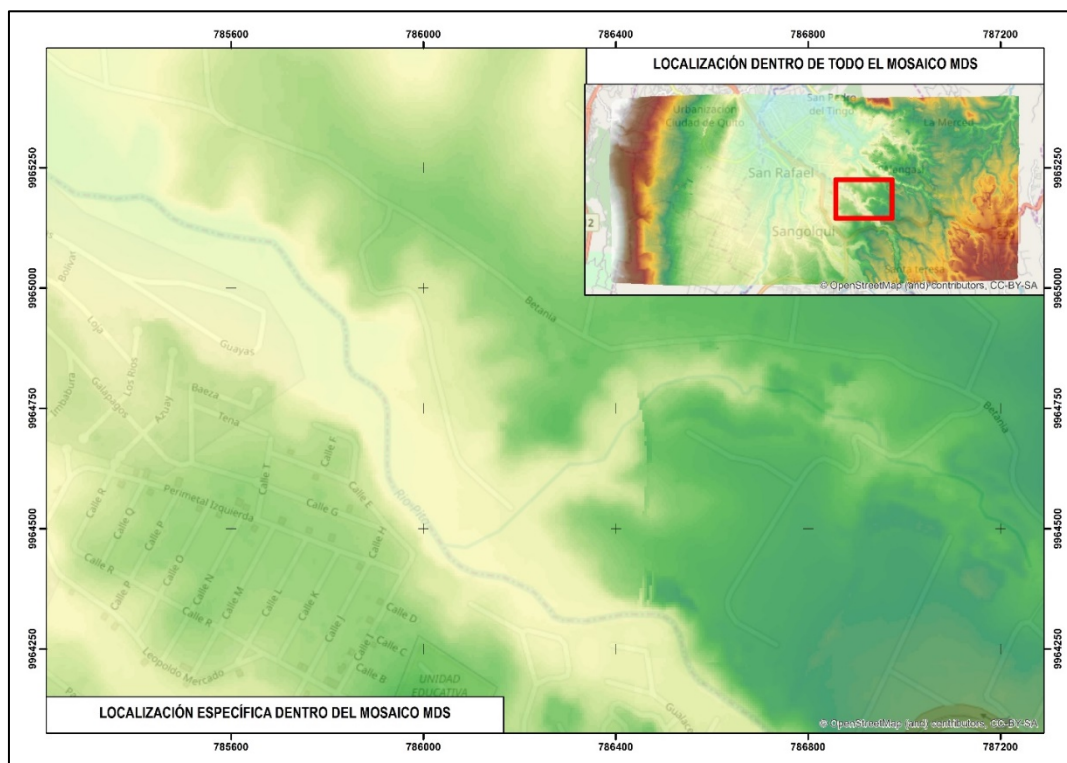


**Figura 141.** Mosaico de MDS sin matriz de pesos y 13GCP en LPS

#### 4.4.2. Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 13 GCP en LPS

Se generó un mosaico con los 20 MDS de la aerotriangulación con 13 GCP y considerando la matriz de pesos (modelo Ebners) en LPS-Core, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de

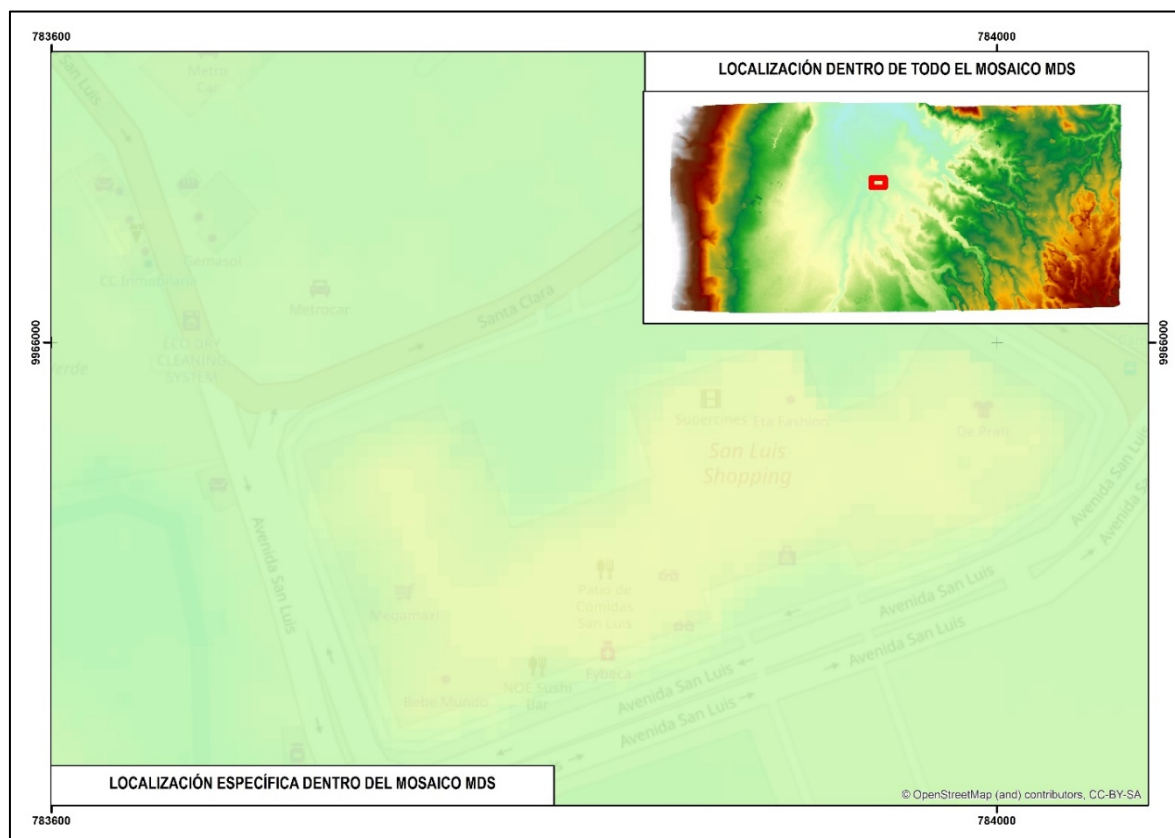
3030.32m y mínimo de 2440.24m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y amarillo las zonas más bajas (ver Figura 142); en el recuadro se presenta una zona de ejemplo (quebrada).



**Figura 142.** Mosaico MDS con matriz de pesos y 13GCP en LPS

#### 4.4.3. Resultado del mosaico MDS sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste con 19 GCP y sin considerar la matriz de pesos en LPS-Core, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3030.93m y mínimo de 2438.87m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 143); en el recuadro se presenta una zona de ejemplo (estructura - edificio San Luis de Sangolquí).

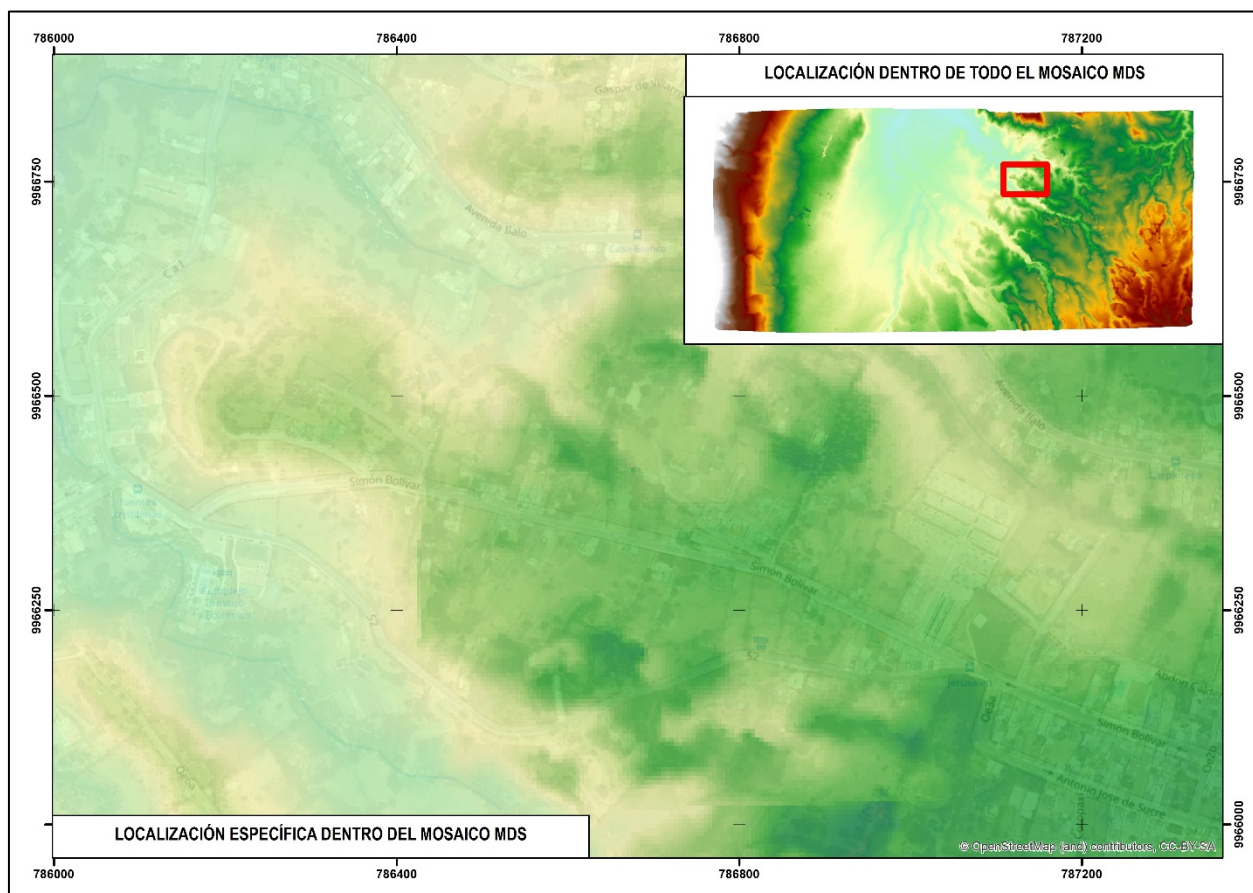


**Figura 143.** Mosaico MDS sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS

#### 4.4.4. Resultado del mosaico MDS con matriz de pesos y 19 GCP en LPS

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste con 19 GCP y considerando la matriz de pesos (modelo Ebners) en LPS-Core, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3031.04m y mínimo de 2438.96m; además, se representa de color verde las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 144); además, se presenta un ejemplo de edificios (color verde oscuro).



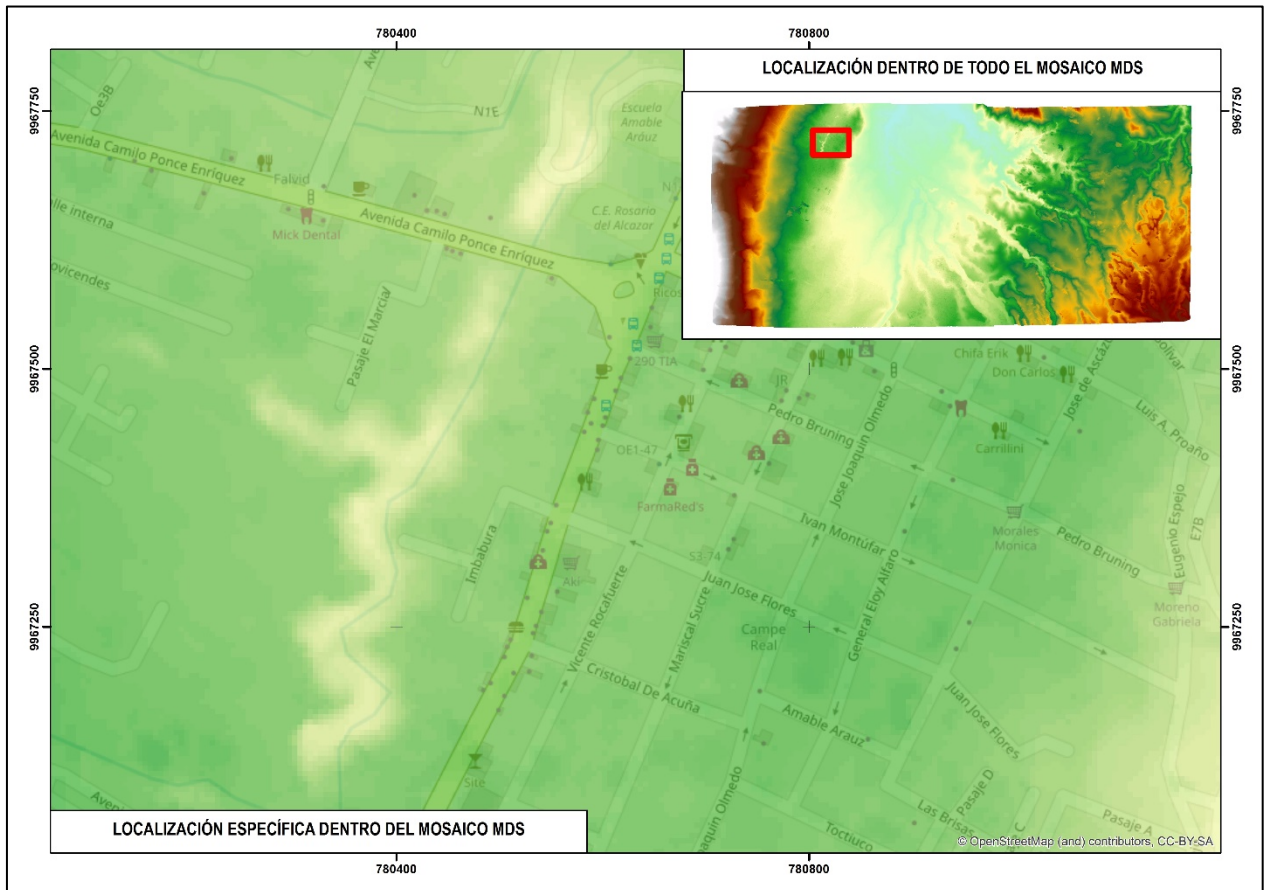


**Figura 144.** Mosaico MDS con matriz de pesos y 19 GCP en LPS

#### 4.4.5. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste en bloque de Orima y con 13 GCP, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3036.13m y mínimo de 2440.59m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 145); además, se presenta una zona de ladera de color amarillo.

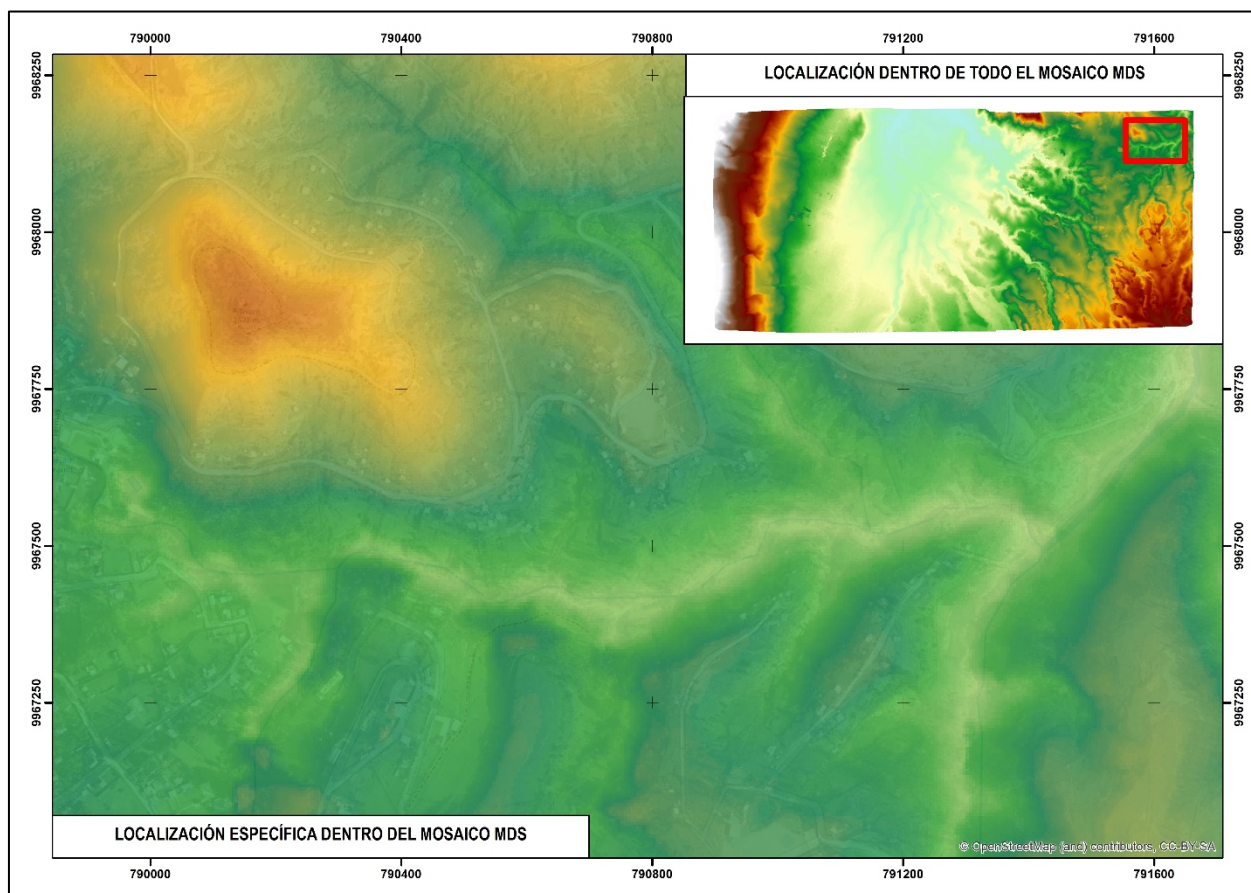




**Figura 145.** Mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima.

#### 4.4.6. Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima

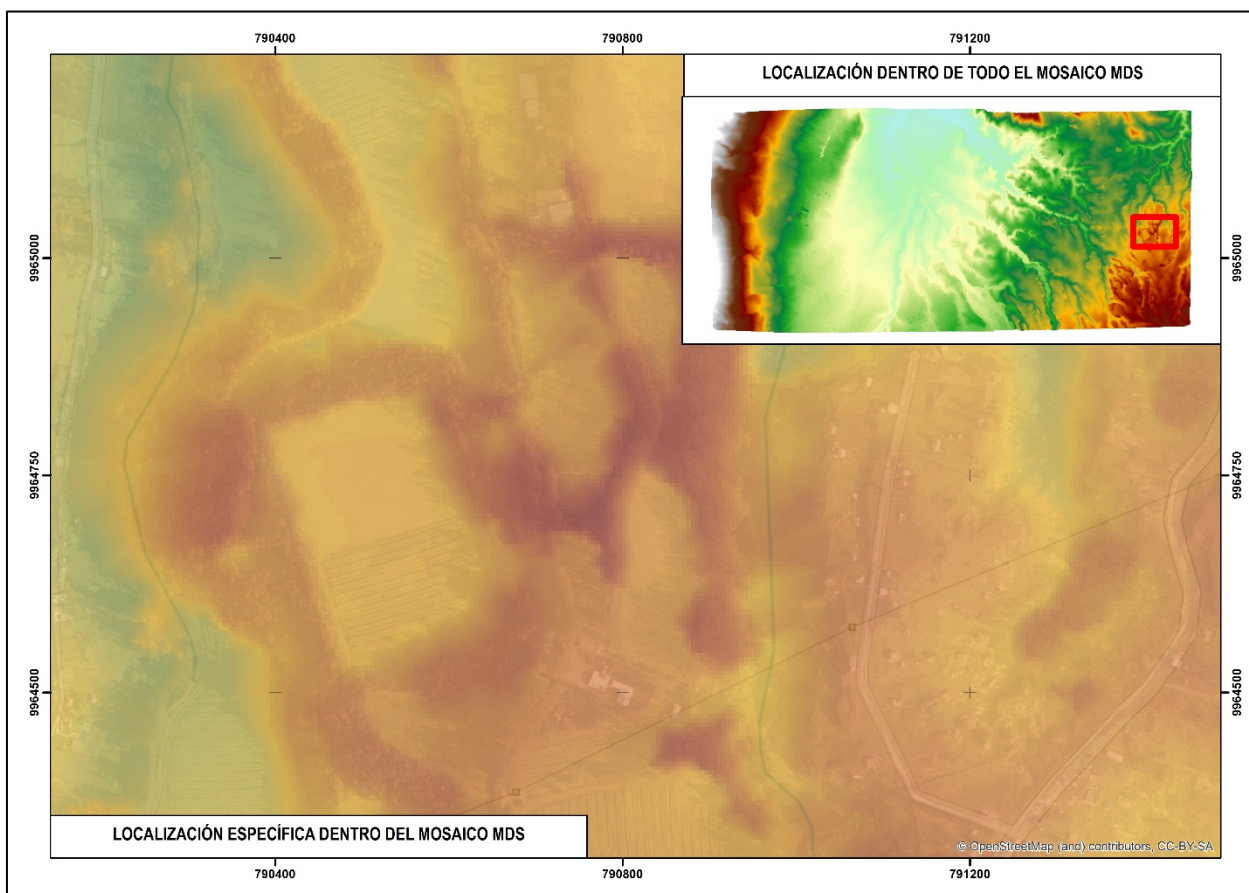
Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste en líneas de vuelo en Orima y con 13 GCP, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3035.59m y mínimo de 2440.35m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 146); así también, las zonas de color verde claro representan quebradas y la zona café una zona de alta elevación.



**Figura 146.** Mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.

#### 4.4.7. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste en bloque con Orima y con 19 GCP, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3036.32m y mínimo de 2440.7m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas uniformes (ver Figura 147.); de la misma forma, el color rojo oscuro representa alta vegetación y el anaranjado zonas de cultivo.

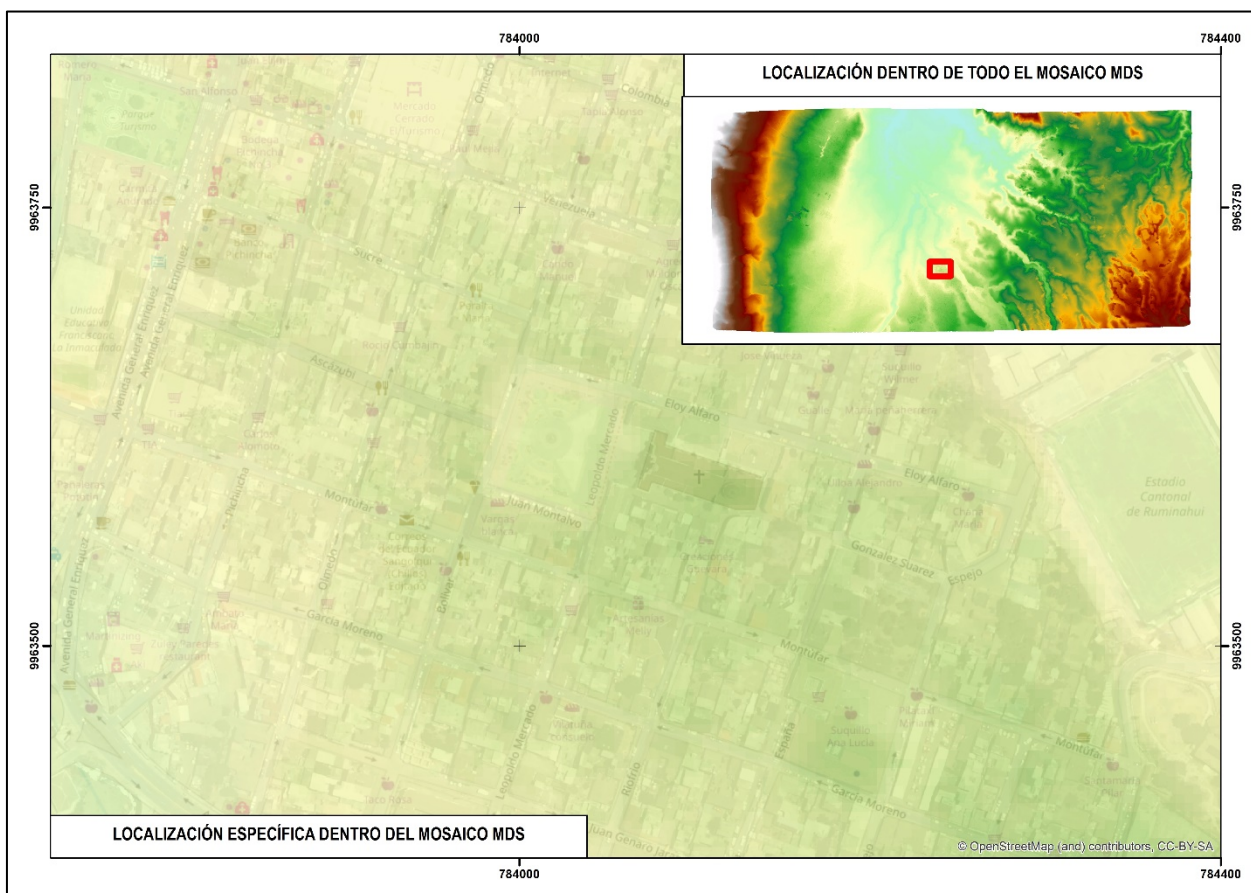


**Figura 147.** Mosaico MDS con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima

#### 4.4.8. Resultado del mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19GCP en Orima

Se generó un mosaico con los 20 MDS del ajuste en líneas de vuelo en Orima y con 19 GCP, cuyo valor máximo de altura elipsoidal es de 3035.79m y mínimo de 2440.33m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color azul las zonas más bajas (ver Figura 148); también, se presenta de color verde una zona poblada (edificaciones).





**Figura 148.** Mosaico MDS con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima.

#### 4.4.9. Resultado del mosaico MDS con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine

Se generó un mosaico del ajuste en bloque y con 13 GCP del programa ZI-Imagine, cuyo valor máximo de altura ortométrica es de 3002.04m y mínimo de 2416.21m; además, se representa de color café las elevaciones grandes y de color amarillo las zonas más bajas (ver Figura 149) (zonas de ladera).





**Figura 150.** Ortomosaico sin matriz de pesos y 13 GCP en LPS

#### 4.5.2. Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS

Se generaron 24 ortofotos con el ajuste de 13 GCP y considerando la matriz de pesos (modelo Ebners), representado en un ortomosaico, cuyos desplazamientos en edificaciones se muestran en los recuadros de colores de la Figura 151.

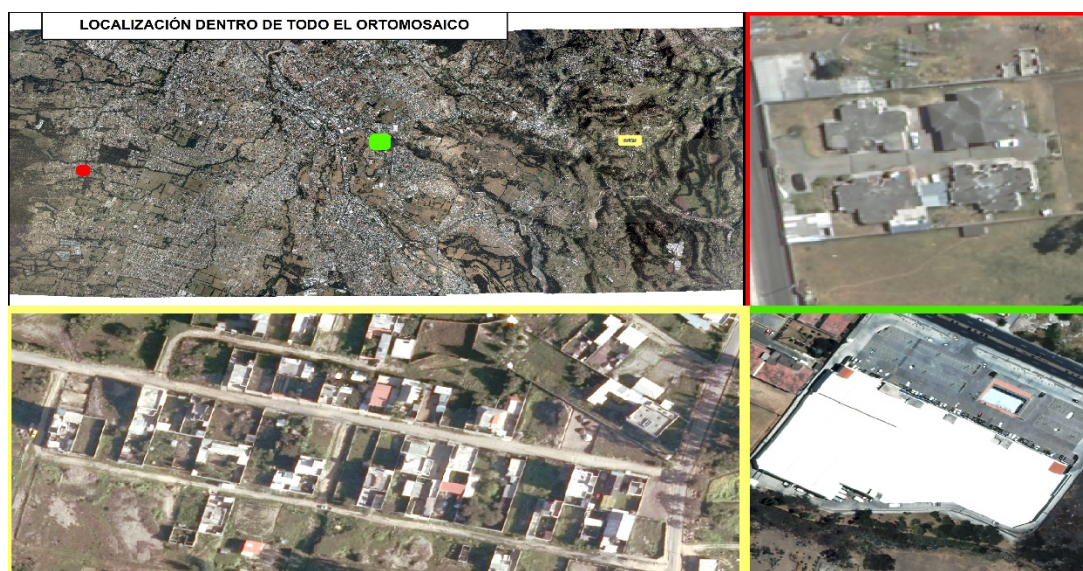


**Figura 151.** Ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS



#### 4.5.3. Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS

Se generaron 24 ortofotos con el ajuste de 19 GCP y sin matriz de pesos, representado en un ortomosaico, cuyos desplazamientos en estructuras se muestra en los recuadros de colores de la Figura 152; donde, en el recuadro verde se observa una ligera curvatura de la edificación color blanco oeste; sin embargo las edificaciones del recuadro rojo y del recuadro amarillo no presentan curvaturas como en el caso anterior.



**Figura 152.** Ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS

#### 4.5.4. Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS

Se generaron 24 ortofotos con el ajuste de 19 GCP y considerando una matriz de pesos (modelo Ebners), representado en un ortomosaico, cuyos desplazamientos en edificaciones se indican en los recuadros de colores de la Figura 153.



**Figura 153.** Ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS

#### 4.5.5. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima

Se generaron 24 ortofotos con 13 GCP y un ajuste en bloque con el entorno de Orima, representado en un ortomosaico, cuyo desplazamiento del edificio de Idiomas (ESPE) (ver recuadro verde de la Figura 154) presenta curvaturas en sus extremos; entre otros ejemplos.



**Figura 154.** Ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Orima



#### 4.5.6. Resultado del ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima

Se generaron 24 ortofotos con 13 GCP y un ajuste en líneas de vuelo con el entorno de Orima, representado en un ortomosaico; así también, en la Figura 155 se indica algunos ejemplos de estructuras.



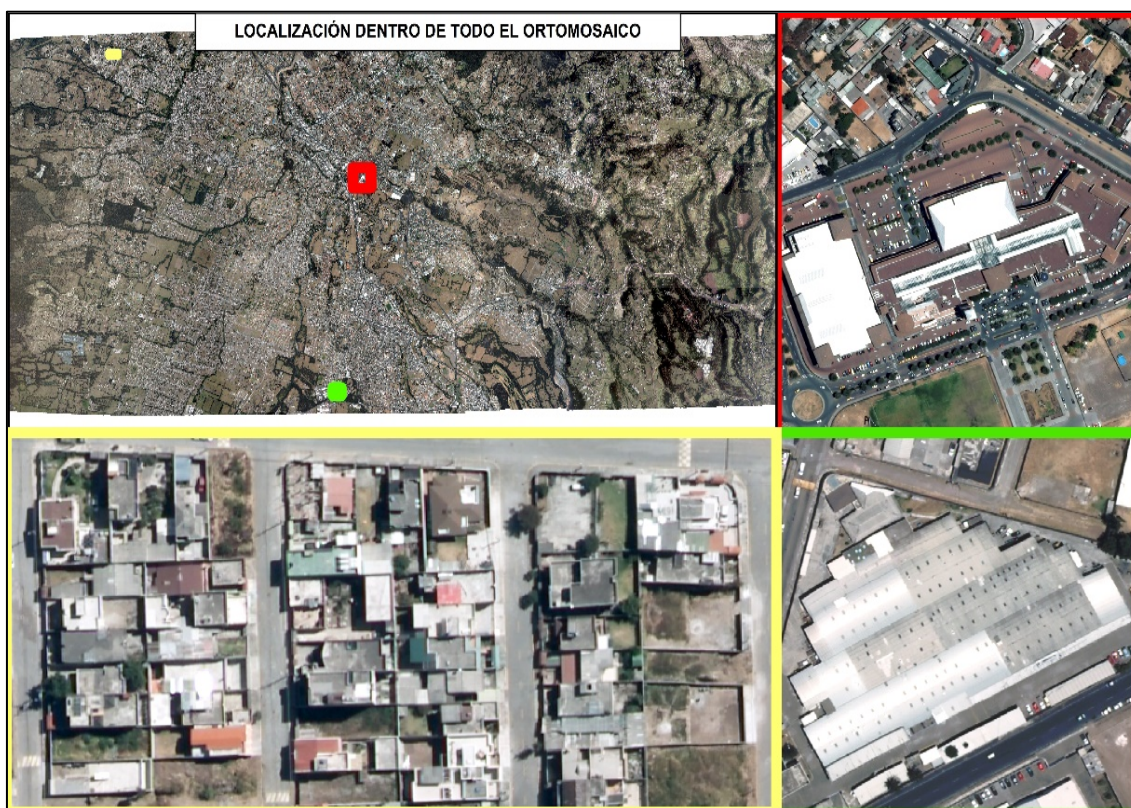
**Figura 155.** Ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima.

Del recuadro verde anterior, se visualiza la curvatura de un edificio en sus extremos (bloque de la MED-ESPE); sin embargo, el resto de ejemplos mantienen sus formas originales.

#### 4.5.7. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima

Se generaron 24 ortofotos con 19 GCP y un ajuste en bloque con el entorno de Orima, representado en un ortomosaico, cuyos desplazamientos en edificios se muestran en la Figura 156;

así también, en el recuadro de color rojo se presenta un edificio (centro comercial San Luis – Sangolquí) que presenta unas ligeras distorsiones de sus contornos.



**Figura 156.** Ortomosaico con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima

#### *4.5.8. Resultado del ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima*

Se generaron 24 ortofotos con 19 GCP y un ajuste en líneas de vuelo con el entorno de Orima, representado en un ortomosaico, cuyos desplazamientos en edificios de gran altitud se muestran en la Figura 157.





**Figura 157.** Ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima

#### 4.5.9. Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 13 GCP en Z/I Imagine

Se generaron 24 ortofotos con el ajuste en bloque y 13 GCP en el entorno de Z/I Imagine, representado en un ortomosaico, cuyos ejemplos de desplazamientos en edificios se muestran en la Figura 158.



**Figura 158.** Ortomosaico con 13 GCP y ajuste en bloque con Z/I Imagine.

#### 4.6. Resultados del control de calidad de productos generados

A continuación se presentan los resultados de la información como: mosaicos de MDS, ortomosaicos, parámetros estadísticos, características de los puntos de exactitud posicional y los test de calidad aplicando la normativa IGM y la propuesta por norma “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” de la ASPRS.

##### 4.6.1. Resultados de la estructuración de la información

El modelo lógico de las bases de datos es de tipo raster tanto en los resultados de los mosaicos de MDS y los resultados de los ortomosaicos, cuyos nombres se detallan en la tabla 27.

**Tabla 27.**

*Modelo lógico de las geodatabases*

GDB	Raster Dataset	GDB	Raster Dataset
Base_datos_MDS	E_X_i_VI_X	Base_datos_Ortomosaico	E_X_i_VII_X
	E_X_ii_VI_X	s	E_X_ii_VII_X
	E_Y_i_VI_X		E_Y_i_VII_X
	E_Y_ii_VI_X		E_Y_ii_VII_X
	O_X_iii_VI_X		O_X_iii_VII_X
	O_X_iv_VI_X		O_X_iv_VII_X
	O_Y_iii_VI_X		O_Y_iii_VII_X
	O_Y_iv_VI_X		O_Y_iv_VII_X
	Z_x_iii_vi_x		Z_x_iii_vii_x

#### 4.6.2. Resultados de los puntos usados en la exactitud posicional

Se utilizaron 23 puntos de control en la exactitud posicional de los ortomosaicos y los mismos 23 puntos de control en la calidad de los MDS al extraer su valor de altura; además, se considera que los puntos no deben intervenir en ningún proceso del ajuste fotogramétrico; por tanto, se dividen según la tabla 28.

**Tabla 28.**

*Puntos utilizados para el control de calidad*

Puntos de calidad compartidos por todos los mosaicos				No puntos	Total de puntos
<b>A007</b>	D021	G032	H039	4	15
<b>B013</b>	E022	G033	H041	4	
<b>C016</b>	G028	H037	I043	4	
<b>D018</b>	G031	H038		3	
<b>Puntos de calidad solo para productos generados con 13 GCP</b>				15	23
<b>A005</b>	A011	C015	G029	4	
<b>A009</b>	C014	E023	G034	4	
<b>Puntos de calidad solo para productos generados con 19 GCP</b>				15	23
<b>A006</b>	A009	G029	H036	4	
<b>A008</b>	E023	G034	H040	4	
<b>Puntos de calidad solo para productos generados en ZI/Imagine</b>				15	23
<b>A005</b>	C015	G035	I047	4	
<b>B012</b>	C017	H042	A011	3	

#### 4.6.3. Resultados de los mosaicos MDS

Se analizaron 9 mosaicos de MDS, según la codificación de la base de datos “Base\_datos\_MDS”, en las cuales se considera la cantidad de puntos de control (13GCP o 19GCP), el programa fotogramétrico (LSP, Orima y ZI Imagine) y el tipo de ajuste, cuyos parámetros estadísticos utilizados fueron: máximo, mínimo, error medio (ecuación 18), media aritmética

absoluta, desviación estándar (ecuación 19); además, cabe mencionar que el análisis del mosaico de MDS del ajuste en Z/I Imaging, se eliminó un punto, debido a encontrarse fuera de la zona de estudio (punto A011); por tanto, cada uno de los valores calculados se muestran en la tabla 29.

**Tabla 29.**

*Parámetros estadísticos de los mosaicos de MDS*

MDS Evaluado con altura elipsoidal	Elementos (n)	Máximo [m]	Mínimo [m]	Error Medio $(\bar{x})$ [m]	Media aritmética absoluta $(\bar{x})^1$ [m]	Desviación estándar (S) [m]	desviación estándar <sup>2</sup> (S) [m]
E_X_i_VI_X	23	1.563	-2.362	-0.245	0.871	1.106	0.701
E_X_ii_VI_X	23	1.403	-2.091	-0.145	0.809	1.001	0.582
E_Y_i_VI_X	23	1.3	-3.638	-0.515	0.900	1.129	0.841
E_Y_ii_VI_X	23	0.99	-2.581	-0.500	0.790	0.929	0.680
O_X_iv_VI_X	23	1.416	-2.294	0.072	0.751	1.017	0.671
O_X_iii_VI_X	23	1.109	-2.035	0.051	0.637	0.841	0.535
O_Y_iv_VI_X	23	1.048	-2.163	0.155	0.632	0.760	0.430
O_Y_iii_VI_X	23	1.406	-2.281	0.225	0.678	0.835	0.518
z_x_iii_vi_x <sup>3</sup>	22	3.895	-5.192	-0.202	1.682	2.249	1.463
<b>Promedio</b>		1.57	-2.737	-0.123	0.861	0.270	0.322

1. Representa el valor de la media aritmética del valor absoluto de las diferencias.

2. Representa el valor de la desviación estándar con el valor absoluto de las diferencias entre el valor del MDS producido y el Control

3. Representa el MDS con correcciones de altura elipsoidal a ortométrica con el modelo IGM

A continuación se calcula el nivel de confianza del MDS, el cual resulta de despejar  $t_{\alpha/2}$  de la ecuación 16 (ver apartado 2.7.1); además, como los datos son menores a 30 se utiliza la tabla t – Student para estimar el valor, tal como se indica en la ecuación 23:

$$t_{\alpha/2} = \frac{\tau \cdot \sqrt{n}}{\sigma} \quad [23]$$

Donde:

- $t_{\alpha/2}$ , representa el valor del área bajo la curva de la distribución t-student.
- $\tau$ , representa el valor del error permitido o tolerado en el proceso y resulta del intervalo de curva a escala 1:5000 ( $5m/4=1.25m$ ).
- $\sigma$ , representa la desviación estándar de cada mosaico MDS, ejemplo: 1.06m.
- $n$ , representa la cantidad de elementos, ejemplo: 23.

Al obtener el valor  $t_{\alpha/2}$  de la ecuación anterior, se busca el valor interpolado de t con n-1, grados de libertad (n=22 y n=21) en la tabla t-Student ( $t_0$ ); donde, t% indica el valor en porcentaje de  $t_0$ , detallado en la tabla 30.

**Tabla 30.**

*Nivel de confianza para los MDS*

MDS Evaluado con altura elipsoidal	t	$t_0^1$	t%	%
E_X_i_VI_X	5.42	2.82	0.995	99.5
E_X_ii_VI_X	5.99	2.82	0.995	99.5
E_Y_i_VI_X	5.31	2.82	0.995	99.5
E_Y_ii_VI_X	6.45	2.82	0.995	99.5
O_X_iv_VI_X	5.89	2.82	0.995	99.5
O_X_iii_VI_X	7.13	2.82	0.995	99.5
O_Y_iv_VI_X	7.89	2.82	0.995	99.5
O_Y_iii_VI_X	7.18	2.82	0.995	99.5
z_x_iii_vi_x <sup>2</sup>	2.61	2.52	0.99	99.0

[1] Representa el valor del área bajo la curva de la tabla t-Student



*Continúa*

---

**[2] Representa al MDS con altura ortométrica, corregida con el modelo propuesto por el IGM.**

---

Así también, se puede encontrar el intervalo de confianza para cada uno de los MDS, al utilizar la ecuación 17 (ver apartado 2.7.1) de la siguiente manera, cuyos resultados se presenta en la tabla 31:

$$\bar{x} \pm \frac{t_{\alpha/2} \cdot S}{\sqrt{n}} \quad [17]$$

Donde:

- $\bar{x}$ , representa el valor de la media, ejemplo: -0.245m
- $t_{\alpha/2}$ , representa el valor del área bajo la curva de la distribución t-student, a cierto nivel de confianza (con n=22 y n=21 aproximadamente 1.72 al 95% de confianza)
- $S$ , representa el valor de la desviación estándar de la muestra, ejemplo: 1.106m
- $n$ , representa la cantidad de elementos de la muestra (n=22 y n=21).

**Tabla 31.**

*Intervalo de confianza de los MDS*

MDS Evaluado con altura elipsoidal	Error Medio ( $\bar{x}$ ) [m]	Intervalo de confianza al 95% [m]
E_X_i_VI_X	-0.245	± 0.40
E_X_ii_VI_X	-0.145	± 0.36
E_Y_i_VI_X	-0.515	± 0.40
E_Y_ii_VI_X	-0.500	± 0.33
O_X_iv_VI_X	0.072	± 0.36
O_X_iii_VI_X	0.051	± 0.30

 *Continúa*



<b>O_Y_iv_VI_X</b>	0.155	±	0.27
<b>O_Y_iii_VI_X</b>	0.225	±	0.30
<b>z_x_iii_vi_x</b>	-0.202	±	0.83

Al analizar el valor del RMSEz con la ecuación 13 (ver apartado 2.6.7) y multiplicar por el valor de “Z” (tabla z=1.645), con un nivel de confianza del 90%, se tienen los valores de la tabla 32:

**Tabla 32.**

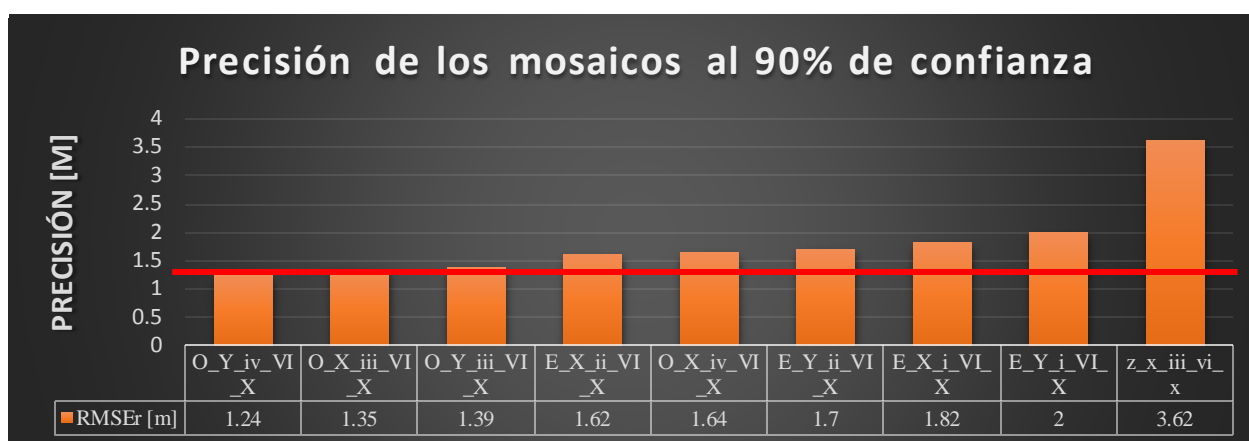
*Precisión de los MDS al 90% de confianza*

<b>MDS Evaluado con altura elipsoidal</b>	<b>RMSEz [m]</b>	<b>Precisión al 90% de confianza [m]</b>
<b>E_X_i_VI_X</b>	1.109	1.82
<b>E_X_ii_VI_X</b>	0.989	1.62
<b>E_Y_i_VI_X</b>	1.219	2.00
<b>E_Y_ii_VI_X</b>	1.037	1.70
<b>O_X_iv_VI_X</b>	0.997	1.64
<b>O_X_iii_VI_X</b>	0.824	1.35
<b>O_Y_iv_VI_X</b>	0.759	1.24
<b>O_Y_iii_VI_X</b>	0.847	1.39
<b>z_x_iii_vi_x</b>	2.207	3.62
<b>Promedio</b>	1.109	1.82 <sup>1</sup>

[1] Resultados de multiplicar el promedio obtenido con el valor de 1.645 para el 90% de confianza.

El límite de un mosaico de MDS a escala 1:5000, es de 1.25m, pues implica el ¼ del intervalo de curva; por tanto, de los valores de la tabla 32, se tiene que a un nivel de confianza del 90% solo un producto cumple con la precisión indicada (O\_Y\_iii\_VI\_X), el cual representa al resultado con 19GCP, ajuste en líneas de vuelo en Orima; al mismo tiempo, el valor más alto es el realizado en Z/I Imagine; debiéndose a utilizar el modelo geoidal del IGM, pues para el resto de los resultados no se presentan dichos extremos del valor; no obstante, existe otro producto que se acerca al límite

del  $\frac{1}{4}$  del intervalo de curva, el cual representa al mosaico de MDS con 13GCP, ajuste en bloque en Orima; el resto de valores se indica en la Figura 159.



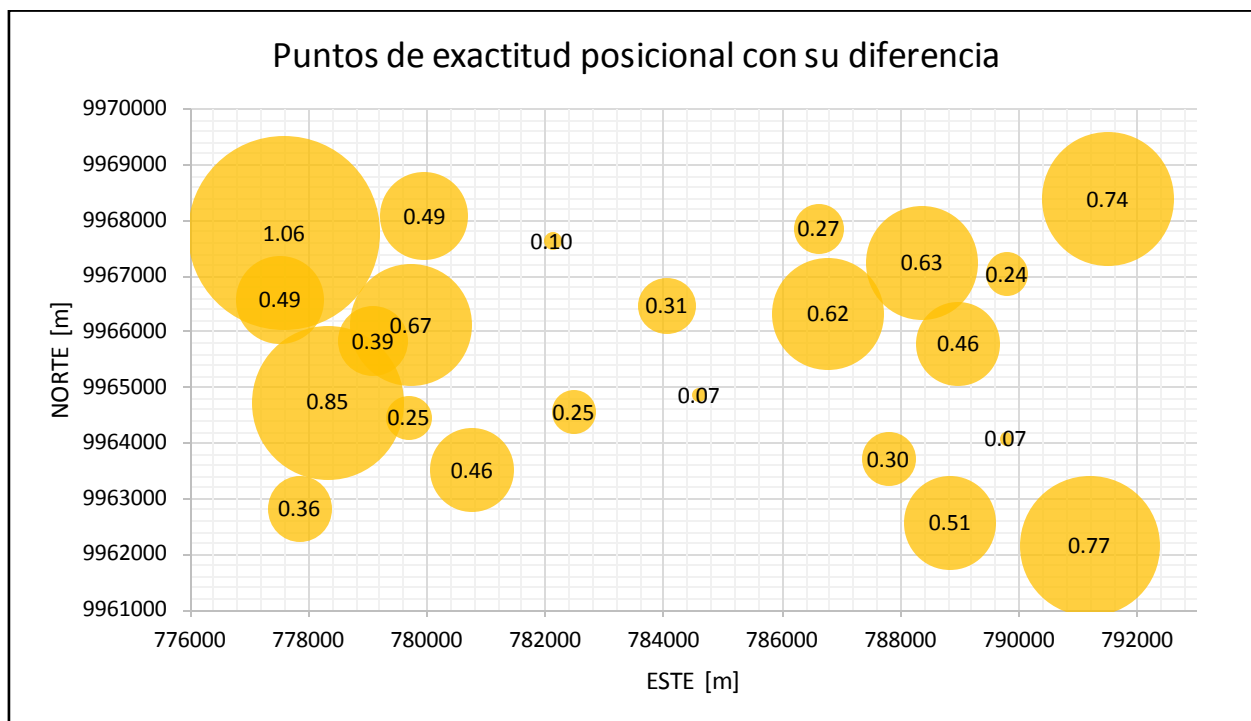
*Figura 159. Orden ascendente de la precisión de los mosaicos MDS.*

#### 4.6.4. Resultados del error planimétrico de los ortomosaicos

A continuación se presenta el error planimétrico de los nueve ortomosaicos, representados cada uno en círculos; donde, el radio de las mismas está dado por la ecuación 22.

##### 4.6.4.1. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E\_X\_i\_VII\_X

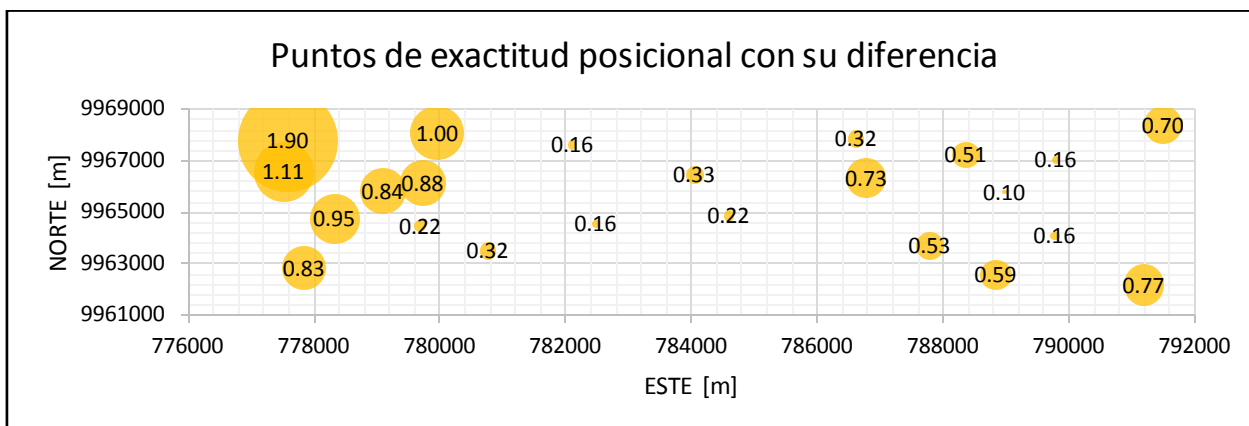
El primer ortomosaico evaluado es “E\_X\_i\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, el cual representa el resultado del apartado 4.5.1 “Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 13GCP en LPS”, cuyo error planimétrico de los puntos de exactitud posicional van de un valor mínimo de 0.07m y un máximo de 1.06m; además, la mayor parte de los errores se encuentra entre las coordenadas Este [77600m; 77800m], pertenecientes a una zona de alta pendiente, el resto de valores representados se presentan en la Figura 160.



**Figura 160. Error planimétrico de E\_X\_i\_VII\_X**

#### 4.6.4.2. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E\_x\_ii\_vii\_x

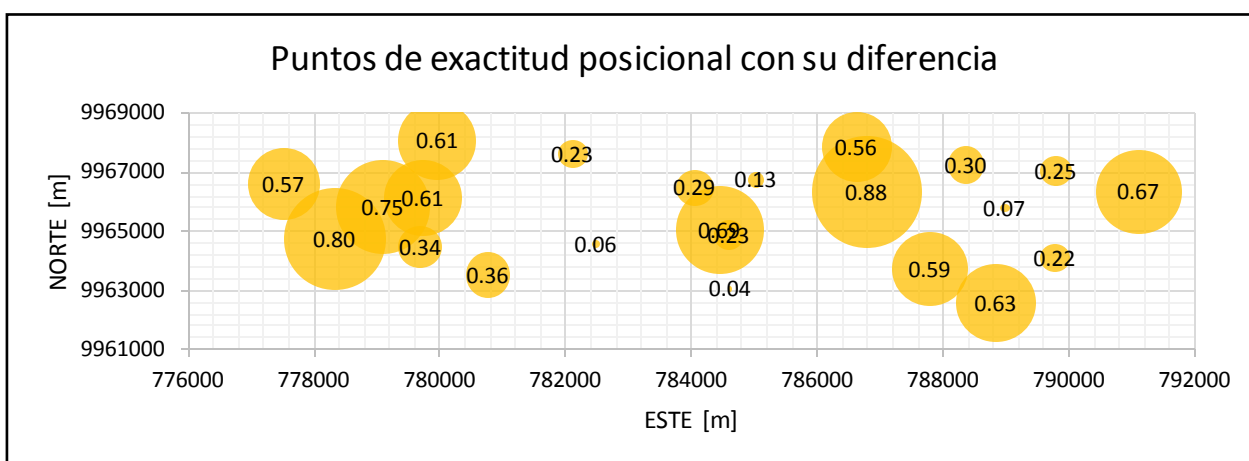
El segundo ortomosaico evaluado es “E\_x\_ii\_vii\_x” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, el cual representa el resultado del apartado 4.5.2 “Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 13 GCP en LPS”, cuyo error planimétrico de los puntos de exactitud posicional, van de un valor mínimo es de 0.1m y un máximo de 1.9m; además, la mayor parte de los errores se encuentra entre las coordenadas Este [77600m; 78000m], pertenecientes a una zona de alta pendiente, el resto de valores representados en círculos de la Figura 161.



**Figura 161.** Error planimétrico de  $E_x_{ii\_vii\_x}$

#### 4.6.4.3. Resultados del error planimétrico del ortomosaico $E\_Y\_i\_VII\_X$

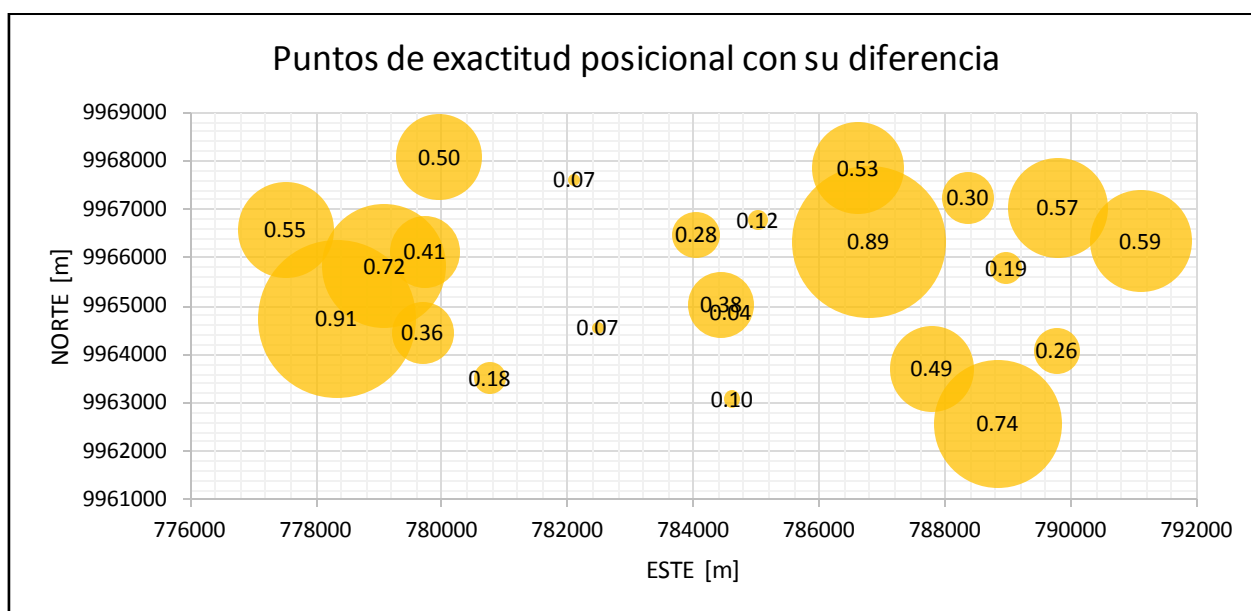
El tercer ortomosaico analizado fue “ $E\_Y\_i\_VII\_X$ ” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.3 “Resultado del ortomosaico sin matriz de pesos y 19 GCP en LPS”, en el cual el error planimétrico de los puntos de exactitud posicional (representados en círculos), van de un valor mínimo es de 0.04m y un máximo de 0.88m; además, los valores del error planimétrico se encuentran dispersos en todo el proyecto (ver Figura 162).



**Figura 162.** Error planimétrico de  $E\_Y\_i\_VII\_X$

#### 4.6.4.4. Resultados del error planimétrico del ortomosaico E\_y\_ii\_VII\_X

El cuarto ortomosaico analizado es “E\_y\_ii\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.4 “Resultado del ortomosaico con matriz de pesos y 19 GCP en LPS”; así mismo, los errores planimétricos de los puntos de exactitud posicional van de un valor mínimo es de 0.04m y un máximo de 0.91m; además, los errores se distribuyen en zonas de alta pendiente (0.91m) y zonas extremas del proyecto (0.59m), tal y como se indican los círculos en la Figura 163.

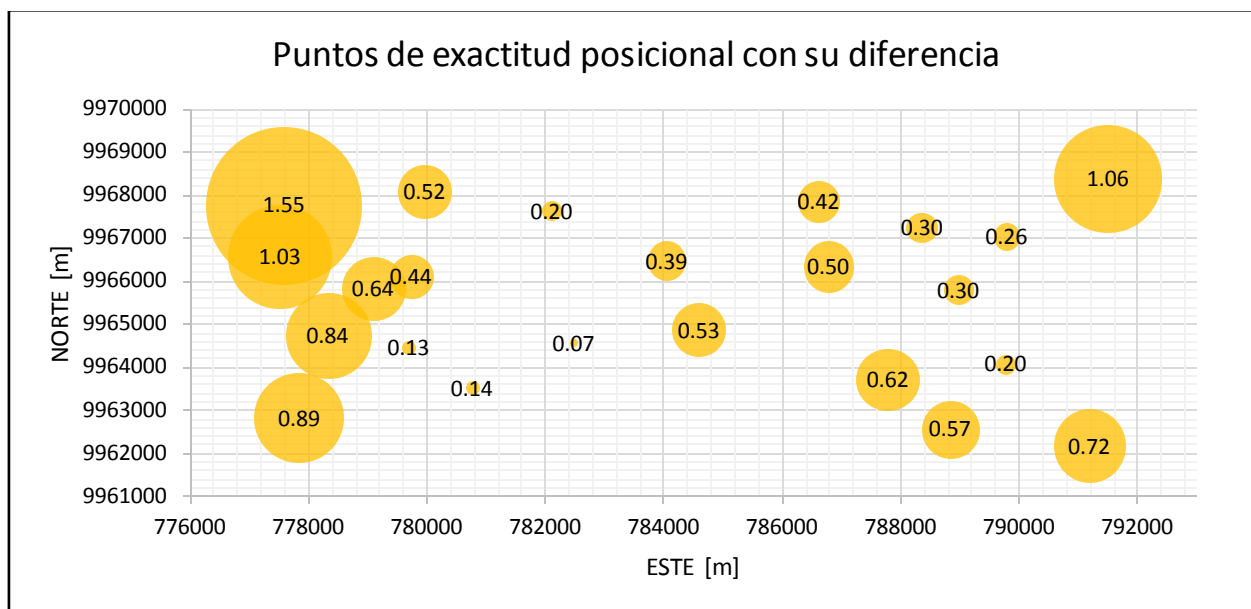


**Figura 163.** Error planimétrico de E\_y\_ii\_VII\_X

#### 4.6.4.5. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O\_X\_iii\_VII\_X

El quinto ortomosaico examinado es “O\_X\_iii\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.5 “Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y

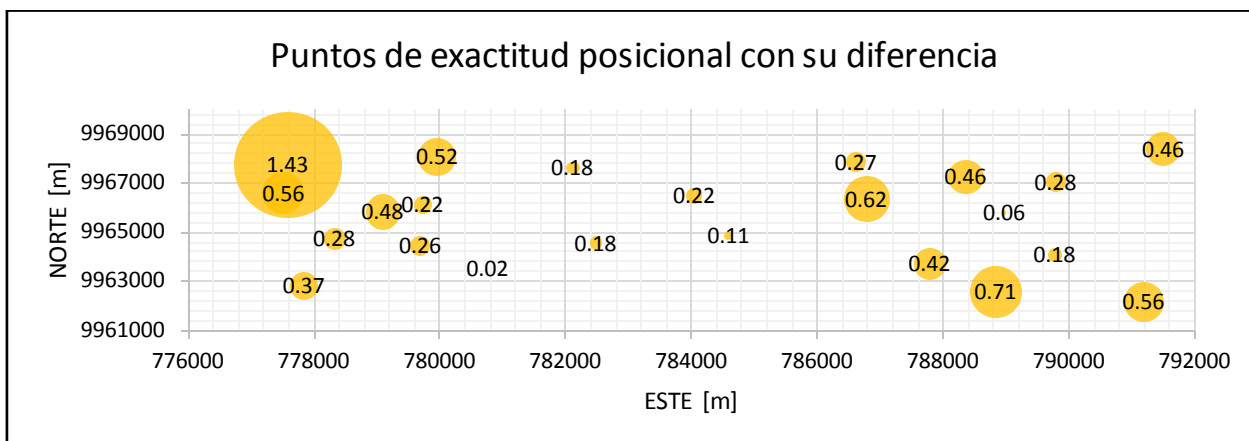
13 GCP en Orima”, cuyo error planimétrico máximo es de 1.6m y un mínimo de 0.1m; además, los mayores errores se encuentran en las esquinas del proyecto y en las zonas de alta pendiente, en el intervalo de [776000m; 780000m], tal y como indica la Figura 164.



**Figura 164.** Error planimétrico de O\_X\_iii\_VII\_X

#### 4.6.4.6. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O\_X\_iv\_VII\_X

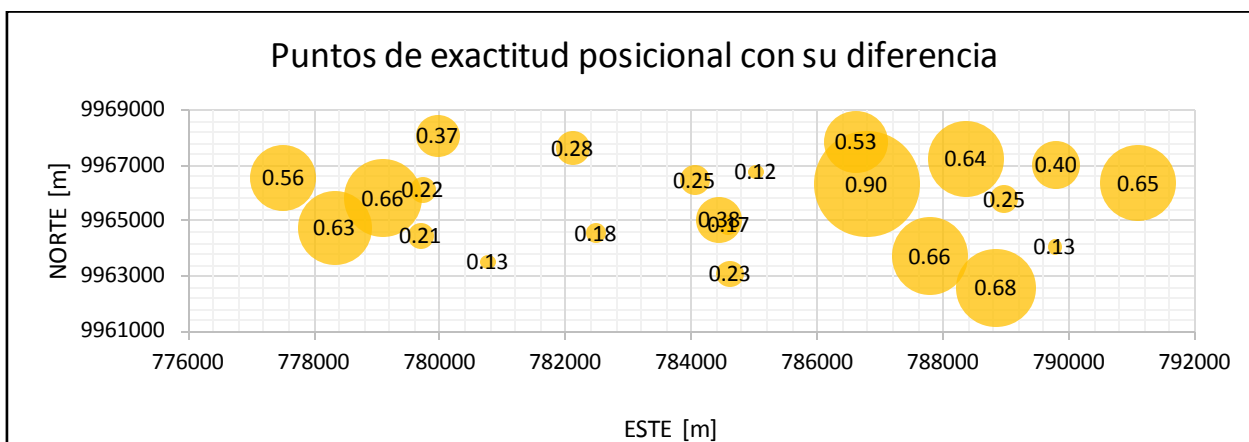
El sexto ortomosaico examinado es “O\_X\_iv\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.6 “Resultado del ortomosaico con ajuste de líneas de vuelo y 13 GCP en Orima”; además, el error planimétrico máximo es de 1.4m y un mínimo de 0.02m, el resto de valores son menores a 0.8m representados en círculos de la Figura 165.



**Figura 165.** Error planimétrico de O\_X\_iv\_VII\_X

#### 4.6.4.7. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O\_Y\_iii\_VII\_X

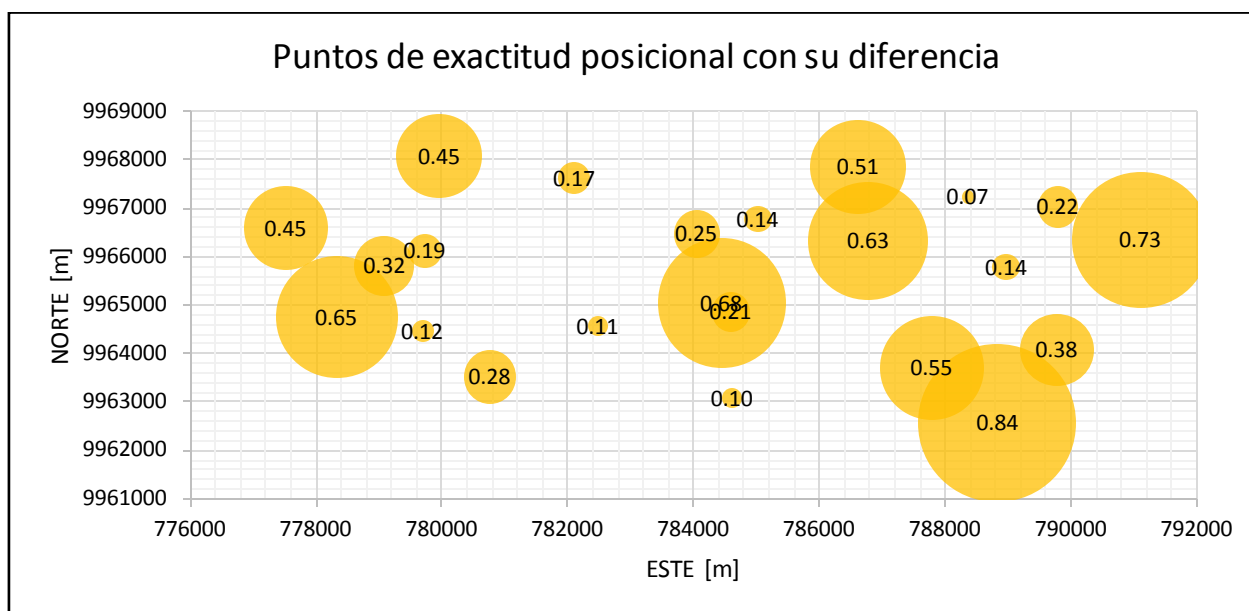
El séptimo ortomosaico examinado es “O\_Y\_iii\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.7 “Resultado del ortomosaico con ajuste en bloque y 19 GCP en Orima”, cuyo error planimétrico máximo es de 0.9m, el resto de errores son menores a 0.7m representados en círculos; vale destacar, los mayores desplazamientos se ubican entre la línea de vuelo 20 y 21 del proyecto, cuyas coordenadas Este son [78600m; 792000m] (ver Figura 166).



**Figura 166.** Error planimétrico de O\_Y\_iii\_VII\_X

#### 4.6.4.8. Resultados del error planimétrico del ortomosaico O\_Y\_iv\_VII\_X

El octavo ortomosaico examinado es “O\_Y\_iv\_VII\_X” según la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.8 “Resultado del ortomosaico con ajuste en líneas de vuelo y 19 GCP en Orima”, cuyo error planimétrico máximo es de 0.8m y se ubica en el extremo Este, el resto de valores son menores a 0.75m indicados en la Figura 167.

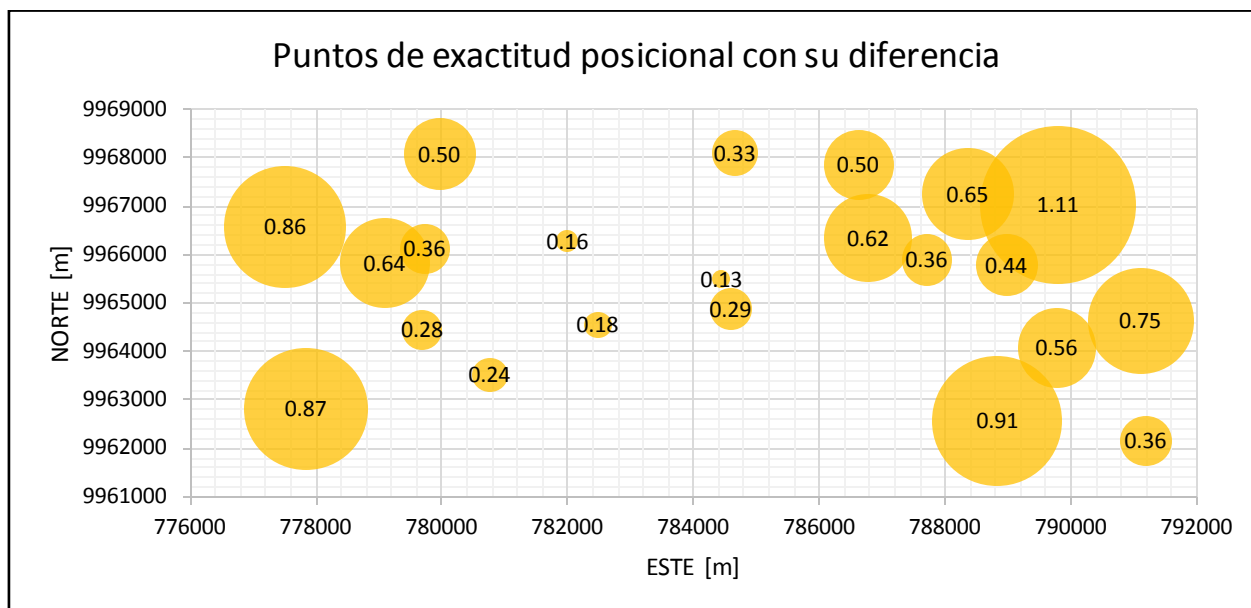


**Figura 167.** Error planimétrico de O\_Y\_iv\_VII\_X

#### 4.6.4.9. Resultados del error planimétrico del ortomosaico en Z/I Imagine

El noveno ortomosaico analizado es “Z\_X\_iii\_VII\_X” de la “Base\_datos\_ortomosaicos”, que representa el resultado del apartado 4.5.9; donde, el valor máximo es de 1.1m ubicado en el extremo Este del proyecto; además, en la zona de alta pendiente los errores planimétricos son menores a 0.9m; tal y como se ilustra en la Figura 168.





**Figura 168.** Error planimétrico de Z\_X\_iii\_VII\_X

#### 4.6.5. Resultados s de los ortomosaicos

A continuación se detallan los siguientes estadísticos: máximo, mínimo, error medio, desviación estándar, RMSE (RMSE<sub>x</sub> y RMSE<sub>y</sub>) y RMSE<sub>r</sub>, indicados en la tabla 33 de los nueve ortomosaicos.

**Tabla 33.**

*Estadísticos generales de los ortomosaicos.*

No	Ortomosaico	Coordenada	Estadísticos generales						
			No elemen.	Máx. [m]	Mín. [m]	Error Medio [m]	Desviación Estándar [m]	RMSE [m]	RMSE <sub>r</sub> [m]
1	E_X_i_VI_X	ΔEste [E]	23	0.377	-0.615	-0.155	0.272	0.308	0.515
		ΔNorte [N]	23	0.714	-1.032	-0.125	0.403	0.413	
2	E_X_ii_VI_X	ΔEste [E]	23	0.377	-0.642	-0.026	0.264	0.26	0.721
		ΔNorte [N]	23	0.754	-1.865	-0.318	0.607	0.673	
3	E_Y_i_VI_X	ΔEste [E]	23	0.655	-0.761	-0.138	0.406	0.421	0.498
		ΔNorte [N]	23	0.476	-0.516	-0.105	0.250	0.266	
4	E_Y_ii_VI_X	ΔEste [E]	23	0.496	-0.734	-0.132	0.346	0.363	0.477


**Continúa**

	$\Delta$ Norte [N]	23	0.278	-0.675	-0.155	0.273	0.309	
<b>5</b>	O_X_iv_VI_X	$\Delta$ Este [E]	23	0.575	-0.536	0.046	0.275	0.273
		$\Delta$ Norte [N]	23	0.913	-1.548	-0.217	0.576	0.578
<b>6</b>	O_X_iii_VI_X	$\Delta$ Este [E]	23	0.734	-0.694	0.060	0.287	0.287
		$\Delta$ Norte [N]	23	0.556	-1.23	-0.174	0.352	0.386
<b>7</b>	O_Y_iv_VI_X	$\Delta$ Este [E]	23	0.575	-0.615	-0.096	0.301	0.309
		$\Delta$ Norte [N]	23	0.357	-0.794	-0.117	0.327	0.341
<b>8</b>	O_Y_iii_VI_X	$\Delta$ Este [E]	23	0.655	-0.814	0.011	0.289	0.283
		$\Delta$ Norte [N]	23	0.595	-0.635	-0.060	0.315	0.314
<b>9</b>	z_x_iii_vi_x	$\Delta$ Este [E]	22	0.575	-0.893	-0.099	0.412	0.414
		$\Delta$ Norte [N]	22	0.357	-0.992	-0.188	0.322	0.371
<b>Media ortomosaicos en <math>\Delta</math>Este [E]<sup>1</sup></b>		9	0.56	-0.70	-0.06	0.317		
<b>Media ortomosaicos en <math>\Delta</math>Norte [E]<sup>2</sup></b>		9	0.56	-1.03	-0.16	0.381		

[1]. Representa los valores de las medias de los máximos, mínimos, error medio y desviación estándar, de la coordenada Este, en un ortomosaico.

[2]. Representa los valores de las medias de los máximos, mínimos, error medio y desviación estándar, de la coordenada Norte, en un ortomosaico.

A continuación se presenta los valores de la relación entre RMSE<sub>min</sub>/RMSE<sub>max</sub>, para su aplicación en el tipo de ecuación, según los casos del apartado 2.6.7; donde, el valor 0.6 de la tabla 34 es el mínimo para la aplicación de las mismas.

**Tabla 34.**

*Indicador del RMSE<sub>min</sub> / RMSE<sub>max</sub>*

Productos	RMSE <sub>x</sub> [m]	RMSE <sub>y</sub> [m]	RMSE <sub>min</sub> / RMSE <sub>max</sub>
E_X_i_VI_X	0.308	0.413	0.75
e_x_ii_vi_x	0.26	0.673	0.39
E_Y_i_VI_X	0.421	0.266	0.63
E_y_ii_VI_X	0.363	0.309	0.85
O_X_iii_VI_X	0.273	0.578	0.47
O_X_iv_VI_X	0.287	0.386	0.74
O_Y_iii_VI_X	0.309	0.341	0.91

 *Continúa*

<b>O_Y_iv_VI_X</b>	0.283	0.314	0.90
<b>Z_X_iii_VI_X</b>	0.414	0.371	0.90

El límite de aceptación del producto (ortomosaico) a escala 1:5000 con la normativa ISO es de 1m; donde, el único producto fuera de dicho valor es el realizado con 13GCP y considerando una matriz de pesos (Ebner's) en LPS al 90% de confianza; en contra posición a este, el mejor resultado se obtiene con 19 GCP y ajuste en líneas de vuelo del programa Orima al 90% de confianza; además, en la columna “Escala máxima de ampliación”, se indica a que escala podría llegar si se tiene dicho error, con el mismo nivel de confianza de la tabla 35.

**Tabla 35.**

*Nivel de confianza de los ortomosaicos con la normativa IGM.*

No	Productos	RMSE <sub>x</sub> [m]	RMSE <sub>y</sub> [m]	RMSE <sub>r</sub> [m]	IGM al 90% [m]	Escala máxima de ampliación
1	E_X_i_VI_X	0.308	0.413	0.515	0.774	1:4000
2	E_x_ii_vi_x	0.26	0.673	0.721	<b>1.095</b>	1:5600
3	E_Y_i_VI_X	0.421	0.266	0.498	0.737	1:3800
4	E_y_ii_VI_X	0.363	0.309	0.477	0.721	1:3800
5	O_X_iii_VI_X	0.273	0.578	0.639	0.970	1:5000
6	O_X_iv_VI_X	0.287	0.386	0.481	0.722	1:3800
7	O_Y_iii_VI_X	0.309	0.341	0.460	0.697	1:3600
8	O_Y_iv_VI_X	0.283	0.314	0.423	<b>0.641</b>	1:3400
9	Z_X_iii_VI_X	0.414	0.371	0.556	0.842	1:4400
<b>Promedio</b>		0.324	0.406	0.324	0.783	1:4000

En la norma “Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data” de la ASPRS, existen dos resultados fuera del rango esperado (1.101m), los resultados 2 y 5 de la tabla 35, de los producto

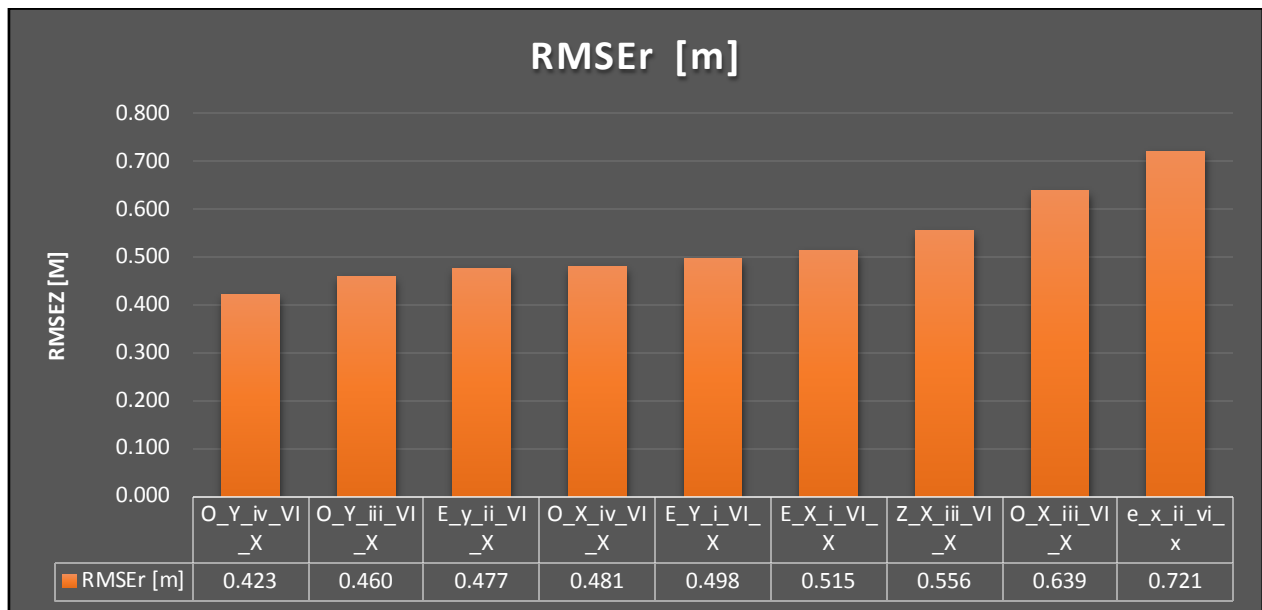
con 13 GCP en LPS y Orima que consideran un ajuste con matriz de pesos y ajuste en bloque respectivamente; así también, el resultado con mejor exactitud posicional representa el ajuste realizado con 19GCP en ajuste de líneas de vuelo en Orima, tal y como se muestra en la tabla 36.

**Tabla 36.**

*Exactitud de los ortomosaicos con la normativa ASPRS.*

No	Productos	RMSEr [m]	ASPRS al 95% [m]
1	E_X_i_VI_X	0.515	0.892
2	e_x_ii_vi_x	0.721	<b>1.249</b>
3	E_Y_i_VI_X	0.498	0.862
4	E_y_ii_VI_X	0.477	0.825
5	O_X_iii_VI_X	0.639	<b>1.107</b>
6	O_X_iv_VI_X	0.481	0.833
7	O_Y_iii_VI_X	0.460	0.797
8	O_Y_iv_VI_X	0.423	<b>0.732</b>
9	Z_X_iii_VI_X	0.556	0.962
	<i>Promedio</i>	0.519	0.899

Vale destacar que según el orden del RMSEr, en forma ascendente se tiene tal y como se ilustra en la en la Figura 169.



**Figura 169.** Orden ascendente del RMSEr de todos los ortomosaicos.

## CAPITULO IV

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se expresa las conclusiones y recomendaciones de este trabajo en cuanto a la influencia de los distintos métodos de aerotriangulación, distribución y cantidad de GCP, sobre la calidad geométrica de las ortofotos:

#### 5.1. Conclusiones

En efecto, se cumplieron todos los objetivos y metas propuestas en este proyecto; es decir, se generaron nueve ortofotos mediante distintos métodos de aerotriangulación y distribución de GCP en diferentes programas fotogramétricos (ver apartados 3.4, 3.5, 3.6 y anexos 3 al 8), con su respectiva evaluación de exactitud posicional (ver apartado 4.6.5).

En cuanto, a la generación de ortofotos, mediante distintos tipos de aerotriangulación, número y distribución de GCP, en Erdas LPS Core, Orima y Z/I Imagine; se puede decir, que cada programa fotogramétrico puede compensar un bloque fotogramétrico considerando diferentes algoritmos (ajuste con matriz de pesos, ajuste en bloque, ajuste en líneas de vuelo), pero utilizando el concepto de la ecuación de colinealidad; por tanto, la clasificación de la aerotriangulación puede considerarse desde el punto de vista de técnicas para compensar un bloque fotogramétrico.

A su vez, en la distribución y número de GCP considerados en el ajuste, se logró determinar que los mejores resultados de exactitud posicional, están vinculados a las teorías de Ackermann (1990)

e IGN de Perú (2011), con ligeras variaciones en la ubicación de los puntos, con una cantidad de 19 GCP; pues, consideran puntos dobles en las esquinas del proyecto, puntos perpendiculares a las líneas de vuelo y en zonas de triple traslapo distribuidos homogéneamente; además, se puede decir que la distribución de 13 GCP alcanza buenas precisiones (ver tabla 35 y tabla 36) siguiendo la metodología planteada.

Al mismo tiempo al comparar la exactitud posicional de las ortofotos con el umbral de la norma ISO (1m), solo el resultado con 13GCP en LPS Core (ver apartado 4.5.2) se encuentra fuera del rango permitido (1.10m al 90% de confianza); a su vez, al utilizar el límite de la norma propuesta por la ASPRS (1.1m), las ortofotos generadas con 13GCP en LPS Core y Orima, sobrepasan el límite con 1.25m y 1.11m respectivamente, al 95% de confianza; sin embargo, si se considera la norma IGM como límite, todos los ortomosaicos son aceptados.

Además, cabe mencionar que la mejor exactitud posicional de los productos obtenidos, es de 64cm al 90% de confianza con la normativa IGM y de 73cm al 95% de confianza con la normativa ASPRS; por tanto, se puede utilizar dicho ortomosaico en la generación de cartografía 2D para escala 1:5000, hasta escala 1:3400 (ver tabla 35), pudiendo utilizarlo con fines catastrales, análisis SIG y exploratorios a trabajos de mayor precisión.

En cuanto a los modelos digitales del terreno, solo un producto, que considera 19GCP en ajuste de Orima, es admitido dentro de la tolerancia de 1.25m a escala 1:5000 con el estadístico del RMSEz, si se considera el límite a escala 1:8000 (2m), los productos generados en Z/I Imagine son los únicos no aceptados; cabe mencionar que no se debe utilizar la media o la media absoluta pues

no es un buen estimador estadístico al observar que algunos productos entrarían en los límites 1:5000.

En el caso de calcular el tamaño de la muestra y evaluar la exactitud posicional; con 23 puntos en un área menor a 500km<sup>2</sup>, son suficientes para tener una confiabilidad del 99% (ver tabla 30).

A su vez, al analizar las ventajas de utilizar programas fotogramétricos especializados (Orima, Z/I Imagine); se tiene que, si se considera las precisiones en cada proceso (ver apartados 3.5.1.2 y 3.6.1), la exactitud posicional mejora, debido a disminución de la propagación de errores; así también, es de gran importancia la visualización de los mismos pues dependiendo de la zona requieren de una edición manual (ver apartado 3.5.1.5).

Es importante agregar que la revisión de la calidad radiométrica es de una manera visual y todos los ortomosaicos no presentan cambios extremos en sus niveles digitales; sin embargo, aún persisten los desplazamientos en: edificaciones, zonas de alta pendiente y extremos de las ortofotos (ver apartado 4.5).

## **5.2. Recomendaciones**

Se sugiere la utilización de modelos geoidales locales, redes de nivelación, restitución, nuevas tecnologías (LIDAR, Vehículos Aéreos no Tripulados), con el fin de obtener un MDT que mejore la calidad de ortofotos, logrando trabajos de mayor precisión.



Se recomienda generar la documentación (Datos y Metadatos) de cada insumo y producto, a fin de estandarizar los procesos y localizar de una manera más efectiva los posibles errores que puedan ocurrir; así también, se debe determinar los umbrales de cada proceso y documentarlos; de modo que se tenga un control más exhaustivo. Vale destacar que sería de gran importancia la aplicación de flujogramas, manuales, documentos con las directrices técnicas del área fotogramétrica, disminuyendo así los errores humanos.

En el caso de aumentar el número de GCP, estos deberían realizarse sobre zonas de alta pendiente, zonas de fiscalización, áreas urbanas, laderas, extremos del proyecto y control vertical para mejorar los resultados de los MDS.

Se recomienda rastrear un punto de control para fines fotogramétricos y bajo un área de cobertura de 10km de una estación de monitoreo continua, durante un lapso de tiempo de 25 a 35 minutos; así también, evitar objetos cercanos que puedan afectar la señal del equipo por ejemplo: señales de tránsito de metal, techos de zinc, (efecto multifase).

Se invita a la utilización de diferentes algoritmos de correlación para evaluar su desempeño en la orientación exterior; así como, otros modelos matemáticos para compensar un proyecto.

A su vez, al analizar la distribución de los errores en un ortomosaico, se puede utilizar la geoestadística con una mínima cantidad de 100 puntos de control.

Consecuentemente se puede utilizar, fórmulas matemáticas para determinar si estadísticamente la relación entre RMSE<sub>x</sub> y RMSE<sub>y</sub> son iguales con pruebas de hipótesis (Prueba para diferencias entre medias (muestras pequeñas)).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Ackermann, F. (1987). *The use of camera orientation data in Photogrammetry*. A review Photogrammetria.

Ackermann, F. (1990). Kinematic GPS Camera Positioning for aerial triangulation. (págs. 1155 - 1168). Ottawa, Canada: Proceeding of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System.

Ackermann, F. (1994). *Prospects of kinematic GPS for aerial triangulation*.

Agromundo. (27 de Mayo de 2018). *Rg3V.LVN*. Obtenido de 2.Modelos digitales del terreno MDT/MDE: <https://sites.google.com/site/rg3v1vn/2-modelos-digitales-del-terreno-mdt-mde>

American Society of Photogrammetry. (1980). *Manual of Photogrammetry*. Virginia: American Society of Photogrammetry.

Angulo. (2014). Generación de cartografía básica a detalle mediante una metodología de toma con aviones no tripulados (UAVs). Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas.

- Ariza, F., & Atkinson, A. (2006). *Metodologías de control posicional: Visión General y Análisis crítico*. Jaén: Universidad de Jaén.
- Ariza, F., Emerson, X., Chicaiza, E., & Buenaño, X. (2017). Métodos de evaluación de la calidad posicional en Hispanoamérica: análisis de la situación. *Revista Cartográfica*, 65 - 88.
- Arranz, J. (2010). Modelos digitales del terreno. *E.T.S. de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía* (págs. 2-4). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- ASPRS. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. En *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (págs. A1 - A26). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Barragán, G. (2015). *Generación de ortofotos y cartografía 2D y 3D mediante procesos fotogramétricos digitales con Intergraph Erdas Imagine*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Berrocoso, M., Sánchez, A., Pérez, A., Jigena, B., Fernández, J., & Páez, R. (s.f.). *Sistemas GNSS: Funcionamiento Posicionamiento y Precisión*. Obtenido de Universidad de Cádiz: Cádiz: [http://lagc.uca.es/web\\_lagc/docs/curso\\_rap/Presentacion\\_II.pdf](http://lagc.uca.es/web_lagc/docs/curso_rap/Presentacion_II.pdf)
- Bianco, M., & Martínez, J. (24 de Junio de 2004). *Inferencia estadística*. Obtenido de Intervalos de confianza: [http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades\\_estadistica\\_C/2005/1/PyEC014.pdf](http://www.dm.uba.ar/materias/probabilidades_estadistica_C/2005/1/PyEC014.pdf)

- Bostelmann, J., Breilkopf, U., & Heipke, C. (2017). Optimizing the distribution of tie points for the bundle adjustment of HRSC image mosaics. En J. Bostelmann, U. Breilkopf, & C. Heipke, *The international Archives of the photogrammetry, Remote sensing and Spatial information Sciences* (págs. 13-16). Hong Kong: International Symposium on Planetary Remote Sensing and Mapping.
- Buill, Nuñez, & Rodriguez. (2003). *Fotogrametría analítica*. Barcelona: Centre de Publicaciones del Campus Nord.
- Cartesia. (5 de Julio de 2010). *Introducción a la Fotogrametría*. Obtenido de <http://www.cartesia.org>:  
[http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria/Introduccion\\_a\\_la\\_Fotogrametria.pdf](http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria/Introduccion_a_la_Fotogrametria.pdf)
- Cheli, A. (2011). *Introducción a la Fotogrametría y su evolución*. La Plata: Hespérides.
- CLIRSEN. (2011). *Generación de Geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional Escala 1:25 000*. Manta: SENPLADES - MAE.
- Cliver, E. (1997). *A history of the use of photogrammetry at the Historic American Buildings Survey and Historic American Engineering Record*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Coelho, & Nunes. (2007). *Fotogrametría Digital*. Río de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Colorado Department of Transportation. (2015). *Survey Manual, Aerial Surveys*. Colorado: Colorado Department of Transportation.

Comer, R., Kinn, G., Light, D., & Mondello, C. (1998). *Talking digital*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

Crouse R. & Associates. (17 de Abril de 2018). *Quality aerial photography and Remote Sensing since 1990*. Obtenido de RC&A EQUIPMENT: [http://www.richardcrouse.com/pdf/CalibProtocol\\_DMCIe230-23522.pdf](http://www.richardcrouse.com/pdf/CalibProtocol_DMCIe230-23522.pdf)

Cruz, E. (2011). *El uso del GPS en restitución fotogramétrica y de las poligonales de referencias en el proyecto de carreteras*. D.F. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

De la Torre, A. (18 de Agosto de 2018). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Alternativa a los levantamientos por topografía clásica: Fotogrametría*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: <https://naetsicsegundo.webcindario.com/Topografia/Tema4a.pdf>

Delgado, J. (23 de Febrero de 2010). *Fotogrametría Digital*. Obtenido de Diagrama de Flujo en Fotogrametría Digital: [http://coello.ujaen.es/asignaturas/fotodigital/descargas/fd\\_tema3.pdf](http://coello.ujaen.es/asignaturas/fotodigital/descargas/fd_tema3.pdf)

Delta 95. (18 de Junio de 2018). *Topografía cartografía medición de fincas*. Obtenido de [http://www.delta95.com/web/imatges%20index\\_web/mediostecnicos/restitdigit.html](http://www.delta95.com/web/imatges%20index_web/mediostecnicos/restitdigit.html)

DOT. (2006). *Photogrammetry Surveys*. California: In transportation, C. D. O.

Durón, J. (2007). *Modelos digitales de elevación para el continuo de elevación mexicano*. Obtenido de INEGI:  
de  
<http://mapserver.inegi.org.mx/eventos/cng2007/cng2007/extcemjavierduron.pdf>

EGNOS. (21 de Diciembre de 2017). *Discover Egnos*. Obtenido de What is GNSS?:  
<https://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-gnss>

Erdas. (2010). *Orientation Management Program*. Norcross: Erdas.

Erdas. (2011). *LPS*. Norcross: Erdas.

Espinosa, L. (2017). *Recomendaciones para el proceso de aerotriangulación para cartografía básica del instituto geográfico Agustín Codazzi*. Bogotá, Colombia.: Universidad distrital Francisco de Jose de Caldas.

Falkner, E., & Morgan, D. (2002). *Aerial Mapping. Methods and Applications (Second Edition)*. Lewis Publisher.

Farjas, M. (2006). *Aplicaciones topográficas del GPS*. Obtenido de OpenCourseWare Universidad  
politécnica de Madrid: [http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria\\_GPS\\_Tema\\_12.pdf](http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_GPS_Tema_12.pdf)

FGDC. (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. Tennessee: Federal Geographic Data Committee.

García, P., & Ortíz, E. (26 de Marzo de 2018). *Influencia del GSD en la orientación de un bloque fotogramétrico*. Obtenido de <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/9005/1/Influencia%20de%20GSD%20en%20la%20orientaci%C3%B3n%20de%20un%20bloque%20fotogram%C3%A9trico.pdf>

GIS & Remote Sensing Service. (27 de Mayo de 2018). *Vector and Raster Mapping*. Obtenido de Services: <https://www.overallvision.com.au/our-services/gis-remote-sensing-services/>

Gis Ibérica. (17 de Junio de 2018). *Paralaje / Estereoscópica*. Obtenido de Equipos de precisión: <http://www.gisiberica.com/estereoscopos/PARALAJE%20ESTEREOOSC%D3PICA.htm>

Global Market. (02 de Junio de 2018). *Technology Hardware, Storage and Peripherals Company Overview of ZI Imaging Corporation*. Obtenido de Bloomberg: <https://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapid=3235439>

Gómez, J. (01 de Abril de 2011). *Procesamiento avanzado de imágenes digitales*. Obtenido de Introducción a la fotogrametría digital: El método general de la fotogrametría general: <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/procesamiento-avanzado-de-imagenes-digitales/contenidos/Tema4.pdf>

González, P. (2015). *Levantamiento mediante GPS de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la universidad en el mismo sistema de coordenadas*. Murcia, España: Universidad politécnica de Cartagena.

GPAC. (27 de Mayo de 2018). *Ingeniería de la Tierra*. Obtenido de Restitución Proyecto Gualcamayo: <http://www.gpacsl.com/index.php?pr=Gualcamayo>

GPS.gov. (14 de Agosto de 2018). *National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing*. Obtenido de Sistema de Posicionamiento Global: <https://www.gps.gov/spanish.php>

Heipke, C. (1997). *Automation of interior, relative, and absolute orientation*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

Hernández L. (2007). *La aerotriangulación con apoyo GPS cinemático en la producción cartográfica de Colombia*. Caldas, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Hernández, D. (2006). *Introducción a la fotogrametría digital*. Castilla: Universidad de Castilla la Mancha.

Hexagon. (30 de Mayo de 2018). *Erdas Imagine: World-Class Remote Sensing Software*. Obtenido de Hexagon Geospatial: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-Imagine/erdas-Imagine-remote-sensing-software-package>



Hinojosa, A., Rodríguez, V., Munguía, L., & Meillón, O. (Mayo de 27 de 2011). *Scielo*. Obtenido de El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222011000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000100003&lng=es&tlng=es).

Hinsken, L. (2010). *Orientation Management Program*. Georgia, USA: Erdas.

Hinsken, L., & Miller, S. (2002). *Triangulation fo the LH systems' ADS40 using ORIMA GPS/IMU*. Konstanz: LH Systems.

Hussain, M., & Bethel, J. (2004). *Project and Mission Planning in Manual of Photogrammetry, Fitth edition*. Maryland, USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Idainature. (17 de Junio de 2018). *Satélites Sentinel 2 para teledetección en agricultura*. Obtenido de Agriculturers, Red de especialistas de agricultura: <http://agriculturers.com/satelites-sentinel-2-para-teledeteccion-en-agricultura/>

IGAC. (2007). *Fotogrametía*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGM. (2005). *Propuesta técnica y económica para obtener el levantamiento aerofogramétrico y ortofotos digitales a escala 1:5000 del área rural del cantón Ambato*. Quito: División Cartográfica.

- IGM. (2006). *Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía a cualquier escala (Primer Borrador)*. Quito: Instituto Geográfico Militar.
- IGM. (2008). *Propuesta técnica y económica para obtener el levantamiento aerofotogramétrico y ortofotos digitales de la cuenca baja del río Guayas*. Quito: Gestión mercadotécnica y comunicación.
- IGM. (2010). *Altura de vuelo en vuelos fotogramétricos*. Quito, Ecuador: Instituto Geográfico Militar.
- IGM. (2012). *Archivos APLANIX, fecha de toma*. Quito: Instituto Geográfico Militar.
- IGM. (18 de Marzo de 2013). *Geoportal IGM*. Obtenido de Evolución de la geodésia en el Ecuador: [http://www.geoportalignm.gob.ec/wordpress/?page\\_id=248](http://www.geoportalignm.gob.ec/wordpress/?page_id=248)
- IGM. (2013). *Metodología utilizada para la generación de cartografía básica del Ecuador territorial escala 1:5000*. Quito: IGM.
- IGM. (2017). *Protocolo de fiscalización para proyectos de generación de cartografía base con fines catastrales escala 1:1000, obtenida a través de método aerofotogramétrico, digitalización 2D sobre ortofoto o levantamiento topográfico*. Quito: Instituto Geográfico Militar.

IGM. (12 de Junio de 2017). *RED GNSS de monitoreo continuo del Ecuador*. Obtenido de Ficha técnica descriptiva de la estación ESPE-EPEC:  
[http://www.geoportalignm.gob.ec/wordpress/?wpfb\\_dl=49](http://www.geoportalignm.gob.ec/wordpress/?wpfb_dl=49)

IGM. (21 de Febrero de 2018). Ecuador\_XP. *Camara*. Quito, Pichincha, Ecuador: Instituto Geográfico Militar.

IGM. (31 de Mayo de 2018). *Visor Regme*. Obtenido de Geoportaligm:  
[http://www.geoportalignm.gob.ec/visor\\_regme/](http://www.geoportalignm.gob.ec/visor_regme/)

IGN. (2011). *Especificaciones técnicas para la producción de cartografía básica escala 1:1000*. Surquillo, Perú: Instituto Geográfico Nacional.

Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco. (2008). *Norma técnica para la producción de cartografía digital urbana por métodos fotogramétricos*. Jalisco, México: Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco.

Intergraph. (2013). *Image Station Automatic Triangulation*. California: Intergraph.

ISPRS. (13 de Marzo de 2018). *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Obtenido de The Society: <http://www.isprs.org/society/Default.aspx>

Jaramillo, L. (13 de Marzo de 2018). Entrevista al director de aerotriangulación del Instituto Geográfico Militar. (A. Chuquitarco, Entrevistador)

- Kimera. (25 de Julio de 2018). *Biblioteca virtual*. Obtenido de Aspectos Financieros:  
<http://www.kimera.com/RLCF/RECURSOS/BIBLIOTECA%20CAFETERA/N%20-%20ASPECTOS%20FINANCIEROS/desviacion%20estandar.pdf>
- Kirby, E. (2007). *Metodología para el cálculo de las anomalías de Bouger completa*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Kirby, E. (2009). Metodología para navegación en Arcgis a través del uso del GPS. Caso de aplicación: Verificación de la Infraestructura de antenas de comunicación y pistas de aterrizaje. *Teledetección CLIRSEN Ecuador*, 9-12.
- Kirby, E. (2012). *Cálculo del número de puntos GPS para la corrección geométrica y generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y mediana pendiente*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Lara, A., Cerpa, G., Rodríguez, M., & Núñez, H. (2006). Física para bachillerato cinemática. En *Definición y tipos de incertidumbre* (pág. 42). Pearson Educación.
- Leica Geosystems. (2005). ERDAS Field Guide. En L. G. Imaging, *Photogrammetric Concepts* (págs. 291 - 292). Atlanta - EEUU: Leica.
- Lerma, J. (1999). *Aerotriangulación: Cálculo y compensación de un bloque fotogramétrico*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

- Lerma, J. (2002). *Fotogrametría moderna: Analítica y Digital*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Liba, N., Järve, I., & Rand, M. (2013). *Quality of orthophoto mosaics made with different methods*. Kreutzwaldi, Estonia: Estonian University of Life Sciences.
- Lisintuña, J., & Molina, G. (2017). *Análisis y aplicación de ingeniería inversa en objetos con scanners 3D para el apoyo de conservación del patrimonio cultural del Ecuador*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- MAGAP. (2008). Metodología de levantamiento Catastral y legalización de la tenencia de la tierra. Quito: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- Mancero, H., Toctaguano, D., Tacuri, C., Kirby, E., & Tierra, A. (2015). Evaluación de modelos digitales de elevación obtenidos por diferentes sensores remotos. *X CONGRESO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA* (págs. 107-111). Sangolquí: ESPE.
- Mikhail, E., Bethel, J., & McGlone, J. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley and Sons.
- Molina, S., Redondo, F., Zamorano, M., Hermosilla, A., & Caturla, C. (2010). *Producción de ortofotos expeditas de Andalucía en el marco PNOA*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

- Mora. (2013). Producción de productos Cartográficos: MDT y ortofoto a partir de imágenes capturadas por un vehículo UAV. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Morales, P. (2012). *Tamaño necesario de la muestra*. Madrid: Universidad Pontífica Comillas.
- Muller, F. (1991). *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras*. Munchen, Germany: Deutsche Geodätische Kommission, Reihe.
- Muñoz, P. (2004). *Apoyo aéreo cinemático y aerotriangulación digital frente a los sistemas de navegación inercial: Análisis de precisiones*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Murray, S., & Larry, J. (2009). *Estadística Schaum*. México: The McGraw - Hill Companies.
- NGA/NASA. (16 de Junio de 2018). *EGM96 Earth Gravitational Model*. Obtenido de Geoid Programs for Windows: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>
- Niño, E. (7 de Abril de 2009). *Agrimensura, Fotogrametría*. Obtenido de Universidad de San Juan Argentina: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2h2NAXWZzcwJ:ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Tema\\_6\\_Concepto\\_de\\_ortofoto\\_y\\_ortofotoplano.doc+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2h2NAXWZzcwJ:ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Tema_6_Concepto_de_ortofoto_y_ortofotoplano.doc+&cd=3&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec)

- Obregón, F. (2007). *Descripción del proceso de obtención de un sistema de información geográfica*. Hidalgo: Universidad autónoma del Estado de Hidalgo.
- Orellana, R. (2006). *Apuntes de fotogrametría*. Bogotá, Colombia: Cartografía de Colombia.
- Ormeño, S. (2004). *Modelos digitales superficiales, obtención y sus características*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Otero, J., & Sevilla, M. (1989). *Modelo matemático para el ajuste simultanea mínimos cuadrados de un bloque fotogramétrico*. Madrid: Instituto de astronomía y geodesia.
- Pérez, F. (2006). *Estadística*. Sevilla: MAD.
- Pérez, J. (2001). *Apuntes de fotogrametría III*. Extremadura: Universidad de Extremadura.
- Pintos, A. (31 de Julio de 2016). *Agrimensores*. Obtenido de Aplicación de "ASPRS Positional Accuracy Standards For Digital Geospatial Data (EDITION 1, VERSION 1.0 - NOVEMBER, 2014)" a un relevamiento fotogramétrico realizado con UAV: [http://agrimensores.org.uy/descargas/Evaluacion\\_de\\_Calidad\\_Posicional\\_Producto.pdf](http://agrimensores.org.uy/descargas/Evaluacion_de_Calidad_Posicional_Producto.pdf)
- PIX4D. (05 de Junio de 2018). *Getting GCPs on the field or through other Sources*. Obtenido de Pix4D Support: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489-Step-1-Before-Starting-a-Project-4-Getting-GCPs-in-the-Field-or-Through-Other-Sources-optional-but-recommended-Ram%F3n>

- Portilla, O., Tierra, A., & Godoy, L. (2016). Variables que influyen en el rastreo óptimo GNSS usando software comercial. *Geociencias & Geodatos*, 84-87.
- Pozo, M. (2002). *Desarrollo de equipos de fotogrametría: Explotación del dato digital*. Santander, España: Universidad de Extremadura.
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*. Extremadura: Universidad de Extremadura.
- RAE. (27 de Mayo de 2018). *Diccionario*. Obtenido de Convergencia: <http://dle.rae.es/?id=XfDUOIU>
- Reuter, A. (2002). *Carpeta de trabajos prácticos - Teledetección forestal*. Obtenido de Planteamiento de vuelo fotográfico para tomas de fotografías verticales: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p14.PDF>
- Sáez, A. (03 de Junio de 2012). *Apuntes de Estadística para Ingenieros*. Obtenido de Departamento de estadística e Investigación Operativa - Universidad de Jaén: <http://www4.ujaen.es/~ajsaez/recursos/EstadisticaIngenieros.pdf>
- Sánchez, J. (2007). *Introducción a la Fotogrametría*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sandoval, V. (2004). *Cartografía elaborada con un método fotogramétrico simple versus un método digital (Softcopy-Fotogrametría)*. Santiago de Chile: Universidad Austral de Chile.



- Sato, & Silva. (2004). *Brazilian quality control systems for digital photogrammetry mapping production*. Brazilian: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Schenk. (2002). *Fotogrametría digital - Geomática*. Catalunya: Institut Cartografic de Catalunya.
- Schenk. (2005). *Introduction to Photogrammetry*. Ohio: Ohio State University.
- Soria, B. (2014). Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con lidar en zonas rurales. En B. M. Soria, *Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con lidar en zonas rurales* (pág. 5). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Spiller, R. (1999). *Z/I Imaging: A New System Provider for Photogrammetry and GIS*. Oberkochen, Germany: Photogrammetric Week.
- Springer. (2009). *Manual de uso software Lisa Basic*. Obtenido de [extras.springer.com/2009/978-3-540-92725-9/espanol/foto.pdf](http://extras.springer.com/2009/978-3-540-92725-9/espanol/foto.pdf)
- Tierra, A. (2009). Evaluación del EGM08 y EGM96 en el Ecuador a partir de datos de GPS y nivelación geométrica. *Revista Geoespacial*, 72-80.
- Topoequipos S.A. (2015). *Fotogrametría Digital*. Obtenido de Topoequipos S.A: <http://www.topoequipos.com/topoequipos2.0/fotogrametraa-digital/fotogrametria-digital>

Triola, M. (2004). *Estadística*. Pearson Educación.

Tsarovski, S. (2015). *Accuracy Evaluation and Quality Control of Digital Orthomaps-Sheets*. Sofia, Bulgaria: From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World.

Universidad de Cádiz. (2009). *Tipos de posicionamiento*. España: Universidad de Cádiz.

Universidad de Oviedo. (26 de Marzo de 2018). *Información académica*. Obtenido de Apuntes de fotogrametría III: [http://www.mieres.uniovi.es/etopo/Material/Foto3/apuntes\\_2004-01-15.pdf](http://www.mieres.uniovi.es/etopo/Material/Foto3/apuntes_2004-01-15.pdf)

Vexcel Imaging. (2010). *Calibration Report, Geometric Calibration, UltraCam Xp*. Graz, Austria: Microsoft Company.

Vizuite. (2012). Análisis costo beneficio de la utilización del método alternativo para la actualización de cartografía planimétrica en el sector rural del cantón Manta. En V. Vizuite. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Vozmediano, D. (2006). *Fotogrametría digital aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales del entidades patrimoniales*. Lejona - España: Instituto de desarrollo de la Gestión y proyectos.

Zapata, O. (2003). *Fundamentos de fotogrametría para imágenes de contacto y digitales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

