

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN
LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

PRESENTADO POR:

**CLAROS ZELAYA, RENÉ ALBERTO
GUEVARA AGUILAR, ALEX ENRIQUE
PACAS CRUZ, NELSON RICARDO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. UVIN EDGARDO ZÚNIGA CRUZ

CIUDAD UNIVERSITARIA DE ORIENTE, AGOSTO DE 2016

SAN MIGUEL

EL SALVADOR

CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES

LIC. LUIS ARGUETA ANTILLÓN
RECTOR INTERINO

ING. CARLOS ARMANDO VILLALTA
VICE-RECTOR ACADÉMICO INTERINO

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA
SECRETARIA GENERAL

LICDA. NORA BEATRIZ MELÉNDEZ
FISCAL GENERAL INTERINA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

AUTORIDADES

ING. JOAQUÍN ORLANDO MACHUCA

DECANO

LIC. CARLOS ALEXANDER DÍAZ

VICE-DECANO

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNÁNDEZ

SECRETARIO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

AUTORIDADES

ING. JUAN ANTONIO GRANILLO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS
COORDINADOR DE CARRERA INGENIERÍA CIVIL

INGA. MILAGRO DE MARÍA ROMERO DE GARCÍA
COORDINADORA DE PROCESOS DE GRADUACIÓN

ING. UVÍN EDGARDO ZÚNIGA CRUZ
DOCENTE DIRECTOR

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROYECTO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL

TITULO:

**APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS
TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS**

PRESENTADO POR:

**CLAROS ZELAYA, RENÉ ALBERTO
GUEVARA AGUILAR, ALEX ENRIQUE
PACAS CRUZ, NELSON RICARDO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

ING. UVIN EDGARDO ZÚNIGA CRUZ

DOCENTE DIRECTOR

CIUDAD UNIVERSITARIA DE ORIENTE, AGOSTO DE 2016

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

INGA. MILAGRO DE MARÍA ROMERO DE GARCÍA
COORDINADORA DE PROCESOS DE GRADUACIÓN

ING. UVÍN EDGARDO ZÚNIGA CRUZ
DOCENTE DIRECTOR

TRIBUNAL CALIFICADOR DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. UVIN EDGARDO ZÚNIGA CRUZ
DOCENTE ASESOR

ING. JAIME PERLA PALACIOS
TRIBUNAL CALIFICADOR

ING. RIGOBERTO LÓPEZ
TRIBUNAL CALIFICADOR

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por las bendiciones, sabiduría e inteligencia para poder alcanzar el éxito en nuestra preparación profesional.

A la UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR por brindarnos toda la formación académica a lo largo de esta carrera universitaria, a través de principios, valores y lineamientos esenciales, con la cual estamos comprometidos para honrar esta institución en la vida profesional.

A todos y cada uno de los DOCENTES que colaboraron en nuestra formación académica, infinitamente agradecidos porque el conocimiento es algo que no tiene precio.

A LABTOP S.A. de C.V. por su apoyo invaluable en la ejecución de este trabajo de graduación con el préstamo de equipo y la asesoría técnica requerida.

A nuestras FAMILIAS por su comprensión y ayuda incondicional en el esfuerzo realizado para obtener este título.

Y finalmente a aquellos AMIGOS, compañeros y compañeras de estudio, que indirecta o directamente nos brindaron su apoyo y compañía.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso sobre todo, por la vida, fuerza y salud que me han permitido llegar a este día. Por ponerme en el lugar adecuado con las personas correctas, ser mi guía y guarda, así como por las bendiciones que he recibido por su gracia.

A mis padres René y Leonorilda, por su apoyo a lo largo de los años y las circunstancias. Por los valores, concejos y ejemplos que inculcaron en mi vida y que de un modo u otro han forjado mi carácter. Por todo el esfuerzo que invirtieron para mi formación y por creer en mí.

A mis hermanos Kevin y Stefany, a mi tía Doris y tío Edgar, quienes me han brindado aliento y apoyo.

A mis compañeros de tesis Alex y Ricardo, por su esfuerzo y amistad, y por todo lo que pasamos para completar esta aventura.

A aquellos amigos, que con su apoyo y amistad influenciaron en mí, vida y alegría. A Nelson Alvarado, Verence Centeno, Herson Hernández, Juan Andrade, Alan Alvarenga, Edwin Zelaya y Roberto Cruz.

A Joseline por su apoyo y tiempo, así como por todo el ánimo que me brindo no solo a lo largo de este proyecto.

A Bryant Quintanilla y Mauricio Campos, por aquellos primeros años que fueron tan valiosos y por tantas cosas desde pequeños.

Gracias a todos.

René Claros

DEDICATORIA

A DIOS por las bendiciones que me ha dado, por ser quien ilumina mi vida y me guía por el buen camino, por poner a las personas que han sido de gran ayuda en mi vida, y darme la fuerza física y mental para lograr mis objetivos.

A mis padres: SANTOS GUEVARA y ALBA AGUILAR, por apoyarme en todo momento y creer en mí, por ser los pilares fundamentales en mi vida que con mucho esfuerzo y dedicación me formaron y me motivaron para cumplir uno de mis objetivos, estoy muy orgulloso de ustedes por ser unos padres ejemplares. Espero poder hacerlos sentir orgullosos.

A Ricardo Rivera, Cesar Merino, Roberto Chicas, Katherine Merino, Yoni Membreño, por su amistad, compañerismo, palabras de motivación y apoyo.

A mis amigos Juan Andrade, Alan Alvarenga, Roberto Cruz, Joseline Reyes, Herson Hernández, por su apoyo y motivación durante la carrera y a Nelson Alvarado, por estar apoyando durante la carrera y el proyecto final, también a sus padres Nelson Alvarado y Nerys Arévalo por abrirnos las puertas de su casa.

A René Claros y Ricardo Pacas, compañeros de tesis y amigos, por su entusiasmo y compromiso, y el esfuerzo que realizamos para lograr los objetivos.

A Roselvy Bonilla por su cariño y su apoyo incondicional, y por estar pendiente de mí en todo momento que siempre busco la manera de animarme y salir adelante, gracias por todo.

A mis compañeros Isaac Portillo y Miguel Vela, que estaban cuando los necesitaba.

Y a todos que de alguna forma ayudaron a contribuir a que este sueño se lograra
GRACIAS TOTALES...

Alex Guevara

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por darme la vida y mostrarme cada día su infinito amor y bondad. Su gracia y favor han prevalecido en todo momento, dándome la fortaleza y sabiduría, iluminando mi camino y permitiéndome llegar hasta aquí.

A mis padres Nelson de Jesús y Selma Gloribel. Por todo el amor que me han entregado, por sus consejos y motivación constante, por los valores y principios que inculcaron en mí, el apoyo que me brindaron en todo momento, por todo su trabajo y dedicación para mi formación profesional, y por creer siempre en mí.

A mi hermano Nelson José, por su apoyo, comprensión y cariño. Su presencia en este mundo es la mejor de las peticiones que el Señor me ha concedido.

A mis abuelas y tías, gracias por su apoyo, sus consejos y sus oraciones. A mis primos y primas, gracias por su cariño y palabras de motivación. A mi tío Ricardo, por los consejos y ayuda que me ha brindado, especialmente por su apoyo incondicional durante la ejecución de este trabajo de graduación.

A mis compañeros de tesis René y Alex, por brindarme su gran amistad, comprensión, paciencia y todos esos momentos inolvidables. Ha sido un gran privilegio vivir esta aventura a su lado.

A mis amigos Herson Hernández, Juan Andrade, Alan Alvarenga, Edwin Zelaya y Roberto Cruz, por su aprecio, el trabajo en equipo y todos los buenos momentos vividos. A Nelson Alvarado y Joseline Reyes, por estar a mi lado siempre que los necesité, brindando su amistad y confianza. A Isaac Portillo, Frank Granados, Verence Centeno, Nidia Portillo, Yosselyn Centeno, Vanessa Luna y demás personas con quienes compartí amistad, apoyo y buenos momentos.

Ricardo Pacas



INDICE

INTRODUCCIÓN	xiii
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	2
CAPÍTULO 1. <i>GENERALIDADES</i>	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	4
1.1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	6
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	8
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
1.4 ALCANCES	9
1.5 LIMITACIONES	10
1.6 METODOLOGÍA	11
1.6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	11
1.6.2 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	11
1.6.3 RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS	12
1.6.3.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
1.6.3.2 RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO	12
1.6.3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	13
1.6.3.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	13
1.6.3.5 DESCRIPCIÓN Y DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	14
CAPÍTULO 2. <i>FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TOPOGRAFÍA</i>	15
2.1 TOPOGRAFÍA	16
2.1.1 HISTORIA DE LA TOPOGRAFÍA	17



2.1.2 IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA	18
2.2 DIVISIONES DE LA TOPOGRAFÍA	19
2.2.1 PLANIMETRÍA	20
2.2.2 ALTIMETRÍA	20
2.3 LEVANTAMIENTOS	21
2.3.1 TIPOS DE LEVANTAMIENTO	22
2.3.2 PRODUCTOS GENERADOS POR LOS LEVANTAMIENTOS	24
2.3.2.1 EL MAPA	25
2.3.2.2 MAPAS BASE O MAPAS TOPOGRÁFICOS	25
2.3.2.3 PLANOS TOPOGRÁFICOS	26
2.4 CIENCIAS Y TÉRMINOS RELACIONADOS CON LA TOPOGRAFÍA	26
2.4.1 AGRIMENSURA	26
2.4.2 GEOFÍSICA	26
2.4.3 GEODESIA	26
2.4.4 CARTOGRAFÍA	27
2.5 LA TIERRA EN SU VERDADERA FORMA	28
2.6 SISTEMAS DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS	31
2.7 PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS	32
2.7.1 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR	34
2.7.2 PROYECCIÓN CÓNICA CONFORME DE LAMBERT	37
CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA Y UAVs	39
3.1 DEFINICIÓN DE FOTOGRAMETRÍA	40
3.1.1 LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO	40
3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA	41
3.1.2.1 FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE	41
3.1.2.2 FOTOGRAMETRÍA AÉREA	41
3.1.2.3 FOTOGRAMETRÍA ANALÓGICA	41



3.1.2.4 FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA _____	42
3.1.2.5 FOTOGRAMETRÍA DIGITAL _____	42
3.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA FOTOGRAMETRÍA _____	43
3.2.1 LA FOTOGRAMETRÍA EN EL SALVADOR _____	43
3.2.1.1 PRODUCTOS Y SERVICIOS _____	47
3.3 FOTOGRAMETRÍA DIGITAL _____	50
3.3.1 FOTOGRAFÍA DIGITAL _____	53
3.3.1.1 VENTAJAS _____	53
3.3.1.2 DESVENTAJAS _____	55
3.3.2 LA IMAGEN DIGITAL _____	55
3.3.3 CARACTERÍSTICAS _____	56
3.3.3.1 RESOLUCIÓN DE UNA IMAGEN DIGITAL _____	57
3.3.3.1.1 PÍXEL _____	58
3.3.3.1.2 MEGAPÍXEL _____	59
3.3.3.1.3 DIMENSIONES DE IMAGEN _____	59
3.3.3.2 TAMAÑO DEL ARCHIVO _____	60
3.3.3.2.1 PROFUNDIDAD DE COLOR _____	61
3.3.3.2.2 COMPRESIÓN DE IMÁGENES _____	62
3.3.3.3 ALMACENAMIENTO DE METADATOS _____	64
3.4 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS _____	65
3.4.1 DEFINICIÓN UAV _____	65
3.4.2 CLASIFICACIÓN DE AERONAVES _____	68
3.4.3 USOS _____	69
3.4.4 UAVs EN LA INGENIERÍA CIVIL _____	70
3.4.4.1 BENEFICIOS _____	70
3.4.4.2 LIMITACIONES _____	71
3.5 INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS _____	72
3.5.1 CÁMARA _____	72
3.5.2 DRONES _____	75



3.5.2.1 UAV DE ALA FIJA	75
3.5.2.2 UAV DE ALA ROTATORIA	76
3.5.2.3 LIMITANTES DE CADA TIPO	77
3.5.3 MÉTODOS DE NAVEGACIÓN	78
3.5.4 SOFTWARE	81
CAPÍTULO 4. PROYECTO DE VUELO FOTOGRAMÉTRICO	83
4.1 INTRODUCCIÓN	84
4.2 CONCEPTO GENERAL	84
4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS	85
4.3.1 SISTEMA DE REFERENCIA	86
4.3.2 ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA	87
4.4 PLAN DE VUELO (FASE 1)	89
4.4.1 GSD Y ALTURA DE VUELO	91
4.4.1.1 CONSIDERACIÓN DEL GSD Y ALTURA DE VUELO	93
4.4.2 RECUBRIMIENTOS O TRASLAPES	95
4.4.2.1 REQUISITOS PARA LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE FOTOGRAFÍAS	96
4.4.2.2 RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL	97
4.4.2.3 RECUBRIMIENTO TRANSVERSAL	98
4.4.2.4 TIPO DE PROYECTO Y AJUSTE DEL TRASLAPE	99
4.4.2.4.1 CASOS ADICIONALES	106
4.4.2.5 CONSIDERACIONES DEL PLAN DE VUELO Y LAS VARIACIONES EN ALTURA	108
4.4.3 DIMENSIÓN DE LA MISIÓN DE VUELO	109
4.4.3.1 PIX4D CAPTURE APP	111
4.4.3.1.1 CONFIGURACIÓN DE LA REJILLA	113
4.4.3.1.2 CONFIGURACIÓN DEL PROYECTO	115
4.4.3.2 MÉTODO ALTERNATIVO	116
4.4.4 CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL PLAN DE VUELO	118
4.5 APOYO TOPOGRÁFICO DEL VUELO (FASE 2)	120



4.5.1 METODOLOGÍA	120
4.5.2 PUNTOS DE CONTROL	121
4.5.3 PUNTOS DE APOYO (GCP)	122
4.5.3.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO	124
4.5.3.2 SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO	125
4.5.3.3 COLOCACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO	126
4.6 ADQUISICIÓN DE FOTOGRAFÍAS (FASE 3)	127
4.6.1 AJUSTES DE LA CÁMARA	128
4.6.1.1 RESUMEN	129
4.6.2 PREPARACIÓN DEL EQUIPO	130
4.6.2.1 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	131
4.6.2.2 CUÁNDO RECALIBRAR	133
4.6.3 EJECUCIÓN DEL VUELO	134
4.6.3.1 PREPARACIÓN DEL UAS	134
4.6.3.2 EJECUCIÓN DEL VUELO	135
4.6.3.3 CONDICIONES DE USO DEL PHANTOM 3 PROFESSIONAL	138
4.7 PROYECTO DE VUELO UES FMO	139
4.7.1 DESCRIPCIÓN	139
4.7.1 PLAN DE VUELO	139
4.7.1.1 EJECUCIÓN	145
4.7.2 APOYO TERRESTRE	146
4.7.2.1 EQUIPO UTILIZADO	146
4.7.2.2 OBTENCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL Y GCP	147
4.7.2.3 RESULTADOS	150
CAPÍTULO 5. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES Y GENERACIÓN DE PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS	152
5.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	153
5.1.1 PIX4D MAPPER	153



5.1.1.1 VERSIONES DEL SOFTWARE _____	155
5.1.1.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA _____	156
5.1.2 PROYECTO UES FMO _____	157
5.1.2.1 CREACIÓN DEL PROYECTO EN PIX4D MAPPER _____	157
5.1.2.1.1 SISTEMAS DE COORDENADAS A UTILIZAR _____	160
5.1.2.2 CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DE PROCESAMIENTO _____	163
5.1.2.2.1 PROCESAMIENTO INICIAL _____	163
5.1.2.2.2 NUBE DE PUNTOS Y MALLA _____	166
5.1.2.2.3 DSM, ORTOMOSAICO E ÍNDICES _____	172
5.1.2.3 PROCESAMIENTO EN PIX4D MAPPER PRO _____	178
5.1.2.3.1 PROCESAMIENTO INICIAL _____	178
5.1.2.3.2 NUBE DE PUNTOS Y MALLA _____	196
5.1.2.3.3 DSM, ORTOMOSAICO E ÍNDICES _____	198
5.1.2.4 ARCHIVOS DE SALIDA _____	199
5.1.2.4.1 FORMATO LAS (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM) _____	199
5.1.2.4.2 FORMATO LAZ (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM) _____	200
5.1.2.4.3 FORMATO PLY (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, MALLA 3D TEXTURIZADA) _____	200
5.1.2.4.4 FORMATO XYZ (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM) _____	200
5.1.2.4.5 GEOTIFF (RÁSTER DSM, ORTOMOSAICO) _____	200
5.1.2.4.6 TESELAS DE GOOGLE MAPS Y KML (ORTOMOSAICO) _____	201
5.1.2.4.7 TESELAS DE MAPBOX (ORTOMOSAICO) _____	201
5.1.2.4.8 FORMATO SHP (CURVAS DE NIVEL) _____	201
5.1.2.4.9 FORMATO PDF (CURVAS DE NIVEL) _____	202
5.1.2.4.10 FORMATO PDF 3D (MALLA 3D TEXTURIZADA) _____	202
5.1.2.4.11 FORMATO FBX (MALLA 3D TEXTURIZADA) _____	202
5.1.2.4.12 FORMATO DXF (MALLA 3D TEXTURIZADA) _____	202
5.2 POST PROCESAMIENTO _____	203
5.2.1 VECTORIZACIÓN _____	203
5.2.1.1 DEFINICIÓN DE ORTOMOSAICO _____	203
5.2.1.2 METODOLOGÍA _____	204



5.2.1.3 VECTORIZACIÓN PROYECTO UES FMO	204
5.2.1.3.1 LINDEROS	205
5.2.1.3.2. EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS	205
5.2.1.3.3 CARRETERAS Y CAMINOS	206
5.2.1.3.4 DIVISIONES DE TERRENOS	207
5.2.1.3.5 ACERAS Y ESTACIONAMIENTOS	208
5.2.2 CREACIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS	209
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	211
6.1 CONCLUSIONES	212
6.2 RECOMENDACIONES	214
BIBLIOGRAFÍA	216
ANEXOS	219
ANEXO A. GLOSARIO	220
ANEXO B. ESPECIFICACIONES DEL PHANTOM 3 PROFESSIONAL	242
ANEXO C. REPORTE DE CALIDAD	249
ANEXO D. DETALLE DE PUNTOS UTILIZADOS	276
ANEXO E. PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS	289



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ajuste del geoides a la superficie de la tierra. _____	29
Figura 2. Parámetros de un elipsoide. _____	30
Figura 3. Forma de medir coordenadas geográficas. _____	32
Figura 4. Proyección cónica de la tierra. _____	33
Figura 5. Proyección acimutal de la tierra. _____	33
Figura 6. Proyección cilíndrica de la tierra. _____	34
Figura 7. Cuadrícula UTM. _____	36
Figura 8. Proyección cónica conforme de Lambert. _____	38
Figura 9. Vista general del Departamento de Fotogrametría y sus aparatos análogos. _____	46
Figura 10. Sistema de búsqueda del CNR. _____	48
Figura 11. Proceso fotogramétrico digital. _____	52
Figura 12. Composición de una imagen digital. _____	56
Figura 13. Representación del GSD en el terreno. _____	57
Figura 14. Resolución espacial de una fotografía aérea según el tamaño del pixel. _____	58
Figura 15. Profundidad de color. _____	62
Figura 16. Ejemplo de imagen B/N a comprimir. _____	63
Figura 17. Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas. _____	66
Figura 18. Principales tipos de aeronaves. _____	68
Figura 19. Representación del giro de la aeronave durante el vuelo. _____	76
Figura 20. Relación entre escala fotográfica y cartográfica. _____	87
Figura 21. Factores que definen un vuelo fotogramétrico. _____	90
Figura 22. Cálculo de la altura de vuelo. _____	91
Figura 23. Vuelo en terreno con variaciones de elevación. _____	94
Figura 24. Solape longitudinal y transversal. _____	96
Figura 25. Recubrimiento longitudinal en tomas consecutivas. _____	97
Figura 26. Variaciones en el traslape entre pares estereoscópicos. _____	98
Figura 27. Patrón de vuelo fotogramétrico tradicional. _____	101



Figura 28. Patrón de vuelo fotogramétrico circular. _____	103
Figura 29. Patrón de vuelo propuesto para corredores. _____	104
Figura 30. Traslape entre misiones múltiples. _____	105
Figura 31. Plan de vuelo de rejilla doble. _____	106
Figura 32. Plan de vuelo circular aplicado a elementos verticales altos. _____	107
Figura 33. Plan de adquisición de fotografías en terrenos con variación del relieve. _____	108
Figura 34. Drones soportados por Pix4D Capture App. _____	111
Figura 35. Configuración inicial de Pix4D Capture. _____	112
Figura 36. Menú principal de Pix4D Capture y tipos de misiones disponibles. _____	113
Figura 37. Modelo de rejilla a configurarse en Pix4D Capture. _____	114
Figura 38: Proyecto de vuelo con las misiones proyectadas e información por misión. ____	116
Figura 39. Variación del área cubierta por una fotografía según cambios en la distancia focal y la altura de vuelo. _____	118
Figura 40. Relación entre traslape y GSD debido a la orografía del terreno. _____	119
Figura 41. Variación del traslape entre fotografías según cambios en la velocidad de captura y la altura de vuelo. _____	120
Figura 42. Distribución de GCPs en corredores. _____	123
Figura 43. Distribución de GCPs en la zona de interés del proyecto. _____	125
Figura 44. Tipos de marca utilizadas como GCP. _____	126
Figura 45. Procedimiento de colocación de marcas y medición de coordenadas para GCPs. _____	127
Figura 46. Problemas de imágenes fotográficas, debido a los parámetros configurados en la cámara o uso de equipo inadecuado. _____	130
Figura 47. Proceso de calibración de la brújula desde la Aplicación DJI GO. _____	132
Figura 48. Proceso de calibración de la brújula. _____	133
Figura 49. Vista principal de la Aplicación DJI GO (Versión para sistema Android). _____	136
Figura 50. Ventana de inicio de vuelo. _____	137
Figura 51. Modelo básico para la misión de vuelo. _____	142
Figura 52. Distribución de las misiones de vuelo. _____	144
Figura 53. Equipo ACNOVO GX9 GNS. _____	147
Figura 54. Desarrollo del trabajo topográfico. _____	148



Figura 55. Ubicación de los puntos tomados durante la fase de apoyo topográfico. _____	151
Figura 56. Tipos de cámara soportados por Pix4D. _____	154
Figura 57. Pantalla de bienvenida de Pix4D Mapper Pro. _____	156
Figura 58. Asistente de creación de proyectos de Pix4D Mapper. _____	157
Figura 59. Selección de las imágenes agregadas al proyecto. _____	158
Figura 60. Propiedades de imágenes del nuevo proyecto. _____	159
Figura 61. Creación de un nuevo sistema de coordenadas en un ArcMap 10.3. _____	160
Figura 62. Ventana de creación de un nuevo sistema de coordenadas. _____	161
Figura 63. Plantillas de opciones de procesamiento en Pix4D Mapper. _____	162
Figura 64. Configuración general de las opciones del procesamiento inicial. _____	164
Figura 65. Configuración de las opciones de emparejamiento. _____	165
Figura 66. Configuración de las opciones de calibración. _____	166
Figura 67. Configuración de las opciones de procesamiento de la nube de puntos. _____	168
Figura 68. Configuración de las opciones de creación de malla 3D. _____	169
Figura 69. Opciones avanzadas del procesamiento de nube de puntos y malla. _____	171
Figura 70. Complementos de la nube de puntos y malla. _____	172
Figura 71. Configuración del MDS y ortomosaico. _____	175
Figura 72. Configuración de resultados adicionales del paso 3. _____	176
Figura 73. Configuración de la calculadora de índices. _____	178
Figura 74. Gestor GCP/MTP. _____	179
Figura 75. Puntos importados en el Gestor GCP/MTP antes de ser marcados. _____	181
Figura 76. Marcado de GCPs en el rayCloud. _____	182
Figura 77. Editor GCP/MTP Básico. _____	183
Figura 78. Procesamiento de datos de tablas en ArcMap 10.3. _____	187
Figura 79. Inserción de puntos en dibujo de ArcMap. _____	188
Figura 80. Visualización de puntos añadidos en ArcMap. _____	188
Figura 81. Uso de la herramienta de conversión de coordenadas de ArcMap. _____	189
Figura 82. Notación de coordenadas UTM resultantes. _____	190
Figura 83. Vista parcial del reporte de calidad. _____	192
Figura 84 . Visualización de la nube de puntos densificada. _____	197



Figura 85. Malla 3D texturizada con baja resolución. _____	197
Figura 86. Puntos de objetos seleccionados manualmente (color rojo). _____	198
Figura 87. Vectorización de un edificio. _____	206
Figura 88. Vectorización de carreteras. _____	207
Figura 89. Vectorización de cercos. _____	208
Figura 90. Vectorizado de estacionamientos. _____	209

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elipsoides más comunes. _____	30
Tabla 2. Fotogrametría según su tratamiento. _____	42
Tabla 3. Productos Digitales Fotogramétricos. _____	48
Tabla 4. Productos Impresos Fotogramétricos. _____	49
Tabla 5. Productos Digitales Cartográficos y Geográficos. _____	50
Tabla 6. Dimensiones de imagen según proporción y cantidad de píxeles. _____	60
Tabla 7. Dimensiones de imagen según proporción y cantidad de píxeles. _____	61
Tabla 8. Distancia Focal de la cámara recomendada por Pix4D según el tipo de proyecto. ____	73
Tabla 9. Fórmulas de conversión para el formato de 35 mm. _____	74
Tabla 10. Ventajas y desventajas del uso de los tipos de UAV. _____	77
Tabla 11. Recubrimiento recomendado para vuelos fotogramétricos. _____	95
Tabla 12. Requerimientos de la Aplicación Pix4D Capture desarrollada por Pix4D para el control de la misión de Mapeo. _____	110
Tabla 13. Requerimientos de la Aplicación DJI GO desarrollada por DJI TECHNOLOGY CO., LTD para el control de la aeronave. _____	131
Tabla 14. Lista de revisión previa al inicio de la misión. _____	137
Tabla 15. Características internas de la cámara del Phantom 3 Professional. _____	140
Tabla 16. Definición de las características del modelo básico de la misión. _____	142
Tabla 17. Dimensiones de las misiones para el proyecto. _____	143
Tabla 18. Coordenadas de las misiones para el proyecto. _____	145



Tabla 19. Cronograma de ejecución de las misiones de vuelo del proyecto. _____	146
Tabla 20. Datos para la proyección Lambert 3 Parámetros El Salvador. _____	149
Tabla 21. Coordenadas de los puntos de apoyo. _____	150



INTRODUCCIÓN

No hay ninguna discusión en cuanto a que el avance tecnológico ha revolucionado el mundo, y desde luego la modernización de las técnicas de topografía no son la excepción a esta tendencia.

Los avances tecnológicos están orientados a reducir los riesgos del operario o del elemento humano, optimizar procesos (reducir tiempos de trabajo) y minimizar costos a largo plazo. Dichos avances han permitido el desarrollo y la adaptación de nuevos equipos y métodos de medición.

Sobre todo, se ha popularizado el uso de los sistemas de posicionamiento por satélite. Lo anterior permite que en la actualidad la toma de información en el campo sea cada vez más fácil, segura y genere resultados de mayor calidad en cuanto a la certidumbre de los datos recolectados, así como a que esta recolección masiva de información nos permita representar en los planos situaciones más fidedignas de un terreno.

Cada técnica y aparato tiene sus limitantes en el campo y su uso está determinado por las condiciones físicas del terreno y las necesidades del proyecto. Dichas necesidades están relacionadas con el alcance del proyecto, con el tiempo disponible para realizar el estudio, con el nivel de precisión exigido y los recursos económicos y humanos disponibles.

El uso de vehículos aéreos no tripulados permite la toma de fotografías aéreas georreferenciadas que sirven para la creación de modelos digitales de terrenos y la representación cartográfica de estos. Este progreso en la forma de obtener fotografías aéreas, sumado al desarrollo de los programas informáticos, permite que la fotogrametría, técnica utilizada desde hace varias décadas, se adapte a la era digital y facilite el trabajo del ingeniero civil o arquitecto.

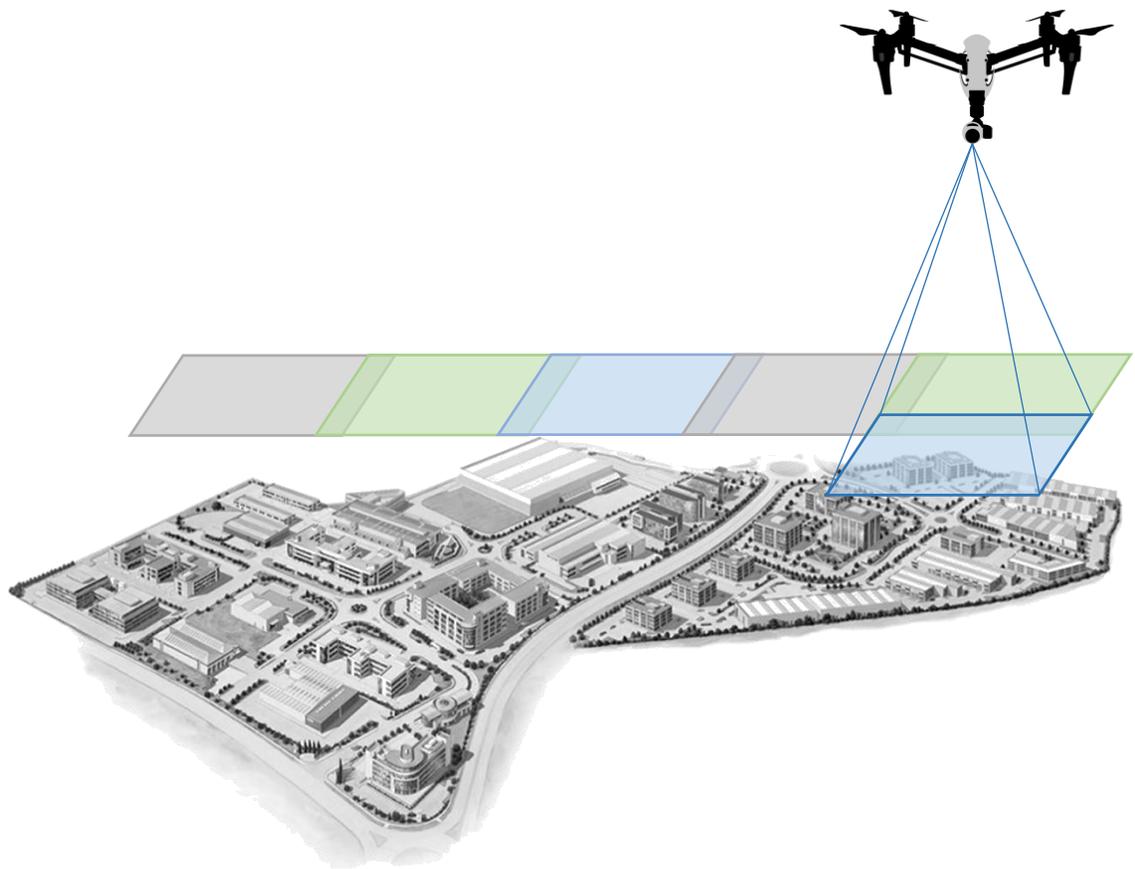


En este trabajo de grado se estudia la aplicación de fotogrametría aérea digital a través del uso de vehículos aéreos no tripulados o drones en levantamientos topográficos para la medición de terrenos y producción de cartografía catastral.

Se presenta en este documento la fundamentación teórica necesaria para la comprensión de la técnica, además de la descripción detallada del proceso de aplicación de ésta, desde la planificación previa hasta la presentación de resultados finales.

Para que la descripción de los procesos de vuelo fotogramétrico y procesamiento de datos sea lo más clara posible y permita la comprensión de la técnica estudiada, se realizará un vuelo fotogramétrico con drones en el campus de la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador, como ejemplo práctico, además de realizar el procesamiento de la información y generar una representación cartográfica del campus.

Se procura establecer parámetros que sirvan de guía para el empleo de esta técnica bajo condiciones similares en el territorio nacional; además de generar mediante el levantamiento una base de datos topográficos del terreno de la Facultad Multidisciplinaria Oriental.



*APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN
LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS*



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ATT	<i>Automatic Aerial Triangulation.</i>
ATP	<i>Automatic Tie Point.</i>
CRS	<i>Coordinate Reference System.</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model.</i>
DSM	<i>Digital Surface Model.</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model.</i>
EXIF	<i>Exchangeable image file format.</i>
GCP	<i>Ground Control Point.</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System.</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
GSD	<i>Ground Sampling Distance.</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Units.</i>
MTP	<i>Manual Tie Point.</i>
NVDI	<i>Normalized Difference Vegetation Index.</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic.</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format.</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial System.</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle.</i>

CAPÍTULO 1.



GENERALIDADES



1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La topografía es la ciencia que determina las dimensiones y el contorno (o características tridimensionales) de la superficie de la Tierra a través de la medición de distancias, direcciones y elevaciones.¹

En la actualidad la topografía ha tenido evoluciones significativas, con técnicas e instrumentos que permiten realizar mediciones directas o indirectas de la superficie terrestre, de una manera más rápida y obteniendo resultados cada vez más precisos y confiables, lo que es requerido por el ingeniero civil para obtener la información necesaria para hacer un análisis de la superficie que permita realizar la planificación de los diversos tipos de proyectos civiles.

La ejecución de levantamientos topográficos en el país ha tenido avances significativos en los últimos años, permitiendo un análisis más completo de las superficies. El uso de equipos topográficos como la estación total es cada vez más común en la ejecución de los levantamientos topográficos; sin embargo la aplicación de técnicas y equipos más avanzados para la obtención de datos de topografía es aún poco común en el país.

1.1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

El uso de la estación total permite realizar mediciones precisas, pero las jornadas de realización de los levantamientos son largas, requieren de varias personas para su ejecución y pueden presentar situaciones donde el acceso de los topógrafos a los sitios donde se realizará la medición es difícil y puede suponer un riesgo. Esto supone un problema, pues la importancia de los datos obtenidos a partir de los levantamientos topográficos es notable en la formulación y

¹McCormac. (2004). Topografía. México: LimusaWiley.



ejecución de proyectos y existe la necesidad que la obtención de estos datos se dé en el menor tiempo posible y que estos sean confiables.

La demanda de estos datos topográficos es grande debido a la constante ejecución de proyectos de obra civil que requieren del conocimiento de la topografía de la superficie.

La elaboración de estudios preliminares, trazado de caminos, cálculos volumétricos, definición de curvas de nivel en zonas con difícil acceso, así como obtener una base de datos topográficos que cumpla con las exigencias de cada proyecto se facilita con la integración de nuevas tecnologías, como el uso de vehículos aéreos no tripulados o drones para aplicar técnicas fotogramétricas.

Sin embargo, en el país hay poco conocimiento sobre el uso de estas aeronaves y su uso en conjunto con los programas informáticos actualmente utilizados para hacer análisis fotogramétricos.



1.2 JUSTIFICACIÓN

La ingeniería civil ha tenido desde sus inicios el compromiso de proyectar, diseñar, analizar, construir y dar mantenimiento a proyectos que satisfagan en funcionalidad y confiabilidad las necesidades de una población o comunidad. Una etapa importante en el diseño y ejecución de los proyectos de obra civil es el análisis de la topografía del lugar donde se desplantarán estos proyectos, pues es necesario conocer la planimetría y altimetría del terreno.

Según las características de cada proyecto se presentan limitaciones de tiempo y recursos y la elección del equipo y metodología de trabajo son claves en el éxito del mismo.

La fotogrametría es el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía.

La aplicación de vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) en la ejecución de vuelos fotogramétricos es una técnica novedosa, y el uso de drones (UAVs de menor tamaño), los cuales han incrementado de forma constante su popularidad y accesibilidad para el público desde hace pocos años, es aún más novedosa.

El uso de drones para trabajos civiles tiene un mayor uso en países desarrollados conforme pasa el tiempo, sin embargo, en El Salvador el uso de esta tecnología es aún desconocido para muchos y gran parte de los profesionales de la ingeniería civil dedicados al área de la topografía no conocen el procedimiento que se lleva a cabo para la obtención y procesamiento de datos que permitan analizar la superficie del terreno por medio de fotografías aéreas obtenidas con este equipo.



Adquirir los conocimientos necesarios sobre la aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos a través del uso de drones permitirá al ingeniero civil o arquitecto dedicado a la medición y representación de terrenos conocer las bondades de la implementación de la técnica y tener una nueva visión sobre la facilidad de adquirir información de la superficie terrestre mediante un método indirecto obteniendo resultados confiables en tiempos menores que los requeridos por métodos directos de medición topográfica.

Con la ejecución de este trabajo de grado se demostrarán las ventajas del uso de vehículos aéreos no tripulados en la obtención de fotografías, con lo que se consigue nubes de puntos de alta resolución y que muestran la apariencia real del terreno.

Además de demostrar el uso de los software que harán el procesamiento de las imágenes y servirán en la elaboración de un producto catastral, se proporcionarán los conocimientos necesarios para que el lector pueda planificar y ejecutar por su cuenta un proyecto de vuelo fotogramétrico utilizando drones, siendo así capaz de hacer uso, en las situaciones adecuadas, de los últimos instrumentos presentados como una alternativa a los levantamientos topográficos convencionales.



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Aplicar fotogrametría aérea a baja altura en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados con fines ingenieriles.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Establecer los lineamientos necesarios para la definición de un plan de vuelo fotogramétrico, el programa de trabajo y los criterios de control necesarios para la ejecución de un levantamiento fotogramétrico a baja altura con un drone que se ajuste a los distintos escenarios presentes en la Facultad Multidisciplinaria Oriental.
- ❖ Realizar un vuelo sobre el terreno y los alrededores de la Facultad Multidisciplinaria Oriental usando vehículos aéreos no tripulados para la obtención de fotografías aéreas georreferenciadas.
- ❖ Integrar tecnología RTK en la recolección de puntos que permitan mejorar la precisión de la georreferenciación del modelo de la superficie y la definición de los límites de la Facultad Multidisciplinaria Oriental.
- ❖ Generar los productos fotogramétricos básicos de la técnica digital tales como el modelo digitalizado tridimensional de la superficie, curvas de nivel, mallas 3D texturizadas y ortomosaicos.



1.4 ALCANCES

En esta investigación se pretende generar una guía con los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para la ejecución de un vuelo fotogramétrico con vehículos aéreos no tripulados y para el procesamiento de datos y presentación de resultados, a través de las siguientes actividades:

- ❖ Se pondrá en práctica la metodología planteada en el estudio, que consistirá en la planificación y ejecución del proyecto de vuelo sobre el campus de la Facultad Multidisciplinaria Oriental utilizando vehículos aéreos no tripulados (drones) multirrotor, para la obtención de fotografías aéreas.
- ❖ Se establecerán puntos de apoyo terrestre mediante el uso de un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real para su utilización en la etapa de procesamiento de las imágenes.
- ❖ Se realizará el procesamiento de imágenes obtenidas en el vuelo mediante el uso de software especializado en fotogrametría (Pix4D Mapper) para obtener productos de los cuales se pueda extraer información topográfica.
- ❖ Se generará un modelo digital de la superficie del terreno, resultante del estudio, para cotejar con la base de datos topográficos existente de la facultad.
- ❖ A partir del modelo digital de superficie resultado del procesamiento de las fotografías se creará un plano topográfico de la Facultad Multidisciplinaria Oriental.



1.5 LIMITACIONES

- ❖ No se cuenta con normativas o especificaciones que regulen la ejecución de vuelos fotogramétricos con vehículos aéreos no tripulados, por lo que el procedimiento de ejecución del vuelo será ejecutado de acuerdo a principios establecidos en diversas fuentes bibliográficas.
- ❖ Este estudio está enfocado en la utilización de fotografías aéreas tomadas con drones para la aplicación de fotogrametría digital en la medición de terrenos y generación de productos cartográficos, por lo que otras aplicaciones ingenieriles o no ingenieriles de las fotografías captadas por drones quedan fuera del área de investigación.
- ❖ Debido a que el uso de vehículos aéreos no tripulados para realizar análisis fotogramétricos es una técnica nueva y de muy poco uso en El Salvador, son pocas las empresas que poseen estos equipos, y ninguna universidad cuenta con una especialización o materias afines a esta técnica; por lo tanto, existe poco personal capacitado en esta área que pueda contribuir con la investigación.
- ❖ El equipo UAV que se usara será un drone tipo multirrotor con una cámara fotográfica convencional por lo que no se estudiarán aplicaciones de imágenes multiespectrales ni el uso de otro tipo de equipo para la recolección y toma de fotografías.
- ❖ La aplicación práctica de la metodología se hará dentro del terreno de la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador y sus alrededores.



1.6 METODOLOGÍA

1.6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La fotointerpretación y la fotogrametría son campos ya estudiados desde hace más de medio siglo. La aplicación o implementación de aeronaves de menor envergadura como son los UAV y entre estos el uso de drones para tareas de topografía a menor escala (comparado a la actualización de la cartografía de un país o ciudad) es relativamente nuevo. Dentro del área de la fotogrametría y aún más dentro de la fotogrametría aérea la investigación busca tener un alcance descriptivo.

Se describirá una metodología para la aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos haciendo uso de fotografías obtenidas con vehículos aéreos no tripulados. Esta metodología comprenderá desde la etapa de planeación del vuelo fotogramétrico hasta la etapa de presentación de resultados finales, detallando cada etapa con una secuencia lógica y ordenada.

1.6.2 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

Este documento pretende convertirse en una guía que brinde la información necesaria para que el lector pueda conocer de manera básica la metodología de uso de un UAV multirrotor (4 rotores con hélices) para la toma de fotografías aéreas destinadas a obtener información de la topografía de un terreno, así como adquirir los conocimientos sobre el procesamiento del recurso digital y la presentación de resultados. Se establecerán además directrices para la operación y calibración del equipo a utilizar y se presentarán recomendaciones sobre el desarrollo de la técnica y consideraciones que deberán tomarse en cuenta durante el trabajo de campo y de oficina.

Para la comprensión de los elementos involucrados, tanto en la etapa de vuelo fotogramétrico como en la del procesamiento de información, con el fin de



fundamentar de manera adecuada los conocimientos del lector y facilitar así la asimilación de la información proporcionada se desglosará fundamentación teórica en el área de topografía y fotogrametría.

1.6.3 RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

1.6.3.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se estudiarán libros, revistas, tesis, manuales y otros tipos de documentos, sean de origen nacional o extranjero, que puedan servir como base para la fundamentación teórica de la investigación, además de incluir información resultante de las experiencias propias de los investigadores, obtenida durante la ejecución de las etapas que comprenden la aplicación, en el campus de la Facultad Multidisciplinaria Oriental, de la técnica planteada en el estudio.

1.6.3.2 RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO

La información recolectada en campo será obtenida a partir de fotografías aéreas y de puntos de control establecidos en el terreno de la facultad.

La toma de fotografías aéreas de las cuales se obtendrá la información en la etapa de procesamiento de datos se realizará a través del uso de un vehículo aéreo no tripulado multirrotor: el DJI Phantom 3 Professional.

El DJI Phantom 3 Professional es un dron con peso de 1280g que cuenta con una cámara de 12 megapíxeles y también cuenta con sistema GLONASS+GPS para la navegación y georreferenciación de imágenes.

Las coordenadas de los puntos de apoyo establecidos serán obtenidas con un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK).

Los puntos de apoyo terrestre (también llamados puntos de amarre o GCP) son puntos visibles en las fotografías captadas por los drones, que tienen como función asociar las coordenadas reales de un punto sobre el terreno con las



coordenadas de ese punto en la fotografía obtenidas por medio del GPS del dron. Esta asociación se hace con el fin de corregir cualquier error existente en las coordenadas de las fotografías y obtener mejores resultados en el modelado digital de la superficie.

1.6.3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de las imágenes se realizará con el software especializado en fotogrametría Pix4D Mapper Pro.

Pix4D es un programa capaz de convertir hasta 10,000 imágenes aéreas y oblicuas tomadas por UAV o avión, en ortomosaicos 2D georreferenciados, modelos 3D de superficie y nubes de puntos.

Pix4D ofrece una precisión 3D centimétrica y cuenta con un flujo de trabajo completamente automático. Introduce el concepto innovador de rayCloud que combina la nube de puntos 3D con las imágenes originales que permite la edición y corrección de los proyectos.

Los resultados obtenidos son fácilmente exportables a cualquier GIS, CAD o software de fotogrametría tradicional, por lo que serán procesados en una de estas plataformas con el fin de preparar un producto cartográfico que represente de forma ideal la información obtenida.

1.6.3.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

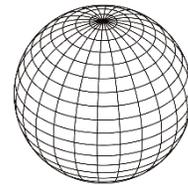
Se hará un análisis de las experiencias obtenidas en el proceso del vuelo fotogramétrico y del procesamiento de datos, además de cotejar los resultados obtenidos en ese procesamiento con el producto de un levantamiento topográfico convencional, comparando aspectos como el tiempo de recolección y procesamiento de datos, precisión de los datos recolectados y costos de operación.



1.6.3.5 DESCRIPCIÓN Y DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

Terminada la investigación se procederá a dar a conocer la metodología propuesta, así como las conclusiones y recomendaciones que se tengan sobre la implementación de la técnica estudiada.

CAPÍTULO 2.



FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TOPOGRAFÍA



2.1 TOPOGRAFÍA

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

La topografía, en general, es una aplicación de la geometría y, por tanto, sin el conocimiento de esta ciencia, sería imposible que aquella llenara el cometido que tiene asignado.

Con los datos tomados por el topógrafo sobre el terreno y por medio de elementales procedimientos matemáticos, se calculan distancias, ángulos, direcciones, coordenadas, elevaciones, áreas o volúmenes, según lo requerido en cada caso.

La topografía se encuentra directamente relacionada con la Tierra. El estudio de la Tierra como cuerpo en el espacio le corresponde a la astronomía; y como globo terrestre en lo que concierne a su configuración precisa y a su medida le corresponde a la geodesia; pero el hombre tiene necesidad de algo más, de un estudio detallado de un territorio determinado de la tierra, en el cual orientará su existencia diaria.

He aquí donde entra la topografía: ayuda a determinar los linderos de la propiedad, con sus divisiones interiores y diversos cultivos, las viviendas, los caminos y los ríos, los puentes, los ferrocarriles, los montes con sus valles y barrancos, los bosques, los pantanos, etc., y, en suma, todas aquellas particularidades del terreno que puedan interesar en las cuestiones que se presentan en las necesidades de la vida práctica.



2.1.1 HISTORIA DE LA TOPOGRAFÍA

En realidad se desconoce el origen de la topografía. Las pruebas que ubiquen la realidad histórica de la topografía se han encontrado en forma aislada como lo muestra una tablilla de barro encontrada en Ur, en Mesopotamia, que data de tres siglos antes de nuestra era y los testimonios encontrados en otros territorios, en diversas partes del mundo, pero es de Egipto donde se han obtenido mayores y mejores referencias, las escenas representadas en muros, tablillas y papiros, de los hombres realizando mediciones de terrenos.

Los egipcios conocían como ciencia pura lo que después los griegos bautizaron como *geometría* (medida de la tierra) y su aplicación en lo que pudiera considerarse como *topografía* o quizá mejor dicho etimológicamente, *topometría*.

Posiblemente a partir de que el hombre se hizo sedentario y comenzó a cultivar la tierra nació la necesidad de hacer mediciones o, como señala el ingeniero francés P. Merlin, *la topografía nace al mismo tiempo que la propiedad privada*.

Tener la necesidad de medir regiones más o menos extensas gestó conocimientos empíricos y rudimentarios que después evolucionaron. Al principio el hombre usó como patrones de medida las cosas que le eran familiares, incluso su propio cuerpo; por ejemplo, la alzada de un caballo era medida en palmos, es decir, tantas veces la anchura de la mano. La distancia entre las puntas del dedo meñique y del dedo pulgar, con la mano totalmente extendida, era considerada como medio codo, y ésta era la distancia entre el codo y la punta de los dedos. El pie fue otra medida y se le consideraba como las tres cuartas partes del codo.

En la Edad Media los árabes lograron avances, sobre todo, en la astronomía y la geografía. Gracias a los grandes descubrimientos se avanzó en la elaboración de mapas y planos, con lo cual los trabajos de topografía y los geodésicos avanzaron en su técnica e instrumental. Con la aparición del telescopio a finales del siglo XVI y principios del XVII, tuvieron un gran avance, y se realizaron



trabajos espectaculares en el aspecto de la forma y tamaño de la Tierra. Nombres como Picard, Snellius y Casini fueron muy importantes para el conocimiento y desarrollo de la topografía y el establecimiento de los fundamentos de la geodesia y de la cartografía moderna.

El aumento de la población mundial, así como las necesidades de comunicación, vivienda, desarrollo de la producción agrícola y expansión territorial, hicieron que esta disciplina superara la época de sus métodos primitivos.

La topografía avanzó notablemente después de los grandes movimientos bélicos a través de la historia. En la actualidad existe una urgente necesidad de elaborar planos y mapas topográficos con alta precisión, para determinar límites entre países, tareas en las que se complementa con la geodesia.

El aumento del costo de los terrenos y el progreso de la última parte del siglo XIX y, sobre todo, del siglo XX, hizo que se inventaran instrumentos y métodos en forma vertiginosa. En efecto, sobre todo en las últimas décadas, se han conseguido más avances científicos y tecnológicos que en todos los siglos anteriores. Así, ahora contamos con teodolitos de alta precisión, tanto ópticos como electrónicos, distanciómetros electrónicos de fuente luminosa y de fuente electromagnética, colimadores láser, la percepción remota por medio de fotografías aéreas, imágenes de satélites artificiales y el radar, que facilitan los trabajos topográficos.

2.1.2 IMPORTANCIA DE LA TOPOGRAFÍA

La topografía es una de las artes más antiguas e importantes porque, como se ha observado, desde los tiempos más remotos ha sido necesario marcar límites y dividir terrenos. En la era moderna, la topografía se ha vuelto indispensable. Los resultados de los levantamientos topográficos de nuestros días se emplean para:



- ✓ Elaborar mapas de superficies terrestres, arriba y abajo del nivel del mar.
- ✓ Trazar cartas de navegación aérea, terrestre y marítima.
- ✓ Deslindar propiedades privadas y públicas.
- ✓ Crear bancos de datos con información de recursos naturales y utilización de la tierra, para ayudar a la mejor administración y aprovechamiento de nuestro ambiente físico.
- ✓ Evaluar datos sobre tamaño, forma, gravedad y campo magnético de la tierra.
- ✓ Preparar mapas de la luna y de los planetas

La topografía desempeña un papel sumamente importante en muchas ramas de la ingeniería, por ejemplo, los levantamientos topográficos son indispensables para planear, construir y mantener carreteras, sistemas viales de tránsito, edificios, puentes, base de lanzamiento de cohetes y estaciones astronáuticas, estaciones de rastreo, túneles, canales, presas, obras de drenaje, fraccionamiento de terrenos urbanos, sistemas de aprovisionamiento de agua potable y eliminación de aguas negras, tuberías y tiros de minas, los métodos topográficos se emplean comúnmente en las instalaciones de líneas de ensamble industrial y otros dispositivos de fabricación, para el armado y montaje de equipo y maquinaria de gran tamaño, para determinar el control de la aerofotogrametría, y en muchas actividades relacionadas con la agronomía la arqueología, la geografía, la geodesia, la arquitectura del paisaje, la meteorología, pero sobre todo en la ingeniería civil, etcétera.

2.2 DIVISIONES DE LA TOPOGRAFÍA

Para su estudio la topografía se divide en tres partes:

- TOPOLOGÍA que estudia las leyes que rigen las formas del terreno.
- TOPOMETRÍA que establece los métodos geométricos de medida.



- PLANOGRAFÍA que es la representación gráfica de los resultados y constituye el dibujo topográfico.

Para que sea completa la representación gráfica de una porción de la superficie terrestre deberá contener:

- ✓ La forma general del terreno, o sea, su contorno o perímetro y los detalles interiores (construcciones, caminos, puentes, ríos, etc.).
- ✓ La diferencia de altura que guardan los puntos del terreno, unos respecto a otros; y
- ✓ La superficie del terreno.

Según las operaciones que se ejecutan para representar el terreno, se divide la topografía en: *planimetría* y *altimetría*.

2.2.1 PLANIMETRÍA

Se refiere a la posición de puntos y su proyección sobre un plano horizontal. Llamamos planimetría a la parte del trabajo topográfico que consiste en determinar la situación de los puntos del terreno en el plano XY.

La planimetría estudia los puntos de la superficie terrestre para proyectarlos sobre un plano horizontal, llamado plano de referencia. Para representar un punto en un plano, es decir, en un espacio bidimensional, es necesario establecer un sistema de referencias que nos sitúe los puntos medidos respecto a un origen común.

2.2.2 ALTIMETRÍA

La altimetría considera las diferencias de nivel existentes entre puntos de un terreno o una construcción. Para poder conocer estas diferencias de nivel hay que medir distancias verticales, directa o indirectamente, operación que se denomina *nivelación*.



Todas las alturas de un trabajo de topografía, están referidas a un plano común de referencia. Este plano llamado de comparación es una superficie plana imaginaria, cuyos puntos se asumen con una elevación o altura de cero.

Se denomina *cota*, *elevación* o *altura* de un punto determinado de la superficie terrestre a la distancia vertical que existe desde el plano de comparación a dicho punto.

Comúnmente se usa como plano de comparación el del nivel medio del mar, que se establece por medio de un gran número de observaciones en un aparato llamado mareógrafo a través de un largo período de años. En los trabajos topográficos, dada su limitada extensión superficial, el plano de comparación no es necesariamente el nivel medio del mar, sino que el operador lo elige a su arbitrio, procurando que todas las cotas resulten positivas para comodidad del cálculo.

2.3 LEVANTAMIENTOS

Son el conjunto de operaciones necesarias para determinar posiciones sobre la superficie de la Tierra, de las características naturales y/o artificiales de una zona determinada y establecer la configuración del terreno. El procedimiento a seguir en los levantamientos topográficos comprende dos etapas fundamentales: El trabajo de campo, que es la recopilación de los datos. Esta recopilación fundamentalmente consiste en medir ángulos horizontales y/o verticales y distancias horizontales o verticales.

El trabajo de gabinete o de oficina, que consiste en el cálculo de las posiciones de los puntos medidos y el dibujo de los mismos sobre un plano. La mayor parte de los levantamientos, tienen como objeto el cálculo de superficies y volúmenes, y la representación de las medidas tomadas en el campo mediante perfiles y



planos, por lo cual estos trabajos también se consideran dentro de la topografía, donde reciben el nombre de topometría.

La topografía es una de las artes más antiguas e importantes porque, como se ha observado, desde los tiempos más remotos ha sido necesario marcar límites y dividir terrenos. En la era moderna, la topografía se ha vuelto indispensable. Los resultados de los levantamientos topográficos de nuestros días se emplean para elaborar mapas de la superficie terrestre, arriba y abajo del nivel mar; trazar cartas de navegación aérea, terrestre y marítima; deslindar propiedades privadas y públicas; crear bancos de datos con información sobre recursos naturales y utilización de la tierra, para ayudar a la mejor administración y aprovechamiento de nuestro ambiente físico; evaluar datos sobre tamaño, forma, gravedad y campo magnético de la Tierra; y preparar mapas de la Luna y los planetas. Es difícil imaginar un proyecto de ingeniería por sencillo que esta sea, en el que no se tenga que recurrir a la topografía en todas y cada una de sus fases.

2.3.1 TIPOS DE LEVANTAMIENTO

Existen diversos tipos de levantamientos especializados. Aquellas personas que busquen hacer carrera en topografía y cartografía, deberían conocer todas las fases de esta materia, ya que están íntimamente relacionadas con la práctica moderna. Continuación se describen brevemente algunas clasificaciones importantes:

- ✓ **Levantamiento de control:** Red de señalamientos horizontales y verticales que sirven como marco de referencia para otros levantamientos
- ✓ **Levantamientos topográficos:** Determinan la ubicación de características o accidentes naturales y artificiales, así como las elevaciones usada en la elaboración de mapas.



- ✓ **Levantamientos catastrales de terreno y de linderos:** Normalmente se trata de levantamientos cerrados y ejecutados con el objetivo de fijar límites de propiedad y vértices.
- ✓ **Levantamiento hidrográfico:** Definen la línea de playa y las profundidades de lagos, corrientes, océanos, represas y otros cuerpos de agua. Los levantamientos hidrográficos junto con la ingeniería civil, cubren los levantamientos para proyectos de bahía, puertos, lagos o ríos y en la actualidad puede involucrar los levantamientos de construcción de plataformas marinas asociadas con líneas de conducción.
- ✓ **Levantamiento de rutas:** Se efectúan para planear, diseñar y construir carreteras, ferrocarriles, líneas de tuberías y proyectos lineales. Estos normalmente comienzan en un punto de control y pasan progresivamente a otro, de la manera más directa posible permitida por las consideraciones del terreno.
- ✓ **Levantamientos de construcción:** Determinan la línea, la pendiente, las elevaciones de control, las posiciones horizontales, las dimensiones y las configuraciones para operaciones de construcción. También proporcionan datos elementales para calcular los pagos a los contratistas.
- ✓ **Levantamientos finales según obra construida:** Documentan la ubicación final exacta y disposición de los trabajos de ingeniería, y registran todos los cambios de diseño que se hayan incorporado a la construcción. Estos levantamientos son sumamente importantes cuando se construyen obras subterráneas de servicios, cuyas localizaciones precisas se deben conocer para evitar daños inesperados al llevar a cabo, posteriormente, otras obras.
- ✓ **Levantamientos industriales:** Son procedimientos para la ubicación de maquinarias industriales, son levantamientos de mucha precisión con errores muy pequeños.



- ✓ **Levantamientos terrestre, aéreos y por satélites:** Son los que integran mediciones electrónicas, fotogrametría terrestre y aérea, y los sistemas de posicionamiento Global.

Es la más amplia clasificación usada en algunas ocasiones. Los levantamientos terrestres utilizan medidas realizadas con equipo terrestre, como cintas de medición, instrumentos electrónicos para la medición de distancias (IEME), niveles y teodolitos e instrumentos de medición total, los levantamientos aéreos pueden lograrse, ya sea utilizando la fotogrametría o a través de detección remota. La fotogrametría usa cámaras que se montan en los aviones, en tanto que el sistema de detección remota emplea cámaras y otros tipos de sensores que pueden que pueden transportarse tanto en avión como en satélites. Los levantamientos aéreos se han usado en todos en todos los tipos de topografía especializada que se enumeran aquí, a excepción de sistema de línea óptica, y en área se usan con frecuencia fotografías terrestres (con base en el terreno). Los levantamientos por satélites incluyen la determinación de sitios en el terreno usando receptores GPS, o de imágenes por satélite para el mapeo y observación de grandes regiones de la superficie de la tierra.

2.3.2 PRODUCTOS GENERADOS POR LOS LEVANTAMIENTOS

Los productos finales de la topografía son, en su gran mayoría, de carácter gráfico, es decir, dibujos a escala de los detalles resaltantes del levantamiento, sobre un determinado tipo de papel, o bien dibujos realizados mediante un programa adecuado, generalmente un CADD (de las siglas en inglés Computer-Aided Design and Drafting). A continuación se definen tres de los productos gráficos más importantes.

- El Mapa.
- Mapas base o mapas topográficos.



- Planos topográficos.

2.3.2.1 EL MAPA

El mapa es una representación convencional, generalmente plana, de fenómenos concretos o abstractos localizables en el espacio, que se efectúa mediante diversos sistemas de proyección, los cuales son sistemas convencionales para realizar la transposición sobre una superficie plana de una parte del globo terrestre (elipsoide) y de su topografía (relieve), y según diferentes escalas, las cuales son la relación de reducción del elipsoide sobre la superficie plana. Por su naturaleza, son producto de levantamientos geodésicos.

Los mapas constituyen la parte principal de los sistemas modernos de información sobre la tierra (LIS) y de los sistemas de información geográfica (GIS). Esta tecnología para el análisis y el control de datos espaciales usa la computadora para almacenar, recuperar, manipular, unir, analizar y exhibir la información mediante mapas digitales, los LIS y GIS tiene aplicación en casi todo campo de la actividad humana. Generalmente las bases de datos espaciales de apoyo a estos sistemas se desarrollan digitalizando mapas gráficos existentes o introduciendo en la computadora levantamiento del terreno o bien directamente de datos fotogramétricos.

2.3.2.2 MAPAS BASE O MAPAS TOPOGRÁFICOS

Tienen la finalidad de representar los elementos del terreno necesarios para la referenciación (X, Y, Z). Estos son documentos cartográficos de base, donde se representan, según normas y convenciones: las vías de comunicación y sus respectivas variaciones e importancia, las construcciones, la red hidrográfica, la naturaleza del relieve (curvas de nivel), los nombres de los lugares, ríos y centros poblados (toponimia), así como todos los elementos del terreno que tengan interés en ser representados. En ellos también se realiza la reducción del



elipsoide sobre una superficie plana. Generalmente son realizados mediante fotogrametría aérea.

2.3.2.3 PLANOS TOPOGRÁFICOS

Se da el nombre de plano a la representación gráfica que por la escasa extensión de superficie a que se refiere no exige hacer uso de los sistemas cartográficos, se apoyen o no los trabajos en la geodesia.

2.4 CIENCIAS Y TÉRMINOS RELACIONADOS CON LA TOPOGRAFÍA

2.4.1 AGRIMENSURA

Parte de la topografía que se ocupa de la determinación de las superficies agrarias (planimetría) y de los límites de los terrenos.

2.4.2 GEOFÍSICA

La geofísica es la ciencia que aplica los principios físicos al estudio de la Tierra.

Los geofísicos examinan los fenómenos naturales y sus relaciones en el interior terrestre. Entre ellos se encuentran el campo magnético terrestre, los flujos de calor, la propagación de ondas sísmicas y la fuerza de la gravedad.

La geofísica, tomada en un sentido amplio, estudia también los fenómenos extraterrestres que influyen sobre la Tierra, a veces de forma sutil, y las manifestaciones de la radiación cósmica y del viento solar.

2.4.3 GEODESIA

Ciencia que tiene por objeto el estudio y la determinación de la forma, dimensiones y campo de la gravedad de la Tierra y de los cuerpos celestes cercanos a ella. Previamente a la realización del mapa topográfico de un país son



necesarios los trabajos de geodesia. Permite obtener datos para fijar con exactitud los puntos de control de la triangulación y la nivelación.

Es el tipo de topografía que tiene presente la verdadera forma del planeta se denomina geodesia, los levantamientos que emplean los principios de la geodesia son de alta precisión y por lo general cubren grandes extensiones. Cuando el área incluida no es muy grande, como puede ser el caso de un estado, la precisión puede obtenerse si se supone que la tierra es una esfera perfecta. En caso que el área sea muy grande, como puede ser muy grande, como puede ser un país, se debe considerar la verdadera forma esferoidal de la tierra.

La información de diferentes levantamientos geodésicos es de gran importancia, ya que permite determinar puntos de referencias precisos a los cuales se ligan a levantamientos de menor precisión.

Esta ciencia tiene finalidades muy similares a la topografía; pero en la geodesia se tiene en cuenta la curvatura terrestre (la forma geométrica a la cual se asemeja la forma de la tierra es una elipse en revolución girando sobre su semieje menor “elipsoide”), por lo anterior el grado de precisión de la geodesia es mayor que el de topografía.

2.4.4 CARTOGRAFÍA

Ciencia que tiene por objeto la realización de mapas, y comprende el conjunto de estudios y técnicas que intervienen en su establecimiento.

La cartografía es el único procedimiento gráfico que permite una representación del espacio geográfico mediante la escala y los sistemas de proyección. Los resultados se representan en Mapas y Planos en función de la escala a la que se representen, siendo los mapas una interpretación gráfica simplificada de la realidad. ya se ha indicado que los formatos en los que se puede procesar la información son diversos, desde formato vectorial (puntos, líneas o polígonos),



formato ráster u ortoimágenes, todos en ellos en dos dimensiones. Pero también se puede visualizar la información en una tercera dimensión, mediante la creación de modelos 3D. Toda representación gráfica debe ir acompañada de escala, sistemas de coordenadas y leyenda de los elementos que aparecen en el área cartografiada.

2.5 LA TIERRA EN SU VERDADERA FORMA

Como la tierra es una figura amorfa (geoméricamente) el hombre la ha asemejado a diferentes figuras geométricas para su estudio. En la antigüedad se creía que la tierra era una esfera, debido a que podía representarse fácilmente, siendo esta forma la que en el espacio a gran distancia se observa; pero con base en mediciones posteriores, se ha establecido, que la tierra tiene una forma aproximada a una esfera achatada o elipsoide, cuya la longitud del eje polar es ligeramente menor que la del eje ecuatorial (43 Km. aproximadamente).

Estudios más recientes han demostrado que en realidad la figura exacta de la tierra, se asemeja a un elipsoide de revolución llamado *geoide* (superficie compleja formada por el nivel de los mares supuestos prolongados por debajo de los continentes). A finales de la década de los 80 se ha postulado la teoría de que la tierra más bien se parece a un cardioide, entendiéndose como un cuerpo que posee más masa hacia el norte que hacia el sur.

La geodesia matemática estudia la figura de la tierra mediante la determinación de coordenadas de puntos situados sobre la superficie terrestre, bajo un sistema de referencia fijo y validado para toda la tierra.

Cuando se realizan cálculos de posición, distancias, etc. sobre puntos de la tierra, se requiere que esos cálculos matemáticos se efectúen sobre una superficie que responda a unas leyes matemáticas.



El geoide no cumple con este requisito, con lo que se adopta una superficie matemática arbitraria que se adapte lo más posible a la forma del geoide.

El Elipsoide es el cuerpo geométrico más simple que se ajusta a la forma real de la tierra y sobre él sí se pueden efectuar cálculos angulares, de posición y de distancia. Un elipsoide de revolución es un elipsoide al que se le hace girar sobre su eje menor y generar un cuerpo con superficie.

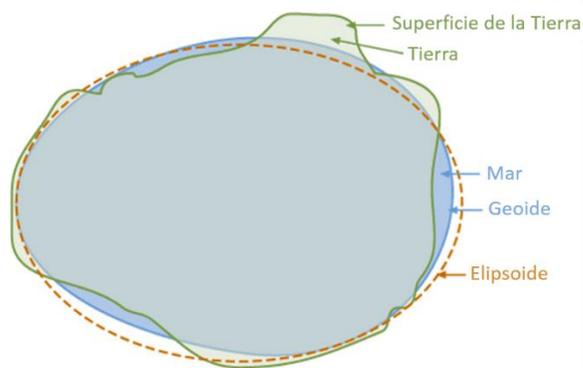


Figura 1. Ajuste del geoide a la superficie de la tierra.

Se pueden distinguir dos tipos de elipsoides en geodesia:

- **Elipsoides Globales:** Son aquellos que se aproximan a la forma de toda la tierra. Se fuerzan para que coincidan con los ejes de inercia de la Tierra. También se denominan elipsoides geocéntricos.
- **Elipsoides Locales:** Se ajustan a una zona concreta de la tierra. Se utilizan sólo en esa porción de superficie terrestre.

Los parámetros de un elipsoide de revolución global serían los mostrados en la figura 2 y se definen de la siguiente manera:

- ✓ **a:** Semieje mayor (Ecuatorial): es la longitud desde el centro de masas de la tierra hasta la superficie terrestre medida por el ecuador
- ✓ **b:** Semieje menor (Polar): es la longitud desde el centro de masas de la tierra hasta uno de los polos.



- ✓ **f**: Factor de aplanamiento: es la relación que existe entre la magnitud del eje mayor y el menor:

$$f = 1 - \frac{b}{a}$$

Ec 1. Factor de aplanamiento

Como este valor suele ser demasiado pequeño, se suele dar el valor inverso:

$$a = \frac{1}{f}$$

Ec 2. Inversa del factor de aplanamiento

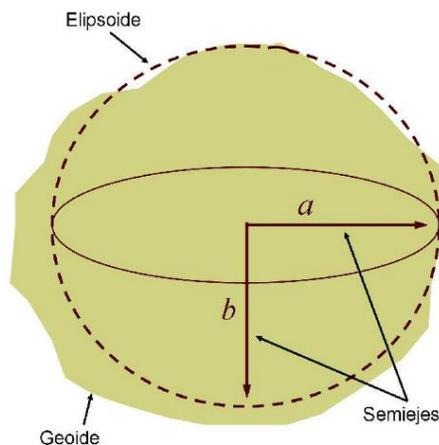


Figura 2. Parámetros de un elipsoide.

Algunos de los elipsoides utilizados tanto en la antigüedad como en la actualidad son los que se muestran a continuación:

Tabla 1. Elipsoides más comunes.

Nombre	a (m)	b (m)	1/f
AustralianNational	6378160.000	6356774.719	298.250000
Bessel 1841	6377397.155	6356078.963	299.152813
Clarke 1866	6378206.400	6356583.800	294.978698
Clarke 1880	6378249.145	6356514.870	293.465000
Everest 1956	6377301.243	6356100.228	300.801700
Fischer 1968	6378150.000	6356768.337	298.300000



GRS 1980	6378137.000	6356752.314	298.257222
International 1924 (Hayford)	6378388.000	6356911.946	297.000000
SGS 85	6378136.000	6356751.302	298.257000
South American 1969	6378160.000	6356774.719	298.250000
WGS 72	6378135.000	6356750.520	298.260000
WGS 84	6378137.000	6356752.314	298.257224

Convendría subrayar que algunos de ellos pertenecen al grupo de los denominados elipsoides locales y otros al grupo de los globales y se han definido para su utilización en zonas concretas de la Tierra.

WGS 84, es el elipsoide global que utiliza el sistema WGS84. Es el elipsoide con el que trabajan los sistemas GPS. Este elipsoide se utiliza a nivel global sobre toda la superficie de la tierra. Este sistema es utilizado actualmente en El Salvador para la elaboración para la elaboración de cartografía básica.

2.6 SISTEMAS DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

El sistema de coordenadas geográficas se desarrolló a partir de conceptos originados por los filósofos griegos antes de la Era Cristiana. Este es el primer sistema utilizado para estimaciones básicas de la situación, tales como la navegación y la prospección. El sistema es fundamentalmente del tipo de coordenadas esféricas, no siendo los meridianos y paralelos rectos ni estando regularmente espaciados. Es útil para cartografiar grandes áreas y la medir distancias y direcciones en unidades angulares de grados, minutos y segundos. Un sistema rectangular de coordenadas, que es mucho más simple de construir y utilizar, se puede superponer al sistema de coordenadas geográficas.

El sistema de coordenadas geográficas utiliza las dos coordenadas angulares, latitud (Norte y Sur) y longitud (Este y Oeste) y sirve para determinar los laterales de la superficie terrestre (o en general de un círculo o un esferoide).

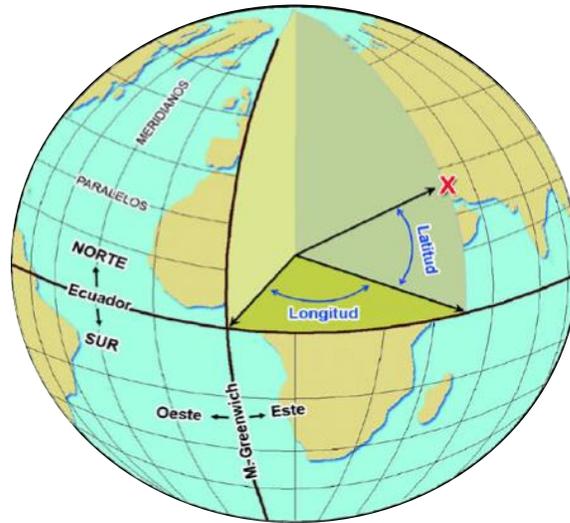


Figura 3. Forma de medir coordenadas geográficas.

2.7 PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

La proyección cartográfica o proyección geográfica es un sistema de representación gráfico que establece una relación ordenada entre los puntos de la superficie curva de la Tierra y los de una superficie plana (mapa). Estos puntos se localizan auxiliándose en una red de meridianos y paralelos, en forma de malla. La única forma de evitar las distorsiones de esta proyección sería usando un mapa esférico.

En un sistema de coordenadas proyectadas, los puntos se identifican por las coordenadas cartesianas (x e y) en una malla cuyo origen depende de los casos. Este tipo de coordenadas se obtienen matemáticamente a partir de las coordenadas geográficas (longitud y latitud), que no son proyectadas.

La proyección cartográfica se traza con base en figuras geométricas como el cono o el cilindro y su objetivo es mostrar la forma y las dimensiones aproximadas de los componentes de nuestro planeta y evitar al máximo su deformación. Los principales tipos de proyecciones son:



- **Proyección cónica.** Se obtiene al proyectar la superficie terrestre sobre un cono imaginario. La representación será exacta cerca de donde ambas figuras se tocan, pero tendrá deformaciones en los puntos más alejados, ensanchando la imagen representada en la base del cono y comprimiéndola en la punta del mismo.

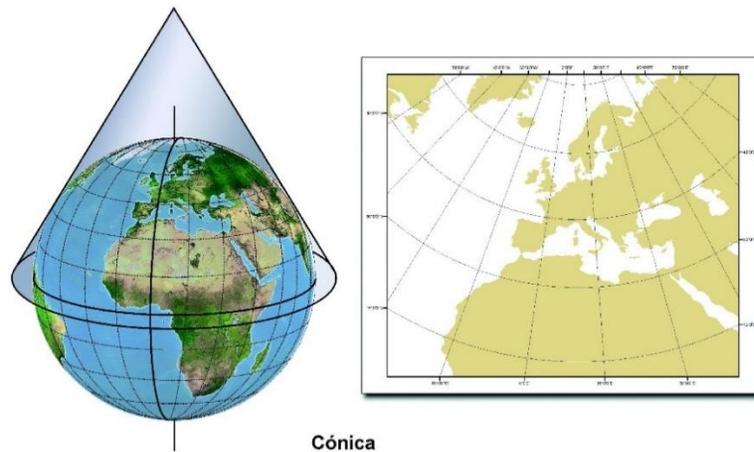


Figura 4. Proyección cónica de la tierra.

- **Proyección acimutal o plana.** Resulta de proyectar la superficie del planeta en una hoja de papel que hace contacto en un solo punto. Se logra una buena aproximación, pero con la desventaja de que se representa sólo una mitad del globo terrestre.

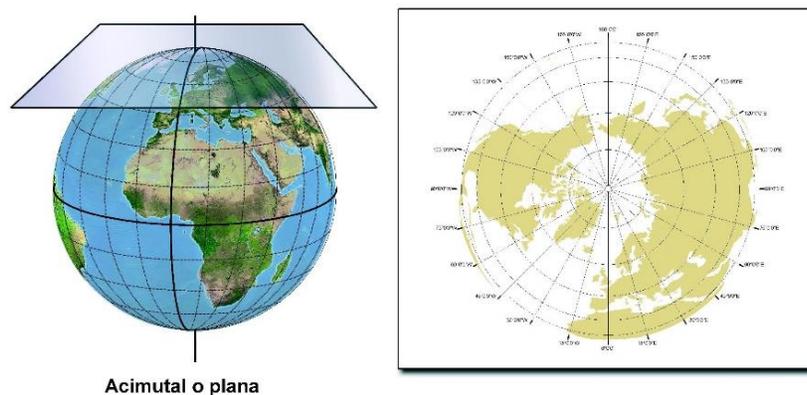


Figura 5. Proyección acimutal de la tierra.



- **Proyección cilíndrica.** Supone que la Tierra está dentro de un cilindro y sobre éste se proyecta la forma de la superficie terrestre; los territorios cercanos al ecuador mantienen sus proporciones, pero al aproximarse a los polos la imagen proyectada se distorsiona de manera considerable.

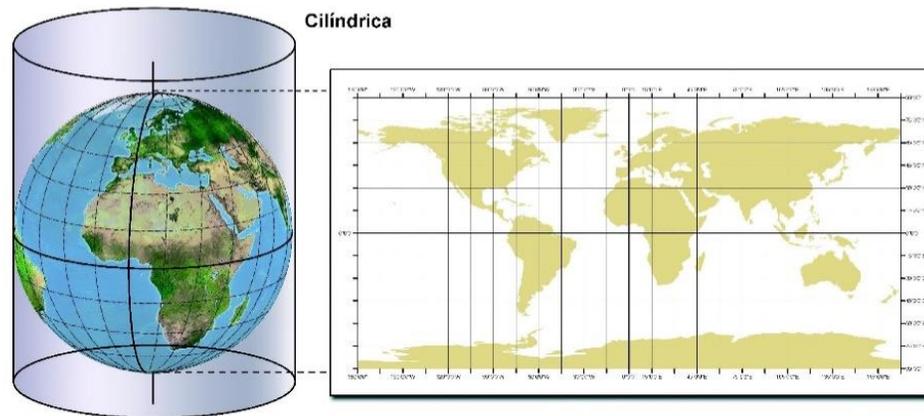


Figura 6. Proyección cilíndrica de la tierra.

Los sistemas de coordenadas proyectadas o proyecciones cartográficas utilizadas en El Salvador son:

- ✓ Proyección Universal Transversa de Mercator.
- ✓ Proyección Cónica Conforme de Lambert.

2.7.1 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (en inglés Universal Transverse Mercator, UTM) es un sistema desarrollado por el geógrafo flamenco Gerardus Mercator en 1659 que está dentro de las llamadas proyecciones cilíndricas, por emplear un cilindro situado en una determinada posición espacial de coordenadas, está basado en la proyección geográfica transversa de Mercator, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano. A diferencia del sistema de coordenadas tradicional, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan



en metros únicamente al nivel del mar que es la base de la proyección del elipsoide de referencia. Esta proyección es "conforme", es decir, que conserva los ángulos y casi no distorsiona las formas pero inevitablemente sí lo hace con distancias y áreas.

La utilidad que tiene esta proyección, por su conformidad como aplicación a problemas geodésicos, la hace recomendable para la representación de casi todos los países, exceptuándose aquellas zonas situadas a $\pm 80^\circ$ de latitud, en las que se utilizará la proyección estereográfica.

El sistema de proyección UTM tiene las siguientes ventajas frente a otros sistemas de proyección:

- ✓ Conserva los ángulos.
- ✓ No distorsiona las superficies en grandes magnitudes (por debajo de los 80° de latitud).
- ✓ Un punto queda fácilmente localizable.
- ✓ Es de empleo universal.

Las cartas topográficas actuales se basan en la proyección U.T.M., el cilindro al ser tangente a un meridiano, puede girar alrededor del eje de la Tierra, teniendo así infinitas posiciones según sea el meridiano de tangencia. De ahí su nombre de transversa, puesto que el cilindro se coloca transversalmente al eje terrestre.

El meridiano de tangencia se denomina Meridiano Cero u Origen y las zonas situadas hasta tres grados de él se pueden considerar con una distorsión mínima en la representación. De ahí que se haya dividido la Tierra en franjas de un ancho de 6° de longitud, o sea, tres grados a cada lado del meridiano central, obteniéndose un total de 60 franjas que se denominan Husos.

Estos husos se numeran hacia el Este, consecutivamente del 1 al 60, partiendo del meridiano 180° . A nuestro país, en el área continental americana, le corresponde el huso 16, cuyo meridiano central es el $87W$.



Los husos determinados están limitados entre los 84° de latitud Norte y los 80° de latitud Sur, debido a que las deformaciones son más acentuadas hacia los polos. Esto se debe a que los meridianos se van juntando, siendo la parte más ancha en el Ecuador (6°). Las regiones comprendidas entre los 84° y los 80° de latitud y los polos, se representan por medio de proyecciones estereográficas polares. Entre ambas proyecciones se establece una zona de traslape o recubrimiento de 30 minutos de latitud.

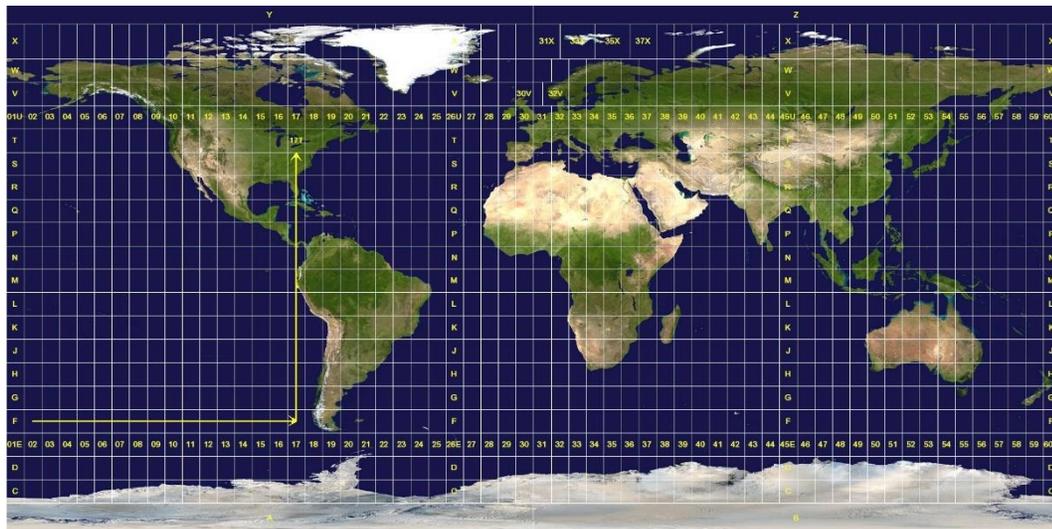


Figura 7. Cuadrícula UTM.

La ubicación de cualquier punto o área dentro de un huso, está dada por las coordenadas rectangulares.

Además de dividir la superficie del globo en husos, se subdivide en zonas, constituidas por la superficie comprendida entre 2 paralelos sucesivos que tienen una diferencia de latitud de 8° a partir del ecuador llegando hasta 80° de latitud Norte y 80° de latitud Sur, las cuales se individualizan por letras, desde "C" hasta "X" (siendo excluidas las letras "I" y "O" por su parecido con los números 1 y 0), correspondiendo la letra "C" a la faja de 80° a 72° de latitud Sur y la letra "X" a la faja de 72° - 80° de latitud Norte.



Cada cuadrícula UTM se define mediante el número del Huso y la letra de la Zona, sabiendo que si una zona tiene una letra igual o mayor que la N, la zona está en el hemisferio norte, mientras que está en el sur si su letra es menor que la "N". El Salvador se encuentra en la cuadrícula 16P.

2.7.2 PROYECCIÓN CÓNICA CONFORME DE LAMBERT

Esta proyección fue presentada por Johann Heinrich Lambert en 1772 en la misma publicación en la que presentó la proyección Transversa de Mercator, como otra alternativa en la búsqueda de la conformalidad.

Las características más importantes de esta proyección son las siguientes:

- ✓ El factor de escala es constante en los paralelos base, decreciendo en el área que está comprendida entre éstos y aumentando al alejarse de ellos.
- ✓ Los paralelos son círculos concéntricos, espaciados de manera tal que la distancia entre éstos es menor al centro del mapa.
- ✓ Los meridianos son radios de los círculos anteriores, y cortan a los paralelos en ángulo recto.
- ✓ Es una proyección cónica secante normal.
- ✓ Por sus características, su uso es adecuado para la representación de áreas que se extienden de Este a Oeste con poca variación en latitud.

La proyección conformal cónica de Lambert es desarrollada a partir de un cono cuya forma está determinada por los dos paralelos estándares. Los paralelos estándares son escogidos de tal forma que dos terceras partes del ámbito norte-sur de la proyección se encuentran entre ellos, un sexto se encuentra al norte del paralelo estándar superior y un sexto al sur del paralelo estándar inferior. Sólo una zona de la proyección puede incluirse en un cono particular. En esta proyección los meridianos son líneas rectas y los paralelos de latitud son arcos concéntricos. La proyección puede extenderse en el sentido este-oeste pero no



en la dirección norte-sur sin incurrir en fuertes errores. La distorsión de escala depende solamente de la latitud. Esto hace que la proyección cónica de LAMBERT sea apropiada para áreas que se extienden en dirección este-oeste. Las coordenadas x,y son medidas en metros. El falso norte y el falso este representan coordenadas X y Y , respectivamente, en un sistema de coordenadas planas.



Figura 8. Proyección cónica conforme de Lambert.

Los siguientes son los valores correspondientes a la proyección Lambert en El Salvador:

- **Zona geográfica:** 300 km (Este-Oeste), 100 km (Norte-Sur)
- **Coordenadas geográficas del origen de la proyección:** $\lambda_o = 89^{\circ}00' W$ (meridiano de origen), $\varphi_o = 13^{\circ}47' N$ (latitud de origen)
- **Coordenadas rectangulares del origen de la proyección:** $X_o = 500\,000.000$ m (falso Este), $Y_o = 295\,809.184$ m (falso Norte)
- **Factor de escala:** $k_o = 0.99996704$
- **Paralelos estándar o normales:** $13^{\circ}19' N - 14^{\circ}15' N$

CAPÍTULO 3.



*INTRODUCCIÓN A LA
FOTOGRAMETRÍA Y
UAVs*



3.1 DEFINICIÓN DE FOTOGRAMETRÍA

Es una técnica de medición indirecta que permite obtener las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales mediante el procesamiento de imágenes fotográficas.

El tipo de procesamiento dependerá del origen de las fotografías, es decir del tipo de cámara empleada (puede ser digital o analógica lo que a su vez implica otras consideraciones).

Es entonces la fotogrametría: El conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo.

Esta técnica se basa en los principios de la geometría proyectiva y la visión estereoscópica.

3.1.1 LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

El levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía. Pese a que la fotogrametría no es una ciencia nueva (sus inicios se estiman a mediados del siglo XIX) sus aplicaciones en topografía son mucho más recientes.

Si se trabaja con una foto se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos fotos, en la zona común a estas (zona de solape), se podrá tener visión estereoscópica, o dicho de otro modo, información tridimensional. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.



3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA

Frecuentemente se divide en dos especialidades de acuerdo con el tipo de fotografía utilizada (Herrera, 1987) y estas son:

- Fotogrametría terrestre.
- Fotogrametría aérea.

3.1.2.1 FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE

Tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología y se basa en el principio de la toma de fotografías desde la tierra, la fotografía es usada en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica resulta horizontal y paralelo al terreno o corteza terrestre; donde la posición de la cámara y el objeto es perfectamente conocida.

3.1.2.2 FOTOGRAMETRÍA AÉREA

Es la que utiliza fotografías aéreas obtenidas desde una cámara de toma de vistas, ubicada en una plataforma especial (vehículo aéreo). Donde el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.

También dependiendo del método empleado, se pueden distinguir tres tipos diferentes de fotogrametría:

- Fotogrametría Analógica.
- Fotogrametría Analítica.
- Fotogrametría Digital.

3.1.2.3 FOTOGRAMETRÍA ANALÓGICA

Se basa en la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realiza la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado. Por otro lado la confección de



mapas, con información planialtimétrica, se realiza con el principio de la marca flotante o graficadoras basadas en este principio.

3.1.2.4 FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA

Con la utilización de los restituidores analógicos y la incorporación de las computadoras se da inicio a la fotogrametría analítica. Se crea al restituidor analítico agilizando los tiempos y logrando niveles de detalle a diferentes escalas. Se posibilita el vuelco de la información a programas de tipo CAD.

Esto únicamente supuso una evolución en el modo de trabajar apoyada por la aparición de los sistemas informáticos, obteniendo mejores precisiones y mayor rendimiento al sustituir la analogía mecánica por los cálculos matemáticos.

3.1.2.5 FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

Finalmente el avance tecnológico hizo posible llegar a la fotogrametría digital. El uso de las computadoras y los programas aplicados dan origen a los modelos digitales del terreno 3D.

Las imágenes digitales son ingresadas a la computadora y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien la computadora realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato raster o vectorial. Esta salida (digital) puede ser utilizada como información de base para la generación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Tabla 2. Fotogrametría según su tratamiento.

Tipo de Fotogrametría	Entrada	Procesamiento	Salida
Analógica	Película Fotográfica	Analógico (óptico-mecánico)	Analógica
Analítica	Película Fotográfica	Analítico (Computadora)	Analógica



Digital	Imagen digital	Analítico (Computadora)	Digital
---------	----------------	----------------------------	---------

3.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA FOTOGRAMETRÍA

Según Konecny (1981/5) la fotogrametría se desarrolla y evoluciona en cuatro etapas:

- a) Metrofotografía (1850 hasta 1900): Se inicia con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue ideado por el coronel francés Laussedat (hacia 1851), a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.
- b) Fotogrametría analógica (1900 a 1960): ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.
- c) Fotogrametría analítica (1960 hasta 1980): ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.
- d) Fotogrametría digital (1980 hasta nuestros días): ciclo iniciado a partir del lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik de origen ruso lanzado el 4 de septiembre de 1957 y por el uso del satélite Landsat, de origen estadounidense, que actualmente (el Landsat 8) está equipado con instrumentos de teledetección multiespectral que registra un total de 11 bandas espectrales.

3.2.1 LA FOTOGRAMETRÍA EN EL SALVADOR

En El Salvador, si bien es cierto que la aerofotogrametría fue utilizada por primera vez durante el levantamiento de la zona fronteriza con la vecina república de Guatemala, no fue sino hasta 1946 que el Gobierno de la República decidió utilizar este método en la ejecución del mapa general del país.



Reconociendo la necesidad, cada día mayor, de disponer de un mapa exacto para usarlo en el planeamiento del desarrollo integral del país y las innegables ventajas que en cuanto a rapidez, exactitud y economía ofrecen los modernos procedimientos fotogramétricos, se fundó en ese mismo año la entonces llamada Oficina del Mapa, a la que se encomendaron los trabajos necesarios.

A través de la creación de la oficina del Servicio Geodésico Interamericano (Inter American Geodetic Survey), el Gobierno de los Estados Unidos de Norte América prestó su colaboración en forma de asesoramiento técnico.

Para la realización del control geodésico básico, se proyectó y ejecutó un arco central de triangulación de primer orden que ligara a El Salvador con los países circunvecinos de Guatemala, Honduras y Nicaragua. Se utilizaron para ello los puntos ya existentes en el arco fronterizo con Guatemala. Simultáneamente se medía una base geodésica cerca de la ciudad de San Miguel, con una longitud de 10,933.43 m y un error probable de uno en dos millones y medio, y se hacía observaciones astronómicas de las estaciones Laplace establecidas en el Observatorio Nacional de San Salvador y en la actualidad de La Unión.

Para hacer el ajuste del arco central antes mencionado, se utilizaron los ajustes de la red de triangulación entre las bases de El Porvenir en El Salvador y Ocotepeque en Honduras. Esta última estación se adoptó como datum temporal, mientras se hacía el ajuste final con el datum norteamericano de Meadea Ranch de 1927. Más tarde se agregó una red de primer orden para cubrir la zona costera y una pequeña red sobre la ciudad de San Salvador.

Simultáneamente se proyectaron y corrieron líneas de nivelación de primer orden que fueron enlazadas en cinco puntos diferentes con las Repúblicas de Guatemala y Honduras. Estas líneas de nivelación, corridas sobre las principales carreteras del país, alcanzaban en 1,955 una extensión de 3,000 km en los que se establecieron 1,035 bancos de marca permanentes. Se instalaron 3



estaciones mareográficas, una permanente y dos con carácter personal. La primera establecida en el Puerto de Cutuco en el Departamento de La Unión.

Con fines de control fotogramétrico se cubrió gran parte del país con puntos de triangulación de segundo y tercer orden con un total de 650 puntos (aproximadamente un punto de triangulación por cada 25 kilómetros cuadrados).

En 1949 el Army Map Service efectuó el primer levantamiento fotográfico del país, cubriendo gran parte del territorio con casi dos mil fotografías aéreas verticales a una escala aproximada de 1:40,000. Tales fotografías se utilizaron, primeramente, para la elaboración de mosaicos sin control, que sirvieron para el planeamiento y desarrollo del control fotogramétrico necesario.

En 1952, disponiendo ya de personal debidamente preparado y de equipo fotogramétrico, se inició la restitución del mapa general, trazándose a escala de 1:20,000 con curvas de nivel a 10 metros de intervalo.

La fotogrametría prácticamente se introduce a El Salvador entre 1950 a 1955, junto con la adquisición de instrumentos (Figura 9) con finalidad cartográfica y catastral de nuestro territorio nacional.



Figura 9. Vista general del Departamento de Fotogrametría y sus aparatos análogos.

Fuente: Recuperado de <http://www.cnr.gob.sv/fotogrametria/> en agosto del 2016.

Por medios fotogramétricos analógicos se produjo la base de la cartográfica actual de nuestro país, en cuanto a catastro numérico se generó un 60% a 70% del país así también, se generó el catastro grafico (ortofotos análogas en los años



70 al 74) cubriendo la zona oriental del país. El área de fotogrametría fue siempre el área generadora de los datos básicos para el catastro y la fotogrametría.

A partir de 1996 se inició la adquisición de equipos fotogramétricos digitales para realizar el control de calidad de productos fotogramétricos dentro del proyecto de Modernización del Registro y del Catastro Nacional.

Iniciando con el proyecto piloto en la zona occidental a la fecha se han cubierto los departamentos: Sonsonate, Santa Ana, Ahuachapán, San Salvador, La Libertad, La Paz y San Vicente. Desde 1999 el área de fotogrametría pasa a ser parte del área Institucional del Instituto Geográfico, y actualmente se enfoca en las fases de producción y mantenimiento de los datos cartográficos básicos que se requieran a nivel de nación.

3.2.1.1 PRODUCTOS Y SERVICIOS

El Centro Nacional de Registro (en adelante CNR) del país brinda algunos productos y servicios con la información obtenida de estas tareas fotogramétricas, como son:

1. Fotografías Digitales en micrones y resolución de 1200 y 300 dpi en sistemas de Bases de datos del 90% del territorio nacional.

Estas son fotografías escaneadas a 21 y 14 micrones en formato "TIF" de los departamentos de Sonsonate, Ahuachapán, Santa Ana, La Libertad, San Salvador y La Paz a una escala de vuelo 1:15,000 de los departamentos y 1:4,000 de todos los núcleos urbanos de cada municipio.

El CNR cuenta adicionalmente con fotografías Nacionales de las zonas afectadas por los terremotos de enero y febrero de 2001.

2. Consultas de fotografías áreas a través de la intranet. Por lo que todos los vuelos descritos en micrones y en resolución de 1200 y 300 dpi pueden ser consultados en esta plataforma.



Cuenta con una base de datos (Figura 10) que automatiza la búsqueda de fotografías aéreas, lo que garantiza un manejo más eficaz de la información y una atención más inmediata para la venta de servicios. La búsqueda se puede realizar por rollo, línea, año, zona, ubicación geográfica, coordenadas o en forma gráfica.

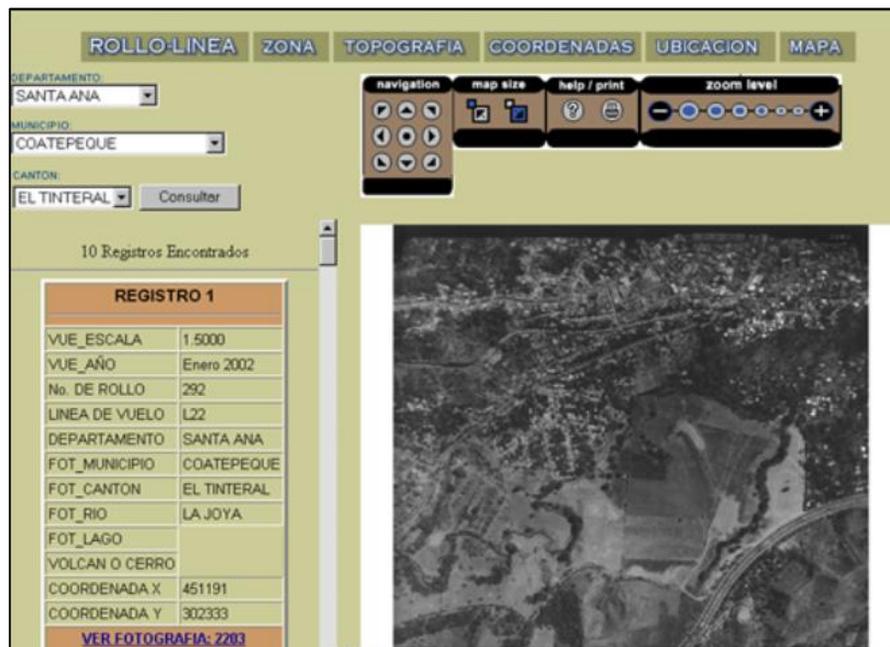


Figura 10. Sistema de búsqueda del CNR.

Fuente: Recuperado de <http://www.cnr.gob.sv/fotogrametria/> en agosto del 2016.

- Se pueden adquirir también ortofotografías y hojas alimétricas tanto en formatos digitales como impresos, así como cuadrantes topográficos:

Tabla 3. Productos Digitales Fotogramétricos.

Fuente: Recuperado de <http://www.cnr.gob.sv/productos-digitales-fotogrametricos/> en agosto de 2016. Fecha de Actualización: 30 noviembre, 2015.

Hojas Alimétricas de El Salvador (Copias Heliográficas)	Escala	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Ortofotografía 1 Km ² formato digital	1:5,000	26.55	3.45	30.00



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Ortofotografía 1/4 Km ² formato digital	1:5,000	6.64	0.86	7.50
Restitución 1 Km ² formato digital	1:1,000	223.01	28.99	252.00
Restitución 1 Km ² formato digital	1:5,000	190.27	24.73	215.00
Restitución 1/8 Km ² formato digital	1:1,000	28.32	3.68	32.00
Hojas Altimétricas de El Salvador escaneada y georreferenciada	–	56.64	7.36	64.00
Fotografías Aéreas de El Salvador				
	Escala	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Fotografía aérea formato digital	–	25.66	3.34	29.00

Tabla 4. Productos Impresos Fotogramétricos.

Fuente: Recuperado de <http://www.cnr.gob.sv/productos-impresos-fotogrametricos/> en agosto de 2016. Fecha de Actualización: 30 noviembre, 2015.

Hojas Altimétricas de El Salvador	Medidas (Mt)	Escala	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Hojas Altimétricas de El Salvador	–	1:1,000	38.05	4.95	43.00
Hojas Altimétricas de El Salvador	–	1:2,000	44.25	5.75	50.00
Hojas Altimétricas de El Salvador	–	1:5,000	50.44	6.56	57.00
Hojas Altimétricas de El Salvador	–	1:10,000	50.44	6.56	57.00
Hojas Altimétricas de El Salvador	–	1:20,000	25.66	3.34	29.00
Anexo Altimétricas de El Salvador, 1/4 de hoja	–	–	13.27	1.73	15.00
Anexo Altimétricas de El Salvador, 1/2 de hoja	–	–	25.66	3.34	29.00



Fotografías aéreas de El Salvador	Medidas (Mt)	Escala	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Fotografía aérea formato impreso	–	–	25.66	3.34	29.00
Productos Fotogramétricos					
Productos Fotogramétricos	Medidas (Mt)	Escala	Valor (\$)	IVA (\$)	Total (\$)
Ortofotografía 1 Km2, formato impreso	–	1:5,000	16.81	2.19	19.00
Ortofotografía 1/4 Km2, formato impreso	–	1:5,000	4.20	0.55	4.75
Restitución 1 km2, formato impreso	–	1:1,000	100.00	13.00	113.00
Restitución 1 km2, formato impreso	–	1:5,000	100.00	13.00	113.00
Restitución 1/8 km2, formato impreso	–	1:5,000	13.27	1.73	15.00

Tabla 5. Productos Digitales Cartográficos y Geográficos.
Fuente: <http://www.cnr.gob.sv/productos-digitales-cartograficos-y-geograficos/> en agosto de 2016. Fecha de Actualización: 30 noviembre, 2015.

Cuadrantes de El Salvador	Escala	Valor(\$)	IVA(\$)	Total(\$)
Cuadrantes Topográficos escaneados y georreferenciados	1:25,000	32.74	4.26	37.00
Cuadrantes Topográficos escaneados y georreferenciados	1:50,000	32.74	4.26	37.00

3.3 FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

El paso de la fotogrametría analítica a la digital supone un cambio radical en cuanto a la instrumentación, al proceso fotogramétrico y a los resultados; por lo



que se ha dicho que se trata de una revolución tecnológica. Es en esta revolución tecnológica que se fundamenta este estudio, brindando la oportunidad de poder extraer más información de “la misma materia prima”, es decir, de las fotografías aéreas.

Esta metodología se basa en una entrada en formato digital, un procesamiento casi completamente automatizado mediante el uso de un software especializado y una salida en formato enteramente digital. La segunda y tercera fase, se desarrollan siempre de la misma forma y es en la primera donde puede haber variaciones (Figura 11).

El objetivo fundamental de un sistema fotogramétrico, cualquiera que sea la metodología empleada para su construcción es la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes de los mismos, en el caso concreto de los Sistemas Fotogramétricos Digitales, a partir de imágenes en formato digital.

En la actualidad, para la adquisición de imágenes digitales fotogramétricas son empleados dos procedimientos básicos:

1. Digitalización de imágenes analógicas adquiridas con cámaras fotográficas convencionales.
2. Utilización de sensores digitales², o bien sensores analógicos dotados de un conversor analógico/digital.

En la figura se presenta de una forma esquemática el proceso fotogramétrico digital:

² A este segundo procedimiento se refiere la presente investigación.

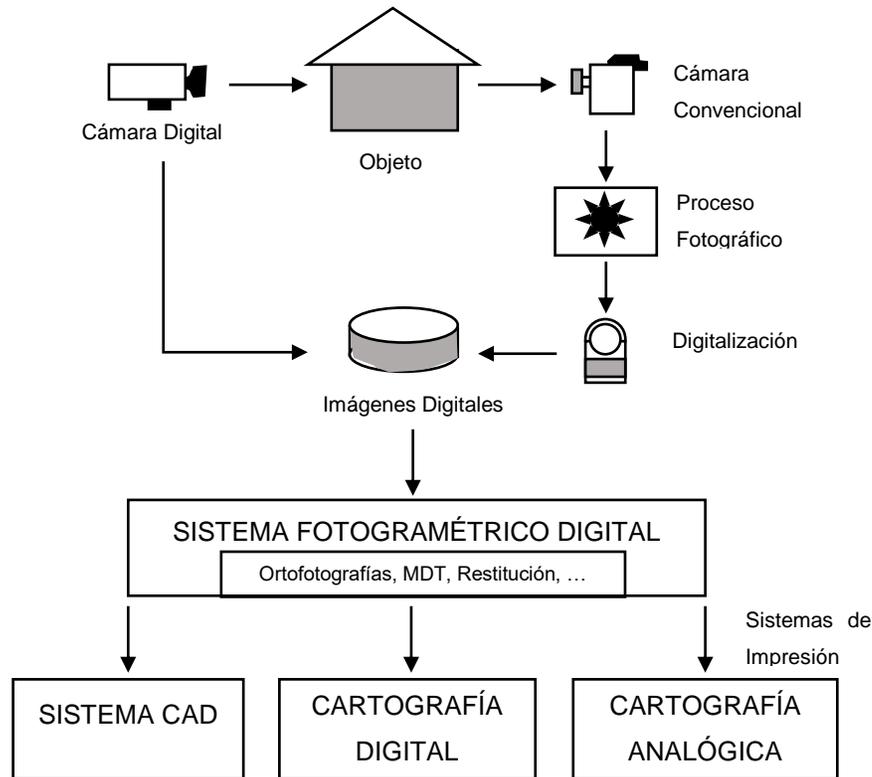


Figura 11. Proceso fotogramétrico digital.

Fuente: Documento “Apuntes de fotogrametría Básica” por Rodrigo Orellana

Un sistema fotogramétrico digital debe cumplir los siguientes requerimientos en cuanto a hardware:

- Un sistema de digitalización de imágenes analógicas.
- Posibilidad de entrada directa de datos en formato digital (p.ej., cámara digital) para la realización de aplicaciones fotogramétricas en tiempo real.
- Sistema de medida 3D de imágenes digitales de diferentes fuentes y geometrías.
- Manipulación y procesamiento de imágenes de gran tamaño en un tiempo razonable.
- Generación automática de modelos digitales de elevaciones con precisión a nivel de subpixel.



- Obtención de ortofotografías digitales en un tiempo de proceso aceptable.
- Visualización de las imágenes estereoscópicas en color real.
- Interfaz con SIG con sobre imposición monóscopica y estereoscópica de elementos gráficos y con funciones de edición para modificar dichos elementos.
- Impresoras de imágenes y trazadores gráficos para la impresión analógica de los resultados.

3.3.1 FOTOGRAFÍA DIGITAL

La fotografía digital consiste en la obtención imágenes mediante una cámara oscura, de forma similar a la Fotografía química. Sin embargo, así como en esta última las imágenes quedan grabadas sobre una película fotosensible y se revelan posteriormente mediante un proceso químico, en la fotografía digital las imágenes son capturadas por un sensor electrónico que dispone de múltiples unidades fotosensibles, las cuales aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en una señal eléctrica, la cual es digitalizada y almacenada en una memoria. Su uso presenta ciertas ventajas y desventajas como son:

3.3.1.1 VENTAJAS

- ✓ La ventaja de este sistema respecto a la fotografía química es que permite disponer de las imágenes grabadas al instante, sin necesidad de llevar la película al laboratorio y revelar los negativos para poder ver las imágenes; esta ventaja en la rapidez en la disponibilidad de la imagen permite que el fotógrafo haga los cambios en el momento y realice las correcciones que considere pertinentes de forma inmediata, facilitando así lograr la imagen que se desea.
- ✓ En la cámara digital pueden verse en una pantalla las fotos que se acaban de tomar. La cámara se puede conectar a una computadora u otro dispositivo capaz de mostrar las fotos en un monitor. Como están en un formato digital,



las fotos pueden enviarse directamente por correo electrónico, publicarse en la Web y se pueden procesar con programas de tratamiento fotográfico en una computadora, para ampliarlas o reducir las, realizar un reencuadre (una parte de la foto), rectificar los colores y el brillo, y realizar otras muchas posibles modificaciones según el programa que se utilice.

- ✓ Otra gran ventaja de la fotografía digital es que cada vez que la cámara toma una foto crea un archivo de metadatos Exif (datos no visuales) y guarda dentro del archivo de imagen información relevante de la captura como la fecha, la hora, la apertura del diafragma, la velocidad de obturación, velocidad del ISO, coordenadas de la captura, etc. Esta información es muy útil para estudiar las imágenes y entender más acerca de cada fotografía y también facilita el ordenamiento y el manejo de los archivos fotográficos.
- ✓ Otros recursos útiles existentes en fotografía digital son el histograma de brillo, que es un gráfico que muestra la distribución de los píxeles de la imagen según sus niveles de brillo; así como el histograma RGB que muestra la distribución de los píxeles en los diferentes canales de color: en el caso del modo RGB, serán los canales de rojo (R:red), Verde (G:green), y Azul (B:blue). Este recurso no existe en fotografía química.
- ✓ Transformaciones en la creación de fotografías digitales. El control fácil y rápido de la sensibilidad ISO ayuda a resolver los problemas de falta o exceso de luz. Las cámaras digitales favorecen por otra parte una mayor producción de fotografías, en tanto el límite del costo y la cantidad de fotogramas de las películas desaparece, quedando reducido al poco conocido dato de la vida útil del obturador digital.
- ✓ Transformaciones en la circulación y recepción de fotografías digitales. El costo por fotografía impresa (en comparación con el sistema químico) es menor; esto considerando que se pueden realizar múltiples tomas, y elegir para la impresión solamente fotografías deseadas.



- ✓ Referente a su uso en el proceso fotogramétrico, las imágenes son captadas directamente en formato digital eliminando el proceso de digitalización, estas imágenes pueden ser rápidamente transmitidas para su procesamiento.

3.3.1.2 DESVENTAJAS

- ✓ Ruido: Las cámaras digitales con sensor *full frame*³ presentan una figura de ruido mejor que la película química, especialmente en sensibilidades ISO bajas. El ruido digital es la variación aleatoria (que no se corresponde con la realidad) del brillo o el color en las imágenes digitales producido por el dispositivo de entrada (la cámara digital en este caso). Está universalmente aceptado que, así como, en la imagen analógica el grano era aceptable e incluso estético, en la fotografía digital el ruido es antiestético e indeseable.
- ✓ Otra desventaja de las cámaras digitales es el costo más elevado de éstas, comparado con las máquinas convencionales, aunque día a día esta brecha se acorta.
- ✓ En algunas ocasiones las cámaras digitales se demoran mientras guardan la información del archivo en la tarjeta de memoria, impidiendo que se tomen nuevas imágenes hasta que se termine de procesar la información, esto es molesto por que algunas imágenes no se pueden capturar y se escapan mientras ocurre este proceso de archivado, esto no ocurre en la fotografía química donde el motor de arrastre es el encargado del desplazamiento de la película y de dejar la cámara lista para la siguiente toma.

3.3.2 LA IMAGEN DIGITAL

Una imagen digital es una matriz bidimensional en la que cada unidad mínima de información es un píxel con coordenadas *fila, columna* (i,j). Cada píxel, tendrá un

³ Sensor full-frame o sensor de fotograma completo hace referencia al circuito sensor de imagen cuyo tamaño equivale al formato de 35mm utilizado en las cámaras clásicas, es decir, 36x24mm.



valor denominado Nivel Digital (Nd) que estará representado por un nivel de gris en pantalla (Figura 12a). Esta composición de la imagen digital es la que corresponde con una imagen monobanda, o lo que es lo mismo: compuesta por sólo una matriz, y que se visualizaría en niveles de gris. Sin embargo, las imágenes a color (RGB), tal y como se puede apreciar en la figura 12b, están compuestas por tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el verde (Green) y otra para el azul (Blue). El almacenamiento de estas imágenes se triplica en espacio, puesto que cada matriz tiene sus propios niveles digitales.

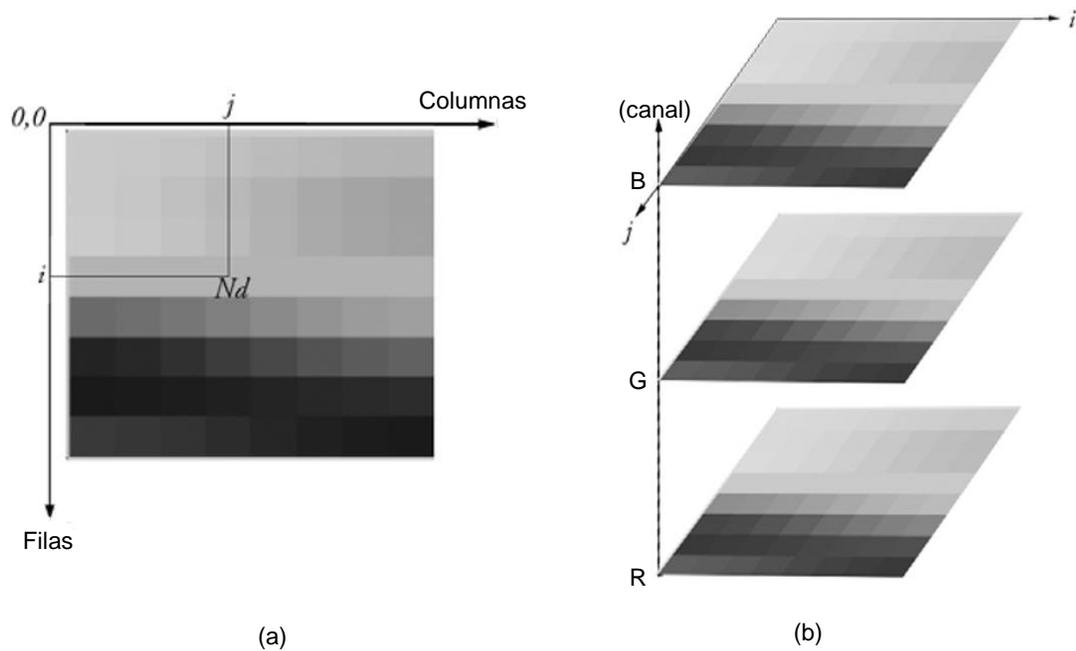


Figura 12. Composición de una imagen digital.

(a) Imagen digital. (b) Imagen digital en RGB. **Fuente:** Documento "Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil" por Elida Quirós Rosado.

3.3.3 CARACTERÍSTICAS

Una imagen digital puede presentar diferentes características, como información referente a las condiciones de captura, así como la resolución según el tamaño del pixel y las características internas de la cámara.



3.3.3.1 RESOLUCIÓN DE UNA IMAGEN DIGITAL

La resolución define la calidad de una imagen digital, la cual depende del tamaño del píxel. Si es demasiado grande, la imagen pierde información, pero, si por el contrario es demasiado pequeño, la imagen tendría mucha calidad, con el inconveniente de que también necesitaría mucho espacio de almacenamiento. La unidad en la que se expresa la resolución es ppp (píxeles por pulgada).

En fotografía dedicada a la fotogrametría, sin importar la plataforma aérea que se utilice se podrán observar ciertos tipos de resolución:

- Resolución espacial: Referida al tamaño de píxel de las imágenes cubriendo la superficie terrestre o GSD⁴ (esta será la que nos interese en el estudio). Ver figuras 13 y 14.



Figura 13. Representación del GSD en el terreno.

- Resolución temporal: Se refiere a la frecuencia en que el sensor visita de nuevo un lugar específico.
- Resolución espectral: Por el número de bandas espectrales que registra el sensor.

⁴ Ground Sample Distance.



La resolución en fotografía digital se mide multiplicando el alto por el ancho de las fotografías que permite obtener la cámara y generalmente comienza con un millón de píxeles, para las cámaras más económicas, y va en aumento hasta más de diez millones de píxeles, para las cámaras profesionales.

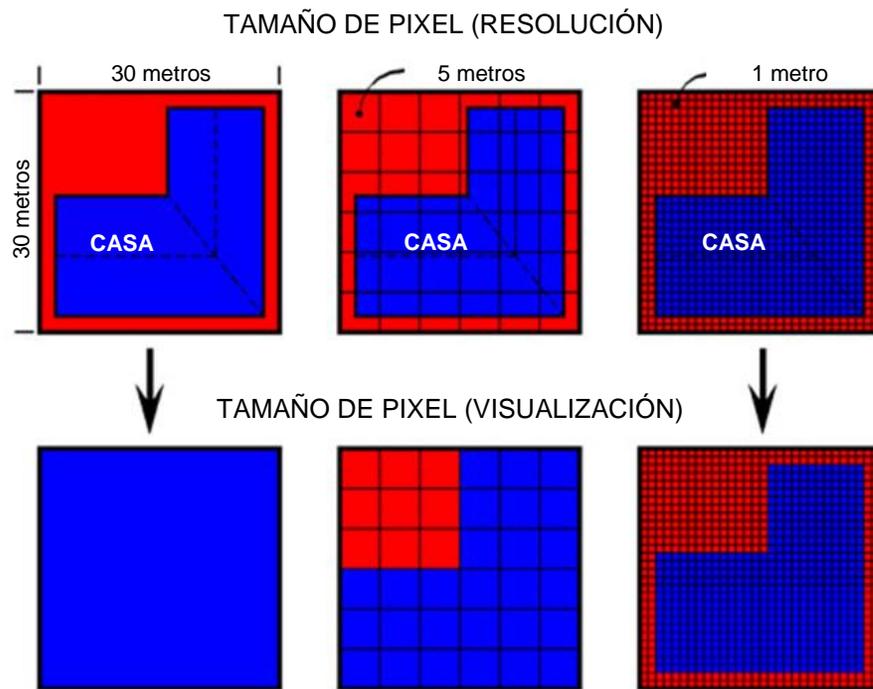


Figura 14. Resolución espacial de una fotografía aérea según el tamaño del pixel.

3.3.3.1.1 PÍXEL

Un píxel o pixel, plural píxeles (acrónimo del inglés picture element), es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

Las cámaras digitales usan componentes de electrónica fotosensible, como los CCD (del inglés Charge-Coupled Device) o sensores CMOS, que graban niveles de brillo en una base por-píxel. En la mayoría de las cámaras digitales, el CCD está cubierto con un mosaico de filtros de color, teniendo regiones color rojo,



verde y azul (RGB) organizadas comúnmente según el filtro de Bayer, así que cada píxel-sensor puede grabar el brillo de un solo color primario. La cámara interpola la información de color de los píxeles vecinos, mediante un proceso llamado interpolación cromática, para crear la imagen final.

3.3.3.1.2 MEGAPÍXEL

Un megapíxel o megapixel (Mpx) equivale a 1 millón de píxeles, a diferencia de otras medidas usadas en la computación en donde se suele utilizar la base de 1024 para los prefijos, en lugar de 1000, debido a su conveniencia respecto del uso del sistema binario. Usualmente se utiliza esta unidad para expresar la resolución de imagen de cámaras digitales; por ejemplo, una cámara que puede tomar fotografías con una resolución de 2048 x 1536 píxeles se dice que tiene 3.1 megapíxeles ($2048 \times 1536 = 3,145,728$).

La cantidad de megapíxeles que tenga una cámara digital define el tamaño de las fotografías que puede tomar y el tamaño de las impresiones que se pueden realizar; sin embargo, hay que tener en cuenta que la matriz de puntos está siendo distribuida en un área bidimensional y, por tanto, la diferencia de la calidad de la imagen no crece proporcionalmente con la cantidad de megapíxeles que tenga una cámara, al igual que las x de una grabadora de discos compactos.

3.3.3.1.3 DIMENSIONES DE IMAGEN

Para saber el número total de píxeles de una cámara, basta multiplicar el ancho de la imagen máxima que puede generar por el alto de la misma (desactivando previamente el zoom digital); también es posible dividir el número de píxeles de ancho entre el número correspondiente al alto, y conocer la proporción de la imagen obtenida. Aquí se presenta una lista de las resoluciones comunes de cámaras digitales basándose en esta relación de aspecto:



Tabla 6. Dimensiones de imagen según proporción y cantidad de píxeles.

Megapíxeles	Tamaño imagen 3:2 (Píxeles)	Tamaño imagen 4:3 (Píxeles)	Megapíxeles	Tamaño imagen 3:2 (Píxeles)	Tamaño imagen 4:3 (Píxeles)
0,3	671x447	632x474	20	5477x3651	5164x3873
1	1224x816	1155x866	21	5613x3742	5292x3969
1,2	1341x894	1265x949	22	5745x3830	5416x4062
2	1733x1155	1633x1225	24	6000x4000	5657x4243
3	2121x1414	2000x1500	25	6123x4082	5773x4330
4	2450x1633	2309x1732	28	6480x4320	6111x4583
5	2739x1826	2581x1936	30	6708x4472	6324x4743
5,3	2820x1880	2659x1994	32	6929x4619	6532x4899
6	3000x2000	2828x2121	34	7142x4761	6733x5050
6,3	3074x2049	2899x2174	35	7245x4830	6831x5123
8	3464x2309	3265x2449	36	7349x4899	6928x5196
10	3873x2582	3652x2739	39	7649x5099	7211x5408
12	4242x2828	4000x3000	40	7746x5164	7303x5477
14	4583x3055	4320x3240	44	8124x5416	7660x5745
15	4743x3162	4472x3354	48	8486x5657	8000x6000
16	4899x3266	4619x3464	50	8661x5774	8165x6124
18	5196x3464	4899x3674			

3.3.3.2 TAMAÑO DEL ARCHIVO

El tamaño del archivo es la cantidad de memoria necesaria para almacenar la información de la imagen.



El número de bits que se necesitan para almacenarla está en función de la resolución de su largo y ancho y la profundidad de color.

$$\text{Tamaño} = R^2 \times L \times A \times P$$

Ec 3.1

R= Resolución (ppp).

L y A= Largo y Ancho (pulg).

P= Profundidad de color.

El tamaño de la imagen, además, se multiplicará por tres, si se almacena en color. Uno de los inconvenientes de las imágenes digitales está relacionado con la necesidad de disponer de un elevado volumen de almacenamiento, debido a la gran cantidad de información con la que se trabaja. Hay que tener muy en cuenta que un proyecto fotogramétrico de dimensiones no muy elevadas, está compuesto por numerosas imágenes.

3.3.3.2.1 PROFUNDIDAD DE COLOR

La profundidad de color corresponde con el número de bits utilizados para describir el color de cada píxel. Tal y como se aprecia en la figura 15, cuanto mayor sea la profundidad, más colores habrá en la imagen. La relación entre el número de colores y la profundidad se expresa en la siguiente tabla.

Tabla 7. Dimensiones de imagen según proporción y cantidad de píxeles.

Profundidad	Colores 2^{nb}
1 bit	$2^1=2$
4 bit	$2^4=16$
8 bit	$2^8=256$
16 bit	65536
32 bit	4294967296

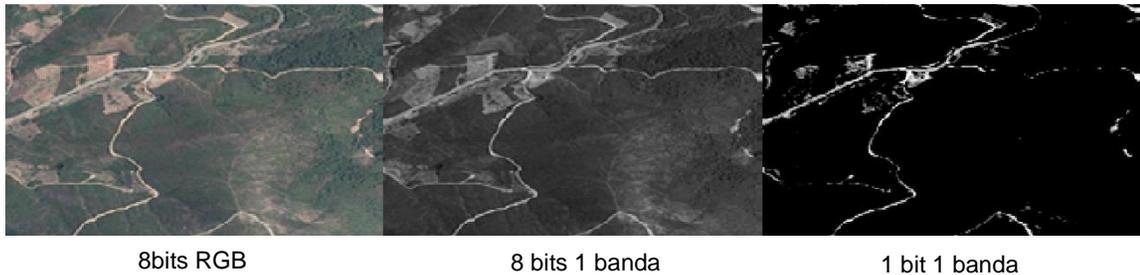


Figura 15. Profundidad de color.

3.3.3.2.2 COMPRESIÓN DE IMÁGENES

Para salvar el inconveniente del gran volumen de información que una imagen digital necesita para ser almacenada, existe la técnica de la compresión de imágenes, que reduce el espacio de almacenamiento.

Hay que ser muy cuidadosos con la compresión de imágenes, especialmente en fotogrametría, ya que algunos algoritmos de compresión producen pérdidas de información irreparables que reducen la calidad de la imagen. Comprimir una imagen es reducir la cantidad de datos necesarios para representar la imagen digital. La técnica se basa en la eliminación de todos los datos redundantes que existen en la imagen. Cuanta más redundancia exista en la imagen, más compresión puede sufrir. Suponiendo la imagen de la figura 16, de 1 bit (B/N):

La primera fila de la imagen tendría los siguientes valores:
BBBBBBBBBNBBBBBBBBBBBBNNBBBBBBBBBBBBNBBBBBBBBB

Sin comprimir, necesitaría 47 bits de memoria sólo para almacenar dicha fila. Pero podríamos reducir el número de bits si la expresáramos de esta otra forma: 9B1N12B3N12B1N19B De este otro modo, sólo necesitaríamos 17 bits para almacenar esa misma fila. En este caso, hemos eliminado la redundancia que consistía en el número de veces que se repetía el mismo valor en píxeles vecinos de la misma fila. Un concepto que conviene enunciar es el ratio de compresión, que es la relación que existe entre la imagen original y la comprimida. Por



ejemplo, un ratio de compresión de 1.5:1, significa que la imagen original ocupa 1.5 veces más espacio que la comprimida.

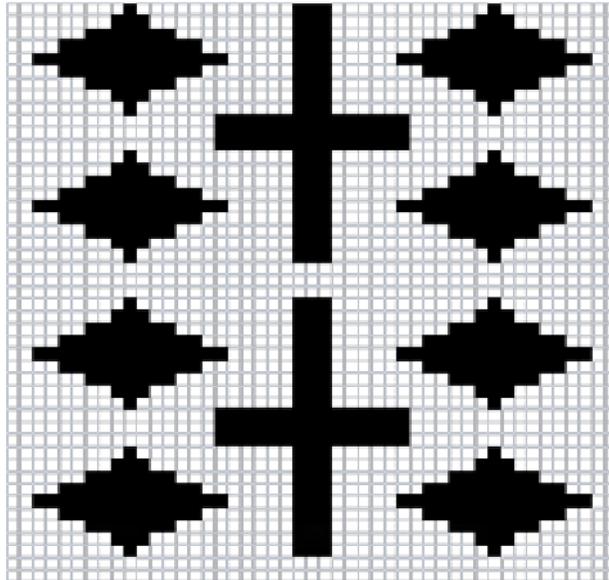


Figura 16. Ejemplo de imagen B/N a comprimir.

La mayor diferencia que existe entre los algoritmos de compresión es que algunos, sacrifican la información para reducir aún más el tamaño del archivo. Son los denominados **algoritmos con pérdida**. Estos algoritmos, al descomprimir una imagen comprimida para mostrarla en pantalla, no son capaces de reproducirla exactamente como la imagen original, por tanto, sufriendo una pérdida de información. Esta pérdida es mínima y el ojo humano no puede apreciarla. En los casos en los que la métrica de la imagen es la principal utilización de la misma, hace imposible la utilización de este tipo de algoritmos de compresión. En el caso de la fotogrametría los únicos algoritmos que se deben utilizar son los **algoritmos sin pérdida**, de manera que, aunque no reducen en exceso el tamaño de las imágenes, conservan la integridad de la misma algo fundamental para conservar también sus propiedades métricas.



3.3.3.3 ALMACENAMIENTO DE METADATOS

Como se mencionaba una de las ventajas del uso de fotografías digitales es la información que se genera al momento de tomar la fotografía y que se almacena en la imagen, en un archivo de metadatos conocido Exif, la cual puede ser muy completa.

El Exif (Exchangeable image file format oficialmente Exif, no EXIF) es una especificación para formatos de archivos de imagen usado por las cámaras digitales. Fue creado por la Japan Electronic Industry Development Association (JEIDA). La versión 2.1 de la especificación fue publicada el 12 de junio de 1998 y la versión 2.2 en abril de 2002. Mientras que Exif es un acrónimo y normalmente estaría en mayúsculas, la especificación lo define como “Exif”. No obstante, la especificación suele ignorarse en favor de normas generales de capitalización que tenga el lenguaje, por lo que es habitualmente escrito como EXIF.

Las etiquetas de metadatos definidas en el estándar Exif cubren un amplio espectro incluido:

- ✓ Información de fecha y hora. Las cámaras digitales registran la fecha y la hora actual y la almacenan en los metadatos.
- ✓ Configuración de la cámara. Esta incluye información estática como el modelo de cámara y el fabricante, e información que varía con cada imagen como la orientación, apertura, velocidad del obturador, distancia focal, medidor de exposición y la velocidad de la película.
- ✓ Información sobre localización, la cual podría provenir de un GPS conectado a la cámara.
- ✓ Descripción e información sobre copyright.



3.4 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

La aviación no tripulada tuvo sus comienzos en los modelos construidos y volados por inventores como Cayley, Stringfellow, Du Temple y otros pioneros de la aviación, que fueron previos a sus propios intentos de desarrollar aeronaves tripuladas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX. Estos modelos sirvieron para el posterior desarrollo de modelos de mayor tamaño con piloto a bordo y, en este sentido, fueron los precursores de la aviación tripulada.

En la acepción más amplia del término, la aviación no tripulada abarca un amplio espectro de aeronaves. La genealogía de las aeronaves no tripuladas esconde sus raíces en el desarrollo de los llamados torpedos aéreos, antecesores de los actuales misiles crucero, que posteriormente se desarrollaron a través de las ramas de las bombas guiadas (no propulsadas), los blancos aéreos (llamados drones en la terminología anglosajona), los señuelos, los modelos recreacionales y/o deportivos de radio-control, las aeronaves de investigación, las aeronaves de reconocimiento, las de combate, e incluso algunos modelos más extraños de vuelo extra-atmosférico.

3.4.1 DEFINICIÓN UAV

El término vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV), el cual fue utilizado durante la guerra de Vietnam y con posterioridad. El documento Joint Publication 1-02, Department of Defense Dictionary editado por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos define UAV como:

“Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. No se



consideran UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería”.

Los términos UAV y RPV no son más que dos entre cerca de la docena de nombres que han ido recibiendo las aeronaves robóticas no tripuladas a lo largo de su existencia. En la siguiente figura se representa gráficamente la cronología de dichos nombres.



Figura 17. Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas⁵.

Aunque las aeronaves no tripuladas han llevado a cabo operaciones comerciales tan variadas como agricultura de precisión o cinematografía, su uso militar se ha concentrado abrumadoramente en una aplicación: reconocimiento.

De manera que el término UAV o UAS (sistemas de aeronaves no tripulados; Unmanned Aerial System) se ha convertido virtualmente en un sinónimo de dicha aplicación.

⁵ El resto de los acrónimos no definidos se corresponden con: UMA = Unmanned Aircraft; APV = Automatically Piloted Vehicle; UTA = Unmanned Tactical Aircraft; UCAV = Unmanned Combat Air Vehicle; ROA = Remotely Operated Aircraft.



De acuerdo con la organización de Aviación civil Internacional (OACI), “El hecho de que la aeronave sea tripulada o no tripulada no afecta a su condición de aeronave. Cada categoría de aeronave tendrá posiblemente versiones no tripuladas en el futuro. Este punto es fundamental para todos los aspectos futuros relativos a las UA y proporciona la base para tratar la aeronavegabilidad, el otorgamiento de licencias al personal, las normas de separación, etc.”⁶.

Es decir, que las aeronaves no tripuladas son, ante todo, aeronaves, y por tanto están sujetas a las mismas reglas y limitaciones que las aeronaves tripuladas.

La OACI establece dos preceptos importantes que han de tenerse en cuenta:

- ✓ En primer lugar, la preferencia a considerar el sistema completo, integrado no sólo por la propia aeronave, sino también por la estación de control en tierra (Ground Control Station o GCS) y el enlace de comunicaciones entre ésta y la aeronave. De esta manera se habla de UAS (sistemas de aeronaves no tripuladas) y de RPAS (Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia) relegando los términos de aeronaves no tripuladas (UA o UAV) y aeronaves pilotadas a distancia (RPA) aquellas ocasiones en las que se quiere hacer referencia específica a las propias aeronaves.
- ✓ En segundo lugar, la distinción entre RPAS y aeronaves completamente autónomas, en las que no existe control efectivo del piloto remoto sobre la aeronave, en todo o parte del vuelo.

Por lo anterior se puede decir que todos los RPAS son UAS, mientras que no todos los UAS son RPAS; estos fuera de la categoría de RPAS se conocen como aeronaves autónomas, las cuales plantean problemas importantes para garantizar la seguridad (cómo evitar accidentes) y sobre todo para asignar la responsabilidad en caso de accidente.

⁶ Circular OACI 328-An/190 de 2011.



3.4.2 CLASIFICACIÓN DE AERONAVES

Existen muchas posibles formas de clasificar las aeronaves, es frecuente utilizar una clasificación ateniendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmósfera.

En el siguiente diagrama se plantea una posible clasificación simplificada que muestra los principales tipos de aeronaves:

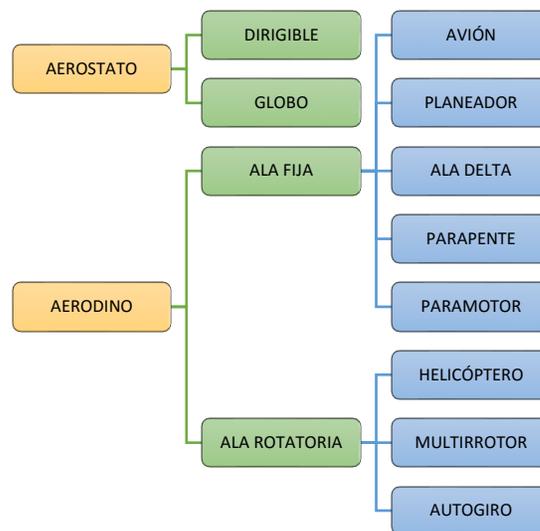


Figura 18. Principales tipos de aeronaves.

Dentro de los UAV se encuentran representadas todos los tipos de aeronaves posibles y al igual que ocurre en la aviación tradicional tripulada, unos tipos han tenido mayor éxito que otros.

Por otra parte aparecen categorías nuevas, como los híbridos, que desarrollan parte del vuelo en forma de ala rotatoria, generalmente en el despegue y aterrizaje y posiblemente en alguna parte de la misión, aprovechando las ventajas de este tipo de sistemas, realizando una transición a ala fija para alcanzar de forma rápida y eficiente su objetivo. Aunque existen prototipos tripulados de aeronaves híbridas, posiblemente su mayor desarrollo tendrá lugar en el campo de los UAV.



Otras clasificaciones pueden estar en orden del techo máximo que alcanza la aeronave, tipo de despegue, tipo de aterrizaje y sus capacidades de vuelo (Altitud, alcance, velocidad, duración de vuelo, etc.) así como su sistema de propulsión.

3.4.3 USOS

Como tantas otras tecnologías, el desarrollo inicial de los UAV ha tenido lugar fundamentalmente en el ámbito militar. En el ejército norteamericano constituyen alrededor de un tercio del total de la flota de aeronaves en operación y desempeñan en exclusiva todas las misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR por sus siglas en inglés) que llevan a cabo las fuerzas armadas, habiendo desplazado totalmente a los medios aéreos convencionales.

Se utilizan en misiones que van desde reconocimiento, observación y vigilancia hasta bombardeos, enlace de comunicaciones en relevo y complemento de comunicaciones satelitales. Los avances en esta área han permitido la integración de modelos UAV menos avanzados, pero no menos útiles, a diversas aéreas de aplicación civil. Algunos usos de estas aeronaves son:

- ✓ Fotografía y video para fines de marketing y publicitarios (tomas aéreas en películas y coberturas deportivas).
- ✓ Lucha contra incendios, mediante la detección de gases y productos tóxicos y el reconocimiento previo de la zona.
- ✓ Monitorización del tráfico (Revisión del uso y rendimiento de la red de carreteras).
- ✓ Asistencia en servicios de salvamento y rescate más barata y segura.
- ✓ Control de ganado.
- ✓ Vigilancia.
- ✓ Control de infraestructuras, como carreteras, canales, aeropuertos, redes ferroviarias.



- ✓ Topografía (Minería, movimientos de tierra, desarrollo urbano, etc.) y cartografía.
- ✓ Estudio de geomorfología, (Predicción de terremotos, previsión de deslizamientos de tierra, etc.).

3.4.4 UAVs EN LA INGENIERÍA CIVIL

Entre los UAV los drones son, relativamente, de más fácil adquisición y son también objeto de estudio de la presente investigación. Algunas aplicaciones de los drones dentro del campo de la ingeniería civil:

- ✓ Aplicaciones al control de calidad del aire.
- ✓ Aplicaciones cartográficas. Mediante la creación de mapas catastrales a través de la digitalización de las ortofotografías georreferenciadas.
- ✓ Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales.
- ✓ Aplicaciones hidrológicas.
- ✓ Aplicaciones en agricultura. Como identificación de tipos de cultivo, recuento de plantas, medición del índice de área foliar, identificación de tipos de suelo y humedad de suelo, medición de la altura de la planta, control de deficiencias de nitrógeno, estimación de la biomasa, etc.
- ✓ Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos.
- ✓ Aplicaciones en la gestión del patrimonio y herencia cultural.
- ✓ Aplicaciones urbanísticas.

El conocimiento topográfico y cartográfico, del terreno o zona de estudio, está relacionado con el posible desarrollo urbanístico, gestión del patrimonio, hidrología, explotación de recursos minerales y otros más.

3.4.4.1 BENEFICIOS

Los beneficios de este tipo de aeronaves pueden resumirse según los siguientes aspectos:



- ✓ No arriesgan vidas humanas en cualquiera de sus aplicaciones.
- ✓ No están limitados por las capacidades humanas en cuanto a aceleraciones (fuerzas G) ni tiempos de misión.
- ✓ No están sujetos a ninguna necesidad ergonómica, el espacio de la cabina de mando puede ser utilizado para albergar todo tipo de sistemas de comunicación, control u operación.
- ✓ Fácil y rápido despliegue en misión.
- ✓ Operación en tiempo real a nivel táctico, operacional y estratégico.
- ✓ Reducen el tiempo de entrenamiento.
- ✓ Adaptabilidad a diversos cometidos gracias a sus cargas útiles modulares.
- ✓ Gran maniobrabilidad y poder de acceso a sitios inaccesibles para vehículos tripulados.
- ✓ Menor peso, menor consumo.
- ✓ Menor impacto ambiental tanto de contaminación (menores emisiones de CO₂) como de ruido.
- ✓ Menor coste de mantenimiento y elevada relación coste/eficiencia
- ✓ Elevada movilidad, discreción y sigilo.

3.4.4.2 LIMITACIONES

A pesar de las enumeradas ventajas de la implementación del equipo tanto en el ámbito civil como militar, esta presenta algunas limitaciones actualmente:

- ✓ Dependencia de una estación de control en tierra (según su grado de autonomía).
- ✓ Vulnerabilidad y limitada capacidad de defensa.
- ✓ Limitaciones de peso y volumen de equipos a bordo.
- ✓ Dificultades de integración en el espacio aéreo (ya que en el país no existe una normativa que regule el tráfico aéreo de estas aeronaves dentro de la aviación civil).



3.5 INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS

La aparición y difusión de los avances tecnológicos a lo largo de historia han permitido crear entornos de trabajo y equipos totalmente nuevos. En la ingeniería civil, estos avances están produciendo cambios importantísimos en las técnicas de trabajo, que se concretan por una parte en el aumento de forma exponencial del volumen de información accesible y el tiempo requerido para realizar las actividades.

La necesidad de la ingeniería civil de resolver los inconvenientes y los problemas del desarrollo físico y de infraestructura de la sociedad supone la necesidad de actualización permanente, es decir, de diseñar y utilizar nuevos métodos para ejecutar proyectos civiles.

De la integración/adaptación de tecnologías en el área de fotogrametría tenemos instrumentos (drones) con menor costo de adquisición y operación y que según el alcance del proyecto presentan mayor rentabilidad y mejores resultados en un tiempo más corto. La valencia del drone dentro de esta tarea fotogramétrica dependerá de la cámara y del sistema de estabilización de la misma.

Según las características del drone este puede equiparse con una cámara para la recolección de fotografías, así como de equipo para recolectar información del vuelo.

3.5.1 CÁMARA

La cámara fotogramétrica es un elemento fundamental en el proceso fotogramétrico. Las cámaras que se utilizan son cámaras métricas, calibradas y con una geometría tal que producen resultados óptimos y fiables. Las cámaras aéreas analógicas se han utilizado hasta la actualidad, pero comienzan ya a quedar obsoletas, sustituidas por la nueva generación de cámaras digitales.



Según el tipo de cámara estas fotografías pueden contener información más amplia del terreno. Algunos programas de restitución fotogramétrica recomiendan parámetros internos específicos de la cámara destinada a usarse según la naturaleza del proyecto. Aunque esta no es una limitante para la utilización de las cámaras, el seguir esta consideración permitirá obtener mejores resultados.

Tabla 8. Distancia Focal de la cámara recomendada por Pix4D según el tipo de proyecto.

APLICACIÓN	RECOMENDACIÓN	MOTIVO
Mapeo: Proyecto aéreo con un altura de vuelo sobre 50 metros.	Lentes de Perspectiva: entre 22mm y 80mm de distancia focal (en el formato equivalente de 35mm).	Para asegurar una buena GSD que permitirá una alta precisión en los resultados.
Interiores / Reconstrucción 3D de corto rango.	Lentes de Ojo de Pez: Distancia focal muy baja.	Flexibilidad para la adquisición de imágenes: Asegurando un traslape alto.

Algunos fabricantes de lentes dan la distancia focal en el equivalente a 35mm (F_{35}). Con el fin de encontrar la distancia focal real, se necesitan algunos cálculos. En el caso de una proporción de 4:3, la fórmula para la distancia focal real de F_R está dada por:

$$F_R = \frac{(F_{35} \times S_w)}{34.6} \quad \text{Ec 3.1}$$

F_{35} = Distancia focal (en mm) que corresponde al equivalente de 35 mm.

F_R = Distancia focal real.

S_w = Anchura del sensor.

Otras fórmulas de conversión se describen en la siguiente tabla:



Tabla 9. Fórmulas de conversión para el formato de 35 mm.

Tamaño de la Imagen	Distancia Focal Equivalente (EFL) basada en la Diagonal	Distancia focal equivalente (EFL) basada en el ancho
4:3 (Ancho del sensor Sw)	$F_{35} = 34.6 (F_R / Sw) \text{ mm}$	$F_{35} = 36.0 (F_R / Sw) \text{ mm}$
4:3 (Diagonal del sensor Sd)	$F_{35} = 43.3 (F_R / Sd) \text{ mm}$	$F_{35} = 45.0 (F_R / Sd) \text{ mm}$
3:2 (Ancho del sensor Sw)	$F_{35} = 36.0 (F_R / Sw) \text{ mm}$	$F_{35} = 36.0 (F_R / Sw) \text{ mm}$
3:2 (Diagonal del sensor Sd)	$F_{35} = 43.3 (F_R / Sd) \text{ mm}$	$F_{35} = 43.3 (F_R / Sd) \text{ mm}$

En una cámara digital, el plano focal de la cámara es sustituido por un sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen (CCD) La forma de disposición de los CCD da lugar a dos tipos de cámaras fotogramétricas digitales:

- Cámaras lineales: La cámara dispone de tres líneas paralelas de 12 Kilobyte (12K) sensores, transversales a la dirección de vuelo. Dichas líneas tienen diferentes inclinaciones: delantera, nadiral y posterior.
- Cámaras matriciales: Este tipo de sensores es similar a las cámaras aéreas analógicas en cuanto a composición. Las cámaras matriciales constan de 1Kx1K elementos sensoriales (1024x1024píxeles), 2Kx2K, 3Kx2K, 4Kx4K, 4Kx7K, 7Kx9K, 5Kx10K, 9Kx9K.

Estas cámaras al ser digitales, pueden capturar información de distintas partes del espectro electromagnético, no sólo en el visible⁷.

⁷ Se llama espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. Un típico ojo humano responderá a longitudes de onda de 390 a 750 nm.



3.5.2 DRONES

El uso de helicópteros y avionetas para la fotografía aérea desde comienzos del siglo veinte ha hecho que aumenten las actividades de cartografía y sus posibilidades de forma sustancial.

La fotografía aérea tradicional utiliza avionetas y helicópteros lo que encarece el trabajo, además de no poder hacerse a todas horas debido a normativas de seguridad. Los UAS cuestan menos que otros sistemas tradicionales y no interfieren con las líneas aéreas comerciales, por lo tanto, pueden estar dispuestas más rápidamente.

Los drones según su costo pueden tener características que compitan con las otras fuentes presentadas y presentan ciertas ventajas frente a estos como maniobrabilidad, costo de adquisición, polivalencia y facilidad de operación.

La selección del equipo deberá tener en consideración la naturaleza y tamaño del área o estructuras que se desean documentar, la resolución buscada, el clima en la zona de trabajo y el espacio que se tiene para realizar el despegue y aterrizaje del drone.

Los vehículos aéreos no tripulados vienen en muchas formas y tamaños y cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y desventajas únicas. Los UAV actualmente se reducen a dos categorías, de ala fija y ala rotatoria.

3.5.2.1 UAV DE ALA FIJA

Este se compone de un ala rígida que tiene una superficie de sustentación predeterminada, que hacen capaz el vuelo debido a la elevación causada por la velocidad de avance del UAV. Esta velocidad es generada por un empuje hacia adelante, por lo general, por medio de una hélice (girada por un motor de combustión interna o un motor eléctrico).



El control del UAV proviene de las superficies de control integradas en el ala en sí, éstos tradicionalmente consisten en alerones, un ascensor y un timón. Permiten al UAV girar libremente alrededor de tres ejes que son perpendiculares el uno al otro y se intersectan en el centro de gravedad del UAV.

Suponiendo que la cámara está montada de tal manera que el eje x de la cámara apunta hacia el ala derecha, el eje y está apuntando hacia la cola y la lente esté apuntando hacia abajo, los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll* se definen como se muestra en la figura 19. El ascensor permite controlar el *Pitch* (eje lateral), los alerones controlan el *roll* (eje longitudinal) y el timón el control del *yaw* (eje vertical).

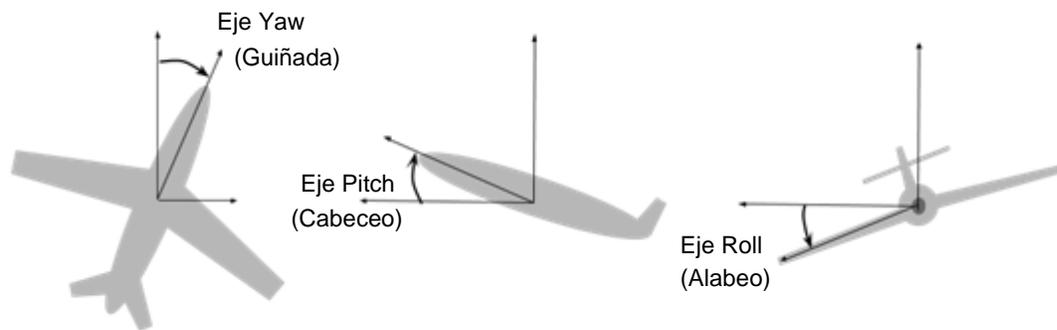


Figura 19. Representación del giro de la aeronave durante el vuelo.

3.5.2.2 UAV DE ALA ROTATORIA

Un UAV de ala rotatoria consiste en 2 o 3 palas de rotor que giran en torno a un mástil fijo, esto se conoce como un rotor. Estos vienen en una amplia gama de configuraciones que constan de un mínimo de un rotor (HELICÓPTERO), 3 rotores (TRICOPTER), 4 rotores (QUADCOPTER), 6 rotores (HEXACOPTER), 8 rotores (OCTOCOPTER), así como configuraciones más inusuales como 12 y 16 rotores.

Las palas del rotor funcionan exactamente de la misma manera que un ala fija, sin embargo, no es necesario un movimiento de avance constante para producir



flujo de aire sobre las cuchillas. Las cuchillas en constante movimiento producen el flujo de aire requerido sobre su superficie de sustentación para generar la elevación.

El control de vehículos aéreos de ala rotatoria proviene de la variación en el empuje y el par de rotores de ella. Por ejemplo, el *pitch* hacia abajo de un QUADCOPTER se genera a partir de que los rotores traseros producen más empuje que los rotores en la parte delantera, esto permite que la parte trasera del QUADCOPTER se eleve más que la parte delantera produciendo así una actitud “nariz hacia abajo”. El movimiento del *yaw* utiliza la fuerza de torsión del rotor, donde rotores diagonales producen un desequilibrio en los ejes, causando que el QUADCOPTER gire sobre el eje vertical.

3.5.2.3 LIMITANTES DE CADA TIPO

Cada una de estas categorías se puede romper más abajo, por ejemplo, un UAV de ala fija puede ser de ala alta, media ala, ala baja y ala volante, otra vez cada uno con sus propias ventajas y desventajas características únicas. Se definirán las diferencias “de primer nivel” entre los dos.

Tabla 10. Ventajas y desventajas del uso de los tipos de UAV.

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
UAV DE ALA FIJA	Son capaces de llevar mayores cargas útiles por distancias más largas con menos potencia. Lo que le permite llevar sensores de mayor tamaño.	Las aeronaves de ala fija requieren aire en movimiento sobre sus alas para generar la elevación. Por lo que deben permanecer en un constante movimiento hacia adelante.
	Se compone de una estructura mucho más simple en comparación con un ala rotatoria. Por lo que el proceso de mantenimiento y reparación es menos complicado.	UAV de ala fija no son adecuados para aplicaciones estacionarias como el trabajo de inspección.



	Debido a que su estructura aerodinámica es simple y más eficiente, se pueden realizar vuelos más largos a velocidades más altas, permitiendo así cubrir áreas más grandes por cada vuelo.	Se tiene la necesidad de una pista o lanzador para el despegue y el aterrizaje ⁸ .
UAV DE ALA ROTATORIA	La mayor ventaja de los UAV de ala rotatoria es la capacidad para despegar y aterrizar verticalmente. Esto permite al usuario operar con un área más pequeña de aterrizaje/despegue.	El avión de ala rotativa implica una mayor complejidad mecánica y electrónica que se traduce generalmente a procesos más complicados de mantenimiento y reparación. Lo que significa que el tiempo de operación del usuario puede disminuir y aumentarse los costos operativos.
	Su capacidad para flotar y realizar maniobras ágiles hace a los UAVs de ala giratoria muy adecuados para aplicaciones como inspecciones donde se requieren maniobras precisión y la capacidad de mantener contacto visual en un solo objetivo, durante largos períodos de tiempo.	Debido a sus velocidades más bajas y tiempo de vuelo más corto el operador requerirá muchos vuelos adicionales para inspeccionar las áreas significativas, otro aumento en el tiempo y los costes operativos.

3.5.3 MÉTODOS DE NAVEGACIÓN

Un método de navegación tiene por objeto guiar la aeronave entre un punto de partida y uno de llegada, conociendo su posición en todo momento. Generalmente las trayectorias vienen impuestas por el trabajo, de forma que la aeronave destinada al trabajo fotográfico no puede apenas separarse de su

⁸ Para el despegue y el aterrizaje el VTOL (despegue/aterrizaje vertical) y STOL (despegue/aterrizaje corto) son soluciones muy populares para ayudar a erradicar este problema.



trayectoria, para asegurar el recubrimiento lateral. Existen varios métodos de navegación utilizados de forma tradicional en las tareas fotogramétricas y que tienen aplicación a la metodología planteada en el presente estudio, como son:

1. Navegación a simple vista con cartografía disponible.

Se representan los ejes de vuelo o pasadas y los puntos principales de los fotogramas, sobre los mapas-índices, con el menor error posible. Mediante UAV se podrá realizar a través de apoyo terrestre mediante una navegación guiada por puntos de referencia conocidos (puntos cardinales, alineamientos, etc.). En la fotogrametría tradicional el navegante tratará de seguirlos ayudado por las indicaciones de un telescopio de navegación, que permite usar referencias hacia adelante y hacia atrás.

2. Navegación a simple vista sin cartografía previa.

En casos donde la cartografía de la zona esté muy atrasada, sea inexacta o no exista se recurre a algún método "sin mapa", para obtener una completa cobertura fotográfica. Existen diversos métodos de navegación sin cartografía, entre los cuales están:

- Sobrevuelo a mayor nivel: Se usa este método cuando la zona de trabajo es relativamente pequeña (ciudades, áreas de ríos, pequeños proyectos de desarrollo, emplazamiento de presas, etc.).

Este método consiste en fotografiar inicialmente la zona de trabajo desde una gran altitud y a menor escala; esto podrá realizarse de modo que se obtengan los mejores resultados posibles. Sobre las fotografías obtenidas anteriormente, se marcan las pasadas fotográficas a la escala correcta elegida para el vuelo final, ejecutando el vuelo basándose en la información obtenida.

- Navegación de línea lateral: Es el método más simple desde el punto de vista de la planificación, pero exige un gran respaldo en cuanto a producción fotográfica.



Se basa en una o más pasadas principales que van a ser usadas para lo que se llama seguimiento de la línea lateral. De nuevo el bloque se planifica más grande de lo necesario.

Se realiza un vuelo de reconocimiento previamente para pruebas de exposición y planificación de la pasada principal. Efectuadas estas pruebas, se procede a la toma de las fotografías de la pasada principal con las especificaciones correctas para el vuelo; al final de la pasada la aeronave vuelve a la base y se procesan las fotografías. Se forma la pasada trazando una línea central (eje de vuelo) y a partir de ésta se trazan dos ejes paralelos con el recubrimiento lateral especificado. Una vez que están marcadas las dos nuevas pasadas se vuelve a realizar otro vuelo para la obtención de los fotogramas de las nuevas pasadas. El navegante usará como referencia para la toma de estas nuevas fajas, la línea del recubrimiento lateral, de esta forma tendrá una información terrestre visible en el área de recubrimiento. Efectuadas estas nuevas tomas, la aeronave vuelve a la base, se obtienen las fotografías y sobre estas nuevas tomas se repite el proceso.

3. Sistemas de navegación avanzados.

Los sistemas electrónicos de navegación están basados en el conocimiento de las coordenadas de la aeronave respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el planeamiento de vuelo. Dentro de estos sistemas destacan los siguientes:

- VLF/Omega: El usuario introduce la posición exacta del avión en coordenadas geográficas antes del despegue y los sistemas calculan los movimientos X e Y relativos a partir del despegue, presentando al usuario la posición y velocidad con respecto a la tierra y los errores de trayectoria, incluyendo la deriva. Este sistema se basa en el principio de "volar desde".



- Doppler: Basado en el radar Doppler y con el mismo principio que el anterior, este sistema controlado por el navegante mide la distancia y rumbo desde una posición de partida conocida.
- INS (Sistema de navegación inercial): Basado también en el principio de "volar desde", este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas X e Y desde un punto de partida conocido.
- La tecnología GNSS (Global Navigation Satellite System), cuyo sistema más conocido, que no el único, es el GPS (Global Positioning System) permite determinar las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre con gran precisión. El GPS en la actualidad es uno de los sistemas más utilizados en la realización de vuelos fotogramétrico, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección (X_0, Y_0, Z_0), permite la generación automática de los gráficos de vuelo.

Los sistemas más utilizados en UAVs son los sistemas de navegación avanzada como el GPS y el INS.

3.5.4 SOFTWARE

La fotointerpretación es una herramienta muy útil para realizar la cartografía de un área, ya que permite determinar los elementos que intervienen en el terreno y medir sobre fotografías.

El desarrollo de programas especializados en fotogrametría, han facilitado el proceso de restitución (lo cual se abordará en el capítulo 5). Por lo que para el posterior manejo de los datos y la elaboración de la cartografía se pueden utilizar tres tipos de programas:



- ✓ Los programas orientados al Diseño Asistido por Ordenador (CAD), que son herramientas de diseño capaces de generar dibujos 2D y modelados 3D, que se basan en entidades geométricas vectoriales como líneas, puntos, arcos y polígonos.
- ✓ Los programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten combinar y relacionar diferentes elementos georreferenciados en el espacio.
- ✓ Programas para Teledetección que además de captar imágenes aéreas georreferenciadas permiten recoger imágenes de diferentes bandas del espectro electromagnético. Esto quiere decir que se obtiene información de la superficie que a simple vista no se podría captar ya que nuestros ojos solo permiten ver el espectro visible. Dependiendo del procesamiento informático que se haga en cada una de las bandas espectrales se mostrarán unos elementos u otros.

CAPÍTULO 4.



*PROYECTO DE VUELO
FOTOGRAMÉTRICO*



4.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de obtener cartografía a una escala que sea suficientemente completa para el diseño de una obra, será necesaria la planificación y ejecución precisa del proyecto de vuelo y de todos aquellos aspectos implicados en el flujo de trabajo fotogramétrico. De la buena concepción de esta etapa dependerá la rapidez, comodidad y precisión del resto del trabajo.

La ejecución del vuelo fotogramétrico en la fotogrametría tradicional requiere de la intervención y la cuidadosa ejecución de un estricto programa de vuelo por parte de un profesional o equipo de profesionales. En cambio los UAV no requieren de personal muy capacitado para la ejecución del vuelo, además de ser posible realizarlo de forma autónoma o manual⁹.

4.2 CONCEPTO GENERAL

Se llama proyecto de vuelo fotogramétrico al conjunto de cálculos previos a la ejecución de un vuelo fotogramétrico, así como de todas las actividades topográficas requeridas para mejorar la precisión del mismo; mediante los cuales se organiza la operación para conseguir un producto fotogramétrico propuesto, con las condiciones establecidas.

Al realizar la planificación, hay que tener en cuenta todos los factores que inciden en el vuelo para evitar atrasos, errores y cambios de planes en los momentos críticos del vuelo. Un proyecto fotogramétrico se puede dividir en tres fases:

1. La planificación del vuelo que debe seguirse para la adquisición de las fotografías aéreas que se usarán en el proyecto.

⁹ Esto depende de las características del drone y del sistema utilizado para controlar la aeronave.



En la planificación de un vuelo existe una serie de decisiones previas tales como la escala del mapa, GSD buscado, sistema de coordenadas, elipsoide de referencia, etc., que han de tenerse en cuenta en el planeamiento, ya que afecta las condiciones del vuelo, así como otras condiciones que se refieren a la calidad de la fotografía tanto en su aspecto geométrico (escala, arrastre de la imagen, horas útiles de tomas fotográficas, etc.), como en el fotográfico (tipo de cámara).

En el presente estudio se partirá del hecho que la limitante principal es el drone a utilizar (Ver 1.6.3.2) seguida por el GSD.

2. El apoyo Topográfico, que incluye la planificación del control terrestre y la ejecución de todos los trabajos topográficos que aseguren la precisión requerida por el proyecto.
3. La ejecución del vuelo, que incluye todas las actividades a efectuarse durante la ejecución de las misiones de vuelo.

Habiéndose completado la planificación de las primeras dos fases, se podrá realizar una estimación de los costos que conllevarán las actividades, lo que permitirá replantear el proyecto de vuelo. Esta fase alternativa no se abarca en el estudio pero deberá incluirse al evaluar la factibilidad de la técnica.

Desde el punto de vista económico, la superficie que ha sido cubierta con el menor número de tomas fotográficas, para la escala elegida, tendrá un menor número de pares estereoscópicos, aumentando de esta forma el rendimiento al reducir el tiempo de procesamiento.

4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS

El proyecto de vuelo incluirá todo lo referente al dimensionamiento y configuración de la misión de vuelo y su ejecución, así como las actividades de apoyo terrestre que aseguren: la precisión del proceso de restitución, que el procesamiento descrito en el Capítulo 5 sea efectuado sin problemas y que se



obtengan los resultados esperados del uso de este tipo de técnica. Antes de iniciar se describen dos consideraciones previas a las actividades recién descritas como son la definición del sistema de referencia del proyecto y la definición de la escala del producto final buscado (en comparación a la fotogrametría analítica).

4.3.1 SISTEMA DE REFERENCIA

La primera indicación que se hace necesaria, y más en la actualidad es la de detallar el sistema de referencia en el que se desean obtener las coordenadas del trabajo.

En la posterior etapa de procesamiento de datos (Capítulo 5) se requiere conocer el sistema de coordenadas de las fotografías (escritas en el EXIF de las imágenes), así como de los puntos de apoyo (GCP) y puntos de control (Check Points) recolectados durante la fase del apoyo topográfico, donde se aclarará el significado de estos términos.

Un sistema de coordenadas es un conjunto de números y parámetros que se utiliza con el fin de definir la posición de cualquier objeto en el espacio 2D o 3D. El sistema de coordenadas elegido depende de las necesidades del usuario final.

Por lo general se podrán definir los siguientes sistemas de coordenadas para un proyecto:

- Sistema de coordenadas Global: Se definen mediante coordenadas 3D del elipsoide (latitud, longitud, altitud).
- Sistema de coordenadas Nacionales: Por lo general, se definen mediante una proyección definida para un país específico (X, Y, altitud).
- Sistema de coordenadas Local: Se definen mediante una proyección. El usuario establece el origen y la orientación en la que le es más conveniente (X, Y, altitud).



La altitud puede ser geométrica (utilizando como referencia el nivel del elipsoide) u ortométrica (utilizando como nivel de referencia el nivel medio del mar).

4.3.2 ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA

Si la limitante no fuera la resolución espacial (GSD), en primer lugar, habría que tener en cuenta la escala del producto final para saber a qué escala deberá capturarse el terreno en la toma fotogramétrica.

La escala es la relación entre la distancia de dos puntos en el dibujo y la distancia horizontal, medida en el terreno, entre los correspondientes dos puntos; entendiéndose por distancia horizontal a la medida longitudinal entre los dos puntos proyectados en el plano horizontal.

La elección de la escala de la fotografía (E_F) es entonces función de la escala de representación (escala del plano a representar) y del tamaño de los objetos que se pretenden detectar. La relación entre la escala de la imagen ($E_F=1/m_b$) y la del plano ($E=1/m_k$) que se trata de obtener por medios fotogramétricos, según la fotogrametría analógica y analítica, viene dada según el ábaco de la siguiente figura.

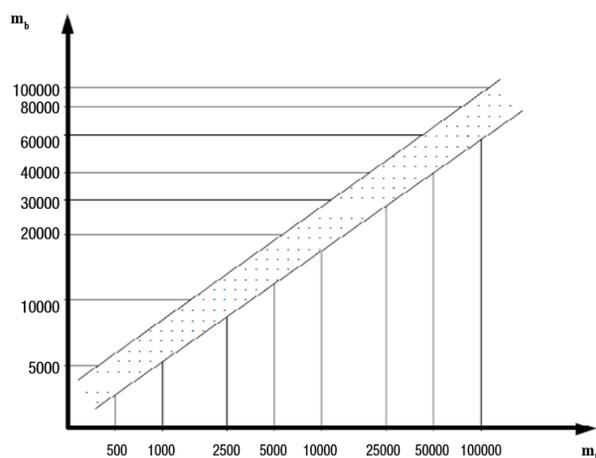


Figura 20. Relación entre escala fotográfica y cartográfica.

Fuente: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil por Elia Quirós Rosado.



La escala de una fotografía aérea (E_F) viene dada por la relación:

$$E_F = \frac{1}{m_b} = \frac{f_c}{H} \quad \text{Ec 4.1}$$

f_c = distancia principal o distancia focal de la cámara.

H = altura de vuelo sobre el terreno.

m_b = Escala de la fotografía.

En un perfil de terreno no llano existirán infinitos valores de escala. Por ello, al referirnos a la escala de un fotograma, lo estamos haciendo a un valor medio, respecto a un plano de referencia, elegido con criterio de que se encuentre equidistante, entre el plano tangente a las mayores elevaciones del terreno y la de mayores depresiones.

Será necesario calcular la escala de una fotografía digital (E_{FD}) en base a un parámetro interno de la cámara conocido como tamaño del pixel (medido en micrómetros), según la siguiente expresión:

$$E_{FD} = \frac{1}{m_b} = \frac{1}{(GSD \div T_p) \times 10^4} = \frac{T_p}{GSD} \times 10^{-4} \quad \text{Ec 4.2}$$

T_p = Tamaño del pixel (μm).

GSD = Representación del pixel en el terreno (cm).

m_b = Escala de la fotografía.

Ya que el dato altimétrico está referido al nivel medio del mar (H_0), se podrá conocer la escala de una fotografía con el referido indicador, restando de la altitud del plano de referencia el valor o altura del elemento (h) para obtener la altura de vuelo.

$$E_F = \frac{1}{m_b} = \frac{f_c}{H_0 - h} \quad \text{Ec 4.3}$$



H_0 = altura del plano de referencia o nivel del mar.

h = altura del objeto o elemento.

$H = H_0 - h$

4.4 PLAN DE VUELO (FASE 1)

La realización de los vuelos se realiza previa planificación considerando ciertos factores:

- Escala final de la fotografía aérea.
- Traslape longitudinal y transversal.
- Velocidad de vuelo.
- Características de la cámara fotográfica como distancia focal y formato del chasis de la cámara (al ser analógica) o capacidad de almacenamiento interno (al ser digital).
- Líneas de vuelo.
- Longitud media de las líneas de vuelo.

La determinación de los factores anteriores permitirá conocer los requerimientos de película¹⁰, la cobertura efectiva de terreno por toma, la distancia del isocentro longitudinal y lateral de cada fotografía, tiempos de vuelo y números de reabastecimientos; con lo que se diseña la altura de vuelo y el tiempo entre las capturas de la cámara. Ya que el plan de adquisición de imágenes tiene un alto impacto en la calidad de los resultados, es importante diseñarlo cuidadosamente.

El levantamiento fotogramétrico con UAV está limitado principalmente por el modelo de la cámara (tipo de lente y otras características internas) y el tiempo

¹⁰ La presente investigación se centra en la obtención de fotografías aéreas directamente en formato digital por lo que esta característica será fija y propia del tipo de cámara del drone (Véase 1.6.3.2).



máximo que la aeronave se puede mantener en el aire sin necesidad de reabastecerse.

Por estas limitantes, para cumplir con el GSD requerido en el proyecto, se requiere llegar a un acuerdo en la iteración de la altura de vuelo, traslape longitudinal y transversal entre fotografías y las dimensiones del área a cubrir en un vuelo.

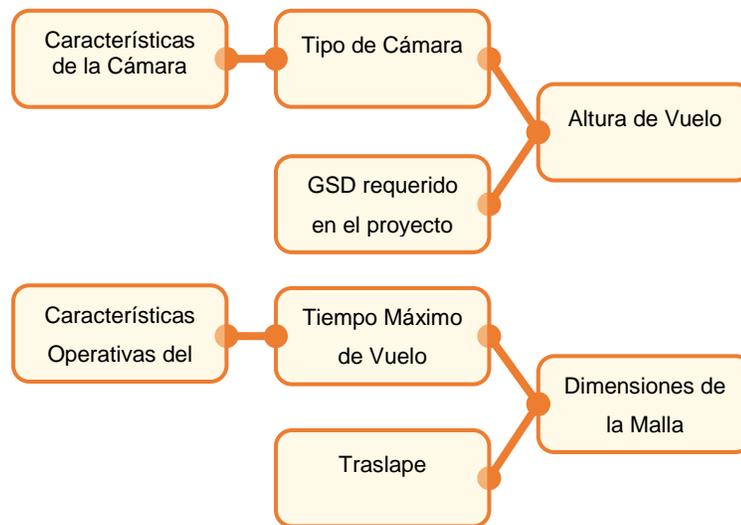


Figura 21. Factores que definen un vuelo fotogramétrico.
1er Nivel: Limitantes de los UAV; 2do Nivel: Factores que definen el plan de Vuelo; 3er Nivel: Plan de Vuelo. Fuente: Grupo de tesis.

Por las limitantes anteriores, para la definición de un vuelo fotogramétrico se propone seguir la siguiente directiva:

- 1) Definición del GSD como punto de partida. El cual se plantea según los requerimientos de precisión del proyecto.

Intervienen:

- Parámetros de la cámara. El estudio de esta limitante define la **Altura de Vuelo Máxima** según la resolución de la fotografía.
- 2) Selección del traslape Longitudinal y Transversal. Según los requerimientos de cobertura de las fotografías sobre el terreno, así como de la disposición de



la topografía de la zona (Terreno Montañoso, Cobertura vegetal densa, planicies, etc.).

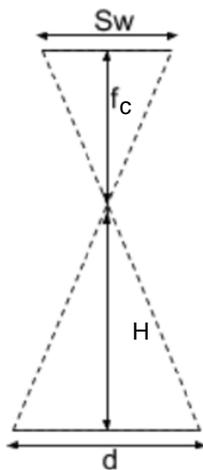
- 3) Dimensionamiento del área a cubrir en el vuelo. Definidas las condicionantes anteriores se procede a establecer las dimensiones del área de vuelo tomando en consideración la altura de vuelo seleccionada, traslape entre capturas fotográficas y las características operativas de la aeronave.

Intervienen:

- Características de la Aeronave. El estudio de esta limitante define el **Tiempo de Vuelo Máximo** según la duración máxima de la aeronave sin necesidad de reabastecerse y la velocidad operativa del UAV.

Se podrá partir desde cualquier otra variable (distinta al GSD) para iniciar la definición del plan de vuelo como la altura de vuelo requerida, traslape, dimensiones de la malla y si el drone a utilizar no fuera limitante este también podría ser un punto de partida.

4.4.1 GSD Y ALTURA DE VUELO



- S_w = anchura del sensor óptico (mm).
- f_c = distancia focal (mm).
- H = altura de vuelo (m).
- d = distancia cubierta en el suelo por una imagen (m).

Figura 22. Cálculo de la altura de vuelo.

Fuente: Proyecto fin de Carrera - Generación de mapas 3D a partir de imágenes aéreas - Juan Jesús Ruiz.



De la ecuación 4.1, una vez determinada la escala de la imagen y conocida la distancia focal de la cámara, la altura de vuelo se calcula como:

$$E = \frac{S_w}{d} = \frac{f_c}{H} = \frac{1}{m_b}$$

$$H = m_b f_c$$

Ec 4.4

Otro método para calcular la altura de vuelo depende del GSD (Ground Sample Distance). Este término es usado en fotografía digital para hacer referencia a la distancia entre el centro de píxeles adyacentes medido desde tierra y utilizando unidades de medidas relativas. Debido a que un píxel es cuadrado, el área que cubrirá cada píxel será:

$$\text{Area} = \text{GSD} \times \text{GSD} \text{ (cm/píxeles)}^2$$

Ec 4.5

El GSD no es equivalente con la resolución de la imagen tomada ya que depende de la resolución de la cámara y la altura de vuelo. Mientras mayor sea el valor del GSD menor será la resolución espacial de la imagen y se percibirán menos detalles.

Una vez se ha fijado la resolución por píxel, la altura de vuelo a la que se tomarán las imágenes (que depende de la distancia focal de la cámara, de las dimensiones del sensor y el GSD) se calcula de la siguiente manera:

Si se establecen triángulos semejantes se deduce la siguiente relación:

$$H = \frac{f_c \times d}{S_w}$$

Ec 4.6

La distancia cubierta en el suelo por una imagen captada desde el aire viene dada por la resolución/píxel así como por el tamaño de la imagen en píxeles:



$$d = \text{Ancho}_{\text{Imagen}} \times \text{GSD} \quad \text{Ec 4.7}$$

GSD = Ground Sample Distance (cm/píxel)

Ancho_{Imagen} = Ancho de la imagen (píxel)

Si se combinan las expresiones anteriores se tiene:

$$H = \frac{f_c \times \text{Ancho}_{\text{Imagen}} \times \text{GSD}}{S_w \times 100} \quad \text{Ec 4.8}$$

$$\text{GSD} = \frac{H \times S_w \times 100}{f_c \times \text{Ancho}_{\text{Imagen}}} \quad \text{Ec 4.9}$$

Esta expresión relaciona la máxima altura de vuelo (medida en metros) desde donde podemos realizar las fotografías para cumplir los requisitos de resolución por píxel.

Vuelos de mapeado 3D tratan con resoluciones en el rango de 1 a 10 cm/píxel y alturas de vuelo entre 80 y 200 metros. Sin embargo, muchas veces la altura máxima de vuelo es un factor limitante en el caso de utilizar UAVs, por lo que habrá que llegar a un equilibrio entre la altura de vuelo y el GSD.

Al momento de realizar el estudio no se cuenta con ningún reglamento o legislación que rijan el techo máximo permitido a este tipo de aeronaves ni su uso civil dentro del espacio aéreo del país.

4.4.1.1 CONSIDERACIÓN DEL GSD Y ALTURA DE VUELO

En la fotogrametría digital, por lo general se recomienda (para el procesamiento) que las imágenes sean capturadas a la misma altura de vuelo, ya que tendrían el mismo GSD si se usara la misma cámara. Esto significa que todas las imágenes tendrán el mismo nivel de detalles y facilita la coincidencia de puntos significativos entre las imágenes y por lo tanto, ayuda a la reconstrucción.



Sin embargo, Pix4Dmapper también puede procesar imágenes con diferentes GSD siempre que el más alto GSD sea menor que dos veces el más bajo GSD. Teniendo en cuenta que la altura de vuelo y el GSD tienen una relación lineal, para el mismo proyecto, capturado con la misma cámara, la mayor altura de vuelo en que se toman las imágenes no deben exceder de dos veces la menor altura de vuelo:

$$GSD_1 \leq 2 \times GSD_2 \quad \text{Ec 4.10}$$

Sustituyendo:

$$\frac{H_1 \times S_w \times 100}{f_c \times \text{Ancho}_{\text{Imagen}}} \leq 2 \frac{H_2 \times S_w \times 100}{f_c \times \text{Ancho}_{\text{Imagen}}}$$

$$H_1 \leq 2 \times H_2 \quad \text{Ec 4.11}$$

GSD = Distancia representativa en el terreno (cm/pixel).

H = altura de vuelo (m).

Si se cubriera en un mismo vuelo una zona con variaciones de elevaciones (Figura 23) se podrá obtener otra limitante en relación a las elevaciones absolutas de las zonas a capturarse.

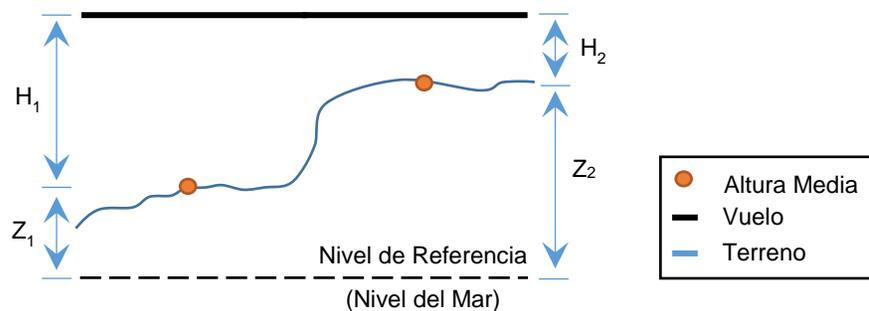


Figura 23. Vuelo en terreno con variaciones de elevación.

Fuente: Grupo de tesis.

$$H_2 \geq Z_2 - Z_1 \quad \text{Ec 4.12}$$



Z = Elevación media de la zona del terreno (m).

H_2 = altura de vuelo menor (m).

4.4.2 RECUBRIMIENTOS O TRASLAPES

El objeto de los recubrimientos fotográficos es el de poder aplicar el principio de la visión estereoscópica a los fotogramas aéreos. La parte común entre dos fotografías consecutivas es el modelo estereoscópico, debiendo poderse enlazar estos modelos tanto longitudinalmente como transversalmente. Para vuelos fotogramétricos tradicionales y en condiciones ideales se recomiendan los recubrimientos siguientes:

Tabla 11. Recubrimiento recomendado para vuelos fotogramétricos.

Fuente: Pliegos de Prescripciones Técnicas para la ejecución de trabajos fotogramétricos de la Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Fomento de España.

Tipo de terreno	Recubrimiento %	
	Longitudinal	Transversal
Llano	60	25
Ondulado	65-70	25-30
Montañoso	70-80	30-35

Otros autores recomiendan que el recubrimiento requerido para la mayoría de los casos es 75% en la dirección de vuelo y un 50% de solapamiento lateral. Sin embargo, en terrenos difíciles tales como bosques, zonas de nieve o campo abierto estas cifras aumentan hasta el 85% y 60%¹¹. En la figura se esquematiza el traslape longitudinal y transversal y la proyección de las tomas fotográficas.

¹¹ Tomado de Proyecto fin de Carrera - Generación de mapas 3D a partir de imágenes aéreas por Juan Jesús Ruiz.

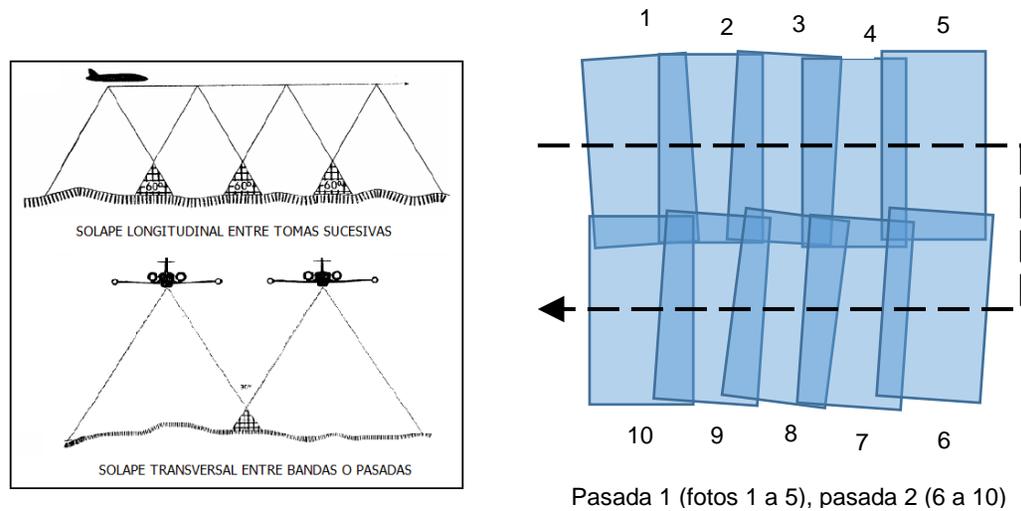


Figura 24. Solape longitudinal y transversal.
(Izq.) Vista en elevación de vuelo. (Der.) Proyección vertical de dos pasadas con traslape longitudinal y transversal. **Fuente:** Grupo de tesis.

4.4.2.1 REQUISITOS PARA LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA DE FOTOGRAFÍAS

Para una visión plana en fotografía el traslape debe estar entre el 30% y 40%, y para una visión estereoscópica el traslape mínimo es del 60%.

En visión binocular artificial se toman dos fotografías tomadas desde dos puntos de vista diferentes, cada una observada monocularmente (la fotografía izquierda con el ojo izquierdo y la derecha con el ojo derecho o viceversa) llegando al cerebro dos imágenes diferentes de un mismo objeto que producen una imagen tridimensional.

En dichas imágenes debe ser posible la acomodación y la convergencia de modo similar a como ocurre en el caso de la visión binocular normal, por lo cual dentro de la fotogrametría (principalmente la analítica) las fotografías deben satisfacer ciertas condiciones.



4.4.2.2 RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL

Considerando la situación ideal donde el eje principal está estrictamente vertical y el terreno es llano y horizontal. Si una aeronave vuela en línea recta y a una altitud constante, toma una serie de fotografías a intervalos iguales ($O_1, O_2, O_3, \dots O_n$), estas fotos se alinean formando una banda o pasada fotográfica.

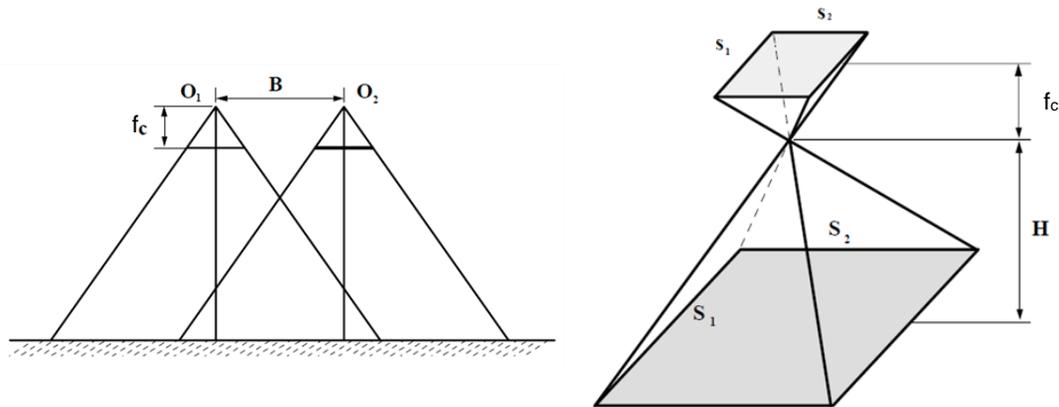


Figura 25. Recubrimiento longitudinal en tomas consecutivas.
(Izq) Toma fotográfica de un modelo. (Der) Superficie cubierta por una fotografía.
Fuente: Apuntes de Fotogrametría III (2001) por Juan Antonio Pérez Álvarez.

De la geometría de la figura se puede deducir que: $S_1 = m_b s_1$ y $S_2 = m_b s_2$ ¹². La distancia que recorrerá la aeronave entre dos exposiciones consecutivas se denomina Base (B); dos fotos sucesivas tendrán una parte común si $B \leq S_1$, pero para que todo punto de la zona cubierta aparezca dos veces es necesario que $B < S_1/2$. La Base se obtiene entonces:

$$B = S_1(1 - p) = s_1 m_b (1 - p) = s_1 m_b \left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \quad \text{Ec 4.11}$$

$p\%$ = Recubrimiento longitudinal expresado en porcentaje.

¹² El termino m_b se refiere a la escala de la fotografía. Concepto descrito en 4.3.1



La forma y dimensiones de la superficie del terreno cubierta por las fotos son función de:

- La inclinación del eje vertical; si el eje de la cámara está inclinado, la superficie cubierta será trapezoidal (Figura 26a).
- Variaciones en la altura de vuelo (Figura 26b).
- El relieve del terreno; la superficie se deforma de modo regular (Figura 26c).

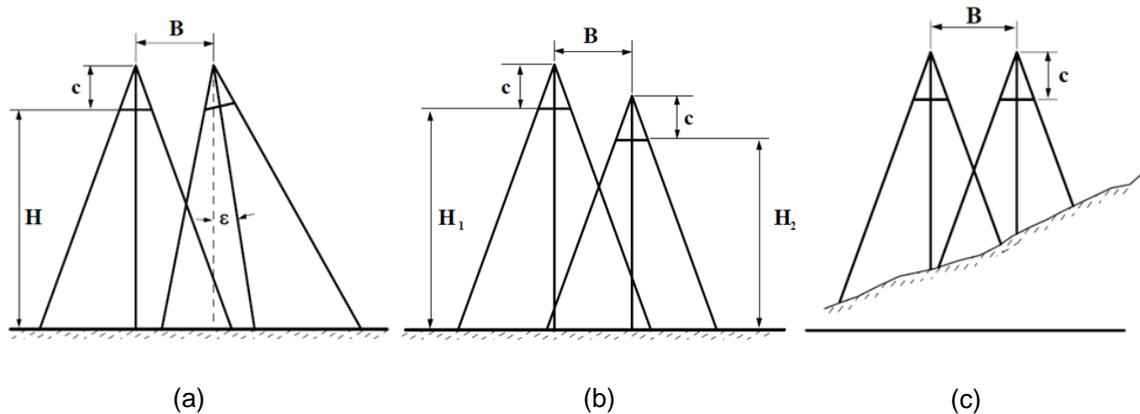


Figura 26. Variaciones en el traslape entre pares estereoscópicos.
Fuente: Apuntes de Fotogrametría III (2001) por Juan Antonio Pérez Álvarez.

Estas variaciones de forma no deben causar defectos de recubrimiento estereoscópico, escogiéndose para B un valor que considere el relieve del terreno y las situaciones planteadas. Tratando de no aumentar este margen, para mantener al mínimo el número de pares y aumentar el rendimiento sin afectar la precisión. El recubrimiento longitudinal (p%) se fija normalmente con una tolerancia de $\pm 5\%$.

4.4.2.3 RECUBRIMIENTO TRANSVERSAL

El recubrimiento transversal es la distancia entre pasadas o bandas. Por la necesidad de cubrir un territorio extenso es preciso hacer varias bandas



dispuestas lateralmente respecto a la primera, estas deben ser paralelas y recubrirse de modo que no exista ningún hueco en la cobertura.

El recubrimiento lateral ($q\%$) deberá ser mínimo para disminuir en lo posible el número de pares, siendo A la distancia entre dos ejes de vuelo adyacentes, es preciso en terreno llano que $A < S_2$. A se obtiene entonces:

$$A = S_2(1 - q) = s_2 m_b(1 - q) = s_2 m_b \left(1 - \frac{q\%}{100}\right) \quad \text{Ec 4.12}$$

Los defectos de recubrimiento lateral pueden ser resultado de:

- La Inclinación del eje transversal.
- El relieve del terreno.
- Errores en el mantenimiento de la altitud.
- Error en la apreciación de la magnitud A .
- Error en la corrección de la deriva.
- Errores en el mantenimiento de una ruta constante.

4.4.2.4 TIPO DE PROYECTO Y AJUSTE DEL TRASLAPE

Un software de procesamiento de imágenes se basa en la búsqueda de forma automática de puntos comunes entre las imágenes con los cuales se generará un punto 3D. Cuando existe una gran superposición entre 2 imágenes, la zona común capturada es más grande y se podrá identificar más puntos significativos entre sí. Cuantas más coincidencias, se calcularán puntos 3D más precisos. Por lo tanto, la regla principal es mantener un alto traslape entre las imágenes.

Vuelos realizados con drones, y especialmente aquellos realizados a baja altura, así como los destinados a ser procesados digitalmente requerirán ciertas consideraciones relativas al traslape con el fin de poder realizar la restitución del modelo estereoscópico durante la etapa de procesamiento. Estas vienen orientadas a evitar cualquier falla:



- De cobertura, raíz de un traslape deficiente ocasionado por cualquier desplazamiento (deriva de vuelo) o giro durante la toma de alguna fotografía, producido por el viento o por problemas con el sistema de navegación, que cause problemas en la cobertura con la fotografía posterior o anterior o con su correspondiente lateral en líneas de vuelo consecutivas.
- De coincidencias, raíz de los escasos puntos identificables durante la etapa de procesamiento. Usualmente ocasionado por tomas a baja altura y/o capturas de cuerpos de agua y vegetación densa donde es difícil encontrar coincidencias.

De lo anterior el plan de adquisición de imagen ideal y el traslape a utilizar dependerá del tipo de terreno u objeto a ser reconstruido. A continuación se describen diferentes directrices para la adquisición de imágenes en 8 diferentes casos aplicables dentro del trabajo topográfico. A pesar de que la restitución puede funcionar con un menor traslape a los señalados a continuación, con el fin de obtener los mejores resultados posibles, se sugiere utilizar los solapamientos recomendados.

Para los siguientes casos se deben aplicar las consideraciones mencionadas anteriormente si no se señala lo contrario:

- 1) **Caso General:** Es aplicable a proyectos que no incluyen elementos difíciles de reconstruir como bosques, cuerpos de agua (lagos, ríos, lagunas, etc.), campos agrícolas y/o nieve. La superposición recomendada para la mayoría de los casos es de al menos 75% de solapamiento frontal (con respecto a la dirección de vuelo) y al menos 60% de superposición lateral (entre las líneas de vuelo). Se recomienda:
 - Tomar las imágenes con un patrón de cuadrícula regular (Figura 27).
 - Mantener la cámara, en lo posible, a una altura constante sobre el terreno/objeto para garantizar el GSD deseada.

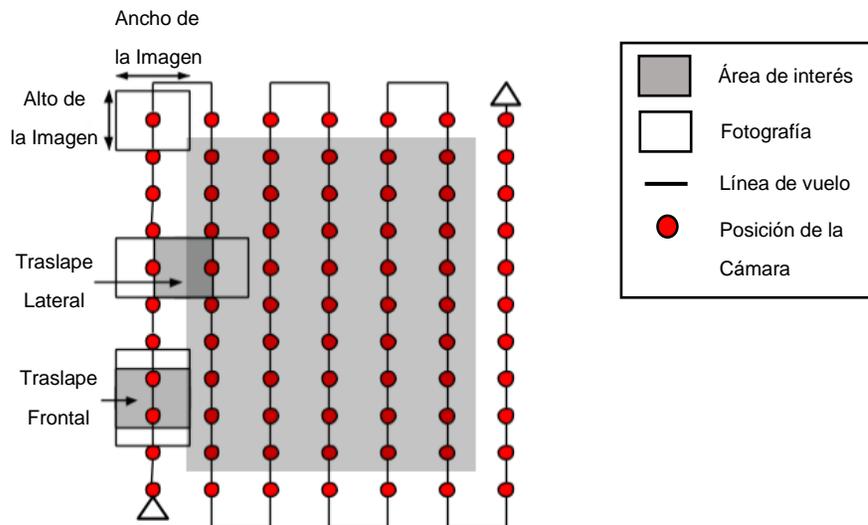


Figura 27. Patrón de vuelo fotogramétrico tradicional.

Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

2) **Bosques y vegetación densa:** Los árboles y la vegetación densa a menudo tienen una apariencia muy diferente entre las imágenes traslapadas debido a su compleja geometría (miles de ramas y hojas). Por lo tanto, es difícil extraer puntos característicos comunes (puntos clave) entre las imágenes. Para lograr buenos resultados, se recomienda utilizar un plan de adquisición de imágenes en rejilla como el descrito en el caso general con algunas consideraciones adicionales:

- Aumentar la superposición entre las imágenes al menos a 85% de superposición frontal y 70% de superposición lateral.
- Aumentar la altura de vuelo. A mayor altitud, hay menos distorsión de la perspectiva (por lo tanto causando menos problemas de apariencia) y la vegetación densa tiene mejores propiedades visuales. En otras palabras, es más fácil de detectar similitudes visuales entre las imágenes superpuestas en tales áreas. Algunos autores señalan que los mejores resultados en la restitución de terrenos con características similares se obtienen con un GSD mayor que 10 cm/píxel.



3) **Terrenos planos con campos de la agricultura:** En casos donde el terreno es plano con contenido visual homogéneo como campos dedicados a la agricultura, es difícil extraer puntos característicos comunes (puntos clave) entre las imágenes. Para lograr buenos resultados, se recomienda utilizar un plan de adquisición de imágenes en rejilla como el descrito en el caso general mediante la aplicación de los siguientes cambios:

- Aumentar la superposición entre las imágenes al menos a 85% de superposición frontal y 70% de superposición lateral.
- Volar más alto. En la mayoría de los casos, volando más alto se mejoran los resultados.
- Tener una precisa geolocalización de las imágenes.

4) **Reconstrucción de edificios:** La reconstrucción de edificios en 3D requiere un plan de adquisición de imagen específica (Figura 28):

- Realizar un vuelo alrededor de la construcción en primera instancia con un ángulo de la cámara de 45°.
- Volar una segunda y tercera vez alrededor del edificio aumentando la altura de vuelo y disminuyendo el ángulo de cámara con cada ronda.
- Se recomienda tomar una imagen cada 5-10 grados para asegurar un solapamiento suficiente, dependiendo del tamaño del objeto y la distancia a la misma. Distancias pequeñas y objetos más grandes requieren que la captura de imágenes se haga cada vez con menos grados.

Es posible combinar imágenes aéreas nadir y/u imágenes aéreas oblicuas y/o imágenes terrestres. Las imágenes deben tener suficiente superposición en cada conjunto de datos y entre conjuntos de datos.

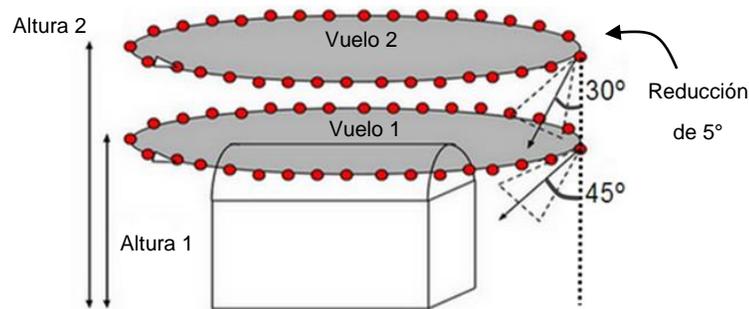


Figura 28. Patrón de vuelo fotogramétrico circular.

Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

- 5) **Casos especiales:** Estas consideraciones son aplicables para algunos terrenos difíciles de trazar como terrenos con nieve, arena y cuerpos de agua (océanos, lagos, ríos, etc.).
- Nieve y arena: La nieve y la arena tienen poco contenido visual debido a las áreas uniformes de gran tamaño. Por lo tanto:
 - Aumentar la superposición entre las imágenes al menos a 85% de superposición frontal y 70% de superposición lateral.
 - Establecer los ajustes de exposición con el fin de obtener el mayor contraste posible en cada imagen.
 - Cuerpos de agua: Las superficies de agua casi no tienen contenido visual debido a las grandes zonas uniformes. El reflejo del sol sobre el agua y las olas no se puede utilizar para la coincidencia visual. Por lo que:
 - Los océanos son imposibles de reconstruir.
 - Para reconstruir otras superficies de agua tales como ríos o lagos, cada imagen tiene que tener zonas de la tierra. Volar más alto puede ayudar a incluir más zonas de la tierra.
- 6) **Mapeo de Corredores:** El mapeo de corredores tales como ferrocarriles, carreteras o ríos requiere al menos 2 líneas de vuelo (Figura 29a).



- Para vuelos con únicamente dos líneas se recomienda utilizar al menos 85% de solapamiento frontal y al menos 60% de superposición lateral.
- Es posible utilizar imágenes nadir o imágenes oblicuas con un ángulo entre 0° y 45° apuntando en ambas pasadas al centro del corredor (para terreno llano, se recomienda el uso de imágenes de nadir).

Si un plan de adquisición de imágenes de dos pasadas no es posible, puede usarse un plan de adquisición de una sola línea (Figura 29b) de vuelo si:

- La superposición es lo suficientemente alta: Al menos el 85% de solapamiento frontal.
- Puntos de apoyo terrestre (GCP) se definen a lo largo de la línea de vuelo.

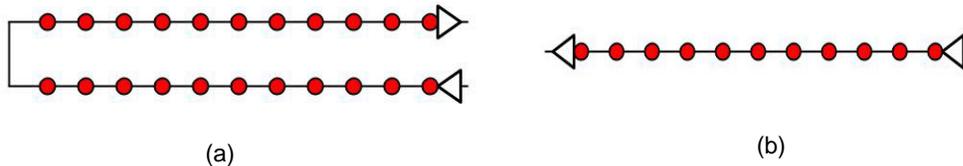


Figura 29. Patrón de vuelo propuesto para corredores.
(a) Patrón de vuelo de dos líneas. (b) Patrón de vuelo de una sola pasada.
Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

7) **Múltiples vuelos:** Si las características de la aeronave no permiten la adquisición de todas las fotografías necesarias para cubrir la zona de interés en un solo vuelo, se deberán ejecutar los vuelos necesarios y procesar las imágenes tomadas en varios vuelos. En el diseño de los diferentes planes de adquisición de imágenes se debe comprobar que:

- En cada plan de captura las imágenes se tomaron con el suficiente traslape (según se establece en los numerales anteriores).
- Hay suficiente superposición entre los 2 planes de adquisición de imágenes (Figura 30). Este criterio facilitara la reconstrucción en conjunto de ambos vuelos.

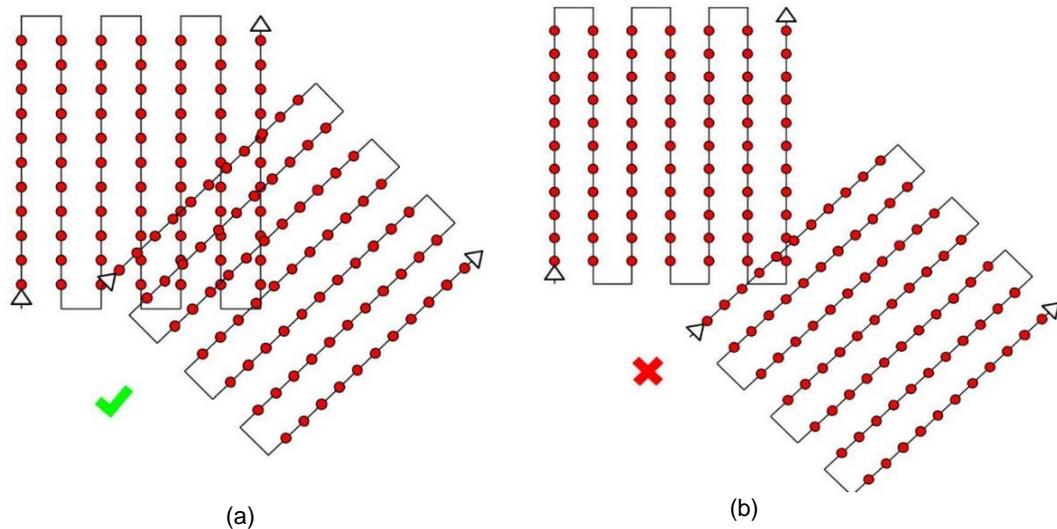


Figura 30. *Traslape entre misiones múltiples.*
(a) *Suficiente traslape entre vuelos.* (b) *Traslape insuficiente entre vuelos.* **Fuente:**
Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

- Los diferentes planes se toman tanto como sea posible en las mismas condiciones (dirección del sol, condiciones meteorológicas, sin nuevas construcciones, etc.).
 - La altura de vuelo no debe ser demasiado diferentes entre los vuelos, ya distinta altura conduce a diferente resolución espacial.
- 8) **La reconstrucción de una ciudad (fachadas visibles).** La reconstrucción en 3D de áreas urbanas requiere:
- Un plan de adquisición de imágenes de rejilla doble, esquematizado en la Figura 31, de manera que todas las fachadas de los edificios (norte, oeste, sur, este) sean visibles en las imágenes.
 - El traslape debe ser el mismo que en el caso general.
 - Para las fachadas sean visibles, las imágenes deben ser tomadas con un ángulo de entre 10° y 35° . Si se necesita mucho detalle, se deben combinar imágenes aéreas y terrestres. Es posible combinar imágenes aéreas nadir y/u imágenes aéreas oblicuas y/o imágenes terrestres.



- Las imágenes deben tener suficiente superposición en cada conjunto de datos y entre conjuntos de datos.

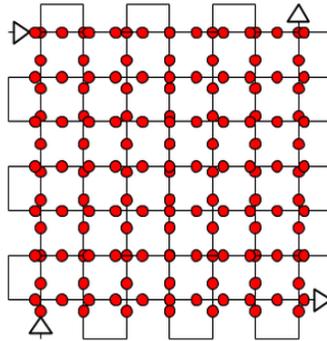


Figura 31. Plan de vuelo de rejilla doble.

Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

4.4.2.4.1 CASOS ADICIONALES

Algunas situaciones que pueden presentarse y que no exhiben una relación directa con trabajos topográficos son:

- 1) **Reconstrucción 3D de interiores.** Para la reconstrucción de interiores en edificios se recomienda:
 - El uso de imágenes terrestres.
 - Tener alta superposición (90%). Por lo tanto, se recomienda utilizar una cámara de lente de ojo de pez.
 - Colocar puntos de coincidencia manuales durante el procesamiento (Manual Tie Points) lo que permite mejorar la reconstrucción y ayuda a ajustar correctamente el modelo.
- 2) **Reconstrucción mixta:** Es posible combinar imágenes aéreas nadir y/u imágenes aéreas oblicuas y/o imágenes terrestres.

Las imágenes deben tener suficiente superposición en cada conjunto de datos y entre conjuntos de datos. Para estos casos se recomienda encarecidamente



el uso de GCP o Manual Tie Points para ajustar adecuadamente los diferentes conjuntos de imágenes.

3) Reconstrucción de objetos verticales grandes: La reconstrucción 3D de objetos como las torres de energía, turbinas de viento, etc. requiere un plan de adquisición de imagen específica (figura 32):

- Volar cerca de la estructura.
- Volar alrededor de la estructura varias veces a diferentes alturas (Puede ser formando una espiral o círculos a diferentes alturas).
- Las imágenes deben ser tomadas con un alto grado de superposición. 90% de solapamiento entre las imágenes tomadas a la misma altura y 60% de solapamiento entre las imágenes tomadas en diferentes alturas.
- El ángulo óptimo de la cámara para el círculo superior es de 45 grados. Al señalar al suelo, el contenido de las imágenes es más fácil de ser emparejado y los resultados son mejores.
- Las imágenes deben estar lo más enfocadas posibles (se debe enfocar tanto el objeto principal como el fondo).
- Se recomienda tomar imágenes georreferenciadas.

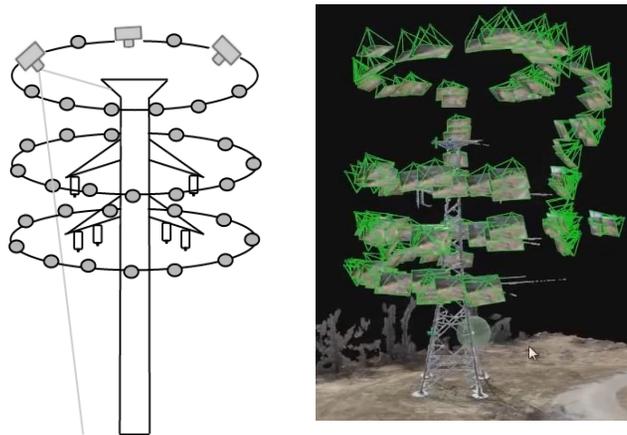


Figura 32. Plan de vuelo circular aplicado a elementos verticales altos.
Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.



4) Reconstrucción de un túnel: El mayor desafío para la reconstrucción del túnel es la condición de la iluminación. Si la iluminación es buena, ya sea con luz natural (si el túnel no es demasiado largo) o con la luz técnica, la reconstrucción podría ser muy buena. Se recomienda:

- En el caso de túneles muy oscuros, se recomienda utilizar un trípode.
- Usar cámara con un lente ojo de pez.
- Tomar imágenes en más de una línea. Si un plan de adquisición de imágenes de múltiples líneas no es posible, se podrá usar un plan de una sola línea y se recomienda la utilización de GCP en este caso.

4.4.2.5 CONSIDERACIONES DEL PLAN DE VUELO Y LAS VARIACIONES EN ALTURA

Cuando se planifica un proyecto sobre un terreno que presenta variaciones de altura, el plan de vuelo se puede realizar de 3 maneras como se muestra en la figura:

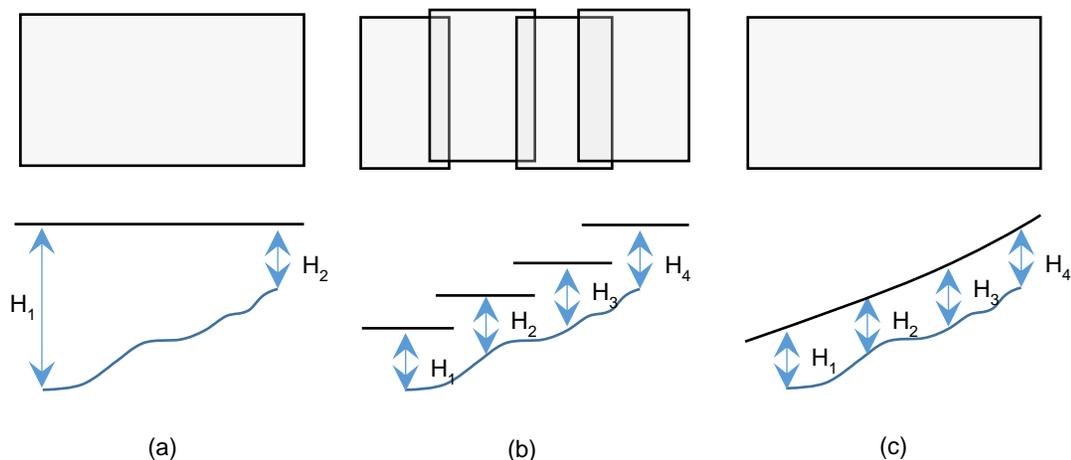


Figura 33. Plan de adquisición de fotografías en terrenos con variación del relieve.

(a) Vuelo único a altitud constante. (b) Vuelos múltiples a distintas alturas constantes. (c) Vuelo único siguiendo la variación en la elevación del terreno.



1. Ejecutando un solo vuelo a una altura constante independientemente de los cambios de altitud en el terreno (Figura 33a). Como consecuencia que la diferencia de altura entre el drone y el terreno no se mantiene se tendrá una variación del GSD en el proyecto (mayor en el punto más bajo) y en el traslape (se reducirá en el punto más alto si no se modifica el tiempo entre cada captura). Se debe procurar que se cumpla lo descrito en 4.3.2.1 para evitar que el proceso de reconstrucción falle.
2. Ejecutando varios vuelos a diferentes alturas (Figura 33b). Estos deberán ejecutarse con las líneas de vuelo perpendiculares a la pendiente del terreno y será importante mantener un buen traslape entre vuelos. Para este caso el GSD se mantendrá casi constante para el proyecto, ya que la diferencia de altura entre el drone y el terreno será casi constante.
3. Realizando un vuelo único siguiendo la variación de la elevación del terreno (Figura 33c). Este método brinda mejores resultados ya que el GSD se mantendrá constante para el proyecto porque la diferencia de altura entre el drone y el terreno es casi constante.

Para terreno accidentado se ha de adoptar una cadencia de exposiciones variables, función del perfil del terreno a lo largo del eje de vuelo, ya que si se usa un intervalo constante, para las altitudes del terreno superiores a las del nivel de referencia, se tendrán recubrimientos insuficientes en las partes altas y excesivos en las bajas.

4.4.3 DIMENSIÓN DE LA MISIÓN DE VUELO

Una vez definida la altura media de vuelo y el traslape entre capturas fotográficas que se desea para el proyecto se hace necesario definir las dimensiones del área a cubrir en un vuelo y la cantidad de misiones requeridas para cubrir la zona del proyecto.



El software utilizado para la restitución fotogramétrica y el procesamiento de las imágenes (Pix4DMapper) ofrece una aplicación para dispositivos móviles y tabletas con sistema Android descargable de forma gratuita en la Play Store de Google y de la App Store para sistemas iOS, que permite seleccionar las variables ya planteadas en los numerales anteriores, dimensionar la malla de cada vuelo y calcular el tiempo requerido para realizar la misión.

Tabla 12. Requerimientos de la Aplicación Pix4D Capture desarrollada por Pix4D para el control de la misión de Mapeo.

Sistema	 iOS 9.0 o superior	 Android 4.0 o superior
Versión	1.3.0	3.0.1
Tamaño	38.7 MB	32 MB
Drones Compatibles	<ul style="list-style-type: none"> • DJI Inspire 1 e Inspire 1 Pro (I1). • DJI Phantom 3 Advanced (P3A). • DJI Phantom 3 Professional (P3P). • DJI Phantom 3 Standard (P3S). • DJI Phantom 4 (P4). • Todos los drones de DJI que trabajan con SDK 3: Sin probar. Pix4D no garantiza el funcionamiento con otros drones. • Parrot Bebop 2 (B2). • Para el control del DJI Phantom 2 Vision (P2V) y DJI Phantom 2 Vision+ (P2V+) se requiere de la aplicación Pix4Dcapture P2V (+) Release 0.4. 	<ul style="list-style-type: none"> • DJI Inspire 1 y Inspire 1 Pro (I1): beta. • DJI Phantom 2 Vision (P2V). • DJI Phantom 2 Vision+ (P2V+). • DJI Phantom 3 Advanced (P3A): beta. • DJI Phantom 3 Professional (P3P): beta. • Parrot Bebop 2 (B2): beta. • 3DR Solo (Solo): beta
Modos de Mapeo	<ul style="list-style-type: none"> • GRID MISSION para mapeo tradicional. • DOUBLE GRID MISSION (Solo iOS). 	<ul style="list-style-type: none"> • GRID MISSION para mapeo tradicional. • FREE FLIGHT MISSION para mapeo vertical de objetos con control manual de vuelo.



4.4.3.1 PIX4D CAPTURE APP

Esta aplicación da soporte principalmente a los drones de DJI (Figura 34) y permitirá incluir los parámetros descritos en el capítulo y generar una un plan de vuelo que pueda ejecutarse sin riesgos con el UAV.



Figura 34. Drones soportados por Pix4D Capture App.

Fuente: <https://pix4d.com/product/pix4dcapture-app/> Recuperado de sitio web de Pix4D en junio de 2016.

Este software permite diseñar el plan de adquisición de imágenes dados algunos parámetros (área de interés, ángulo de la cámara, el porcentaje de superposición entre las imágenes, altura de vuelo, etc.). En este caso, las imágenes se toman automáticamente por el UAV de acuerdo con el plan de adquisición de imágenes seleccionadas sin intervención del usuario.

Al inicio se requerirá crear una cuenta de usuario en el dispositivo (Figura 35), a continuación solicita seleccionar de una lista el drone a utilizar (solo la primera vez y posteriormente se podrá modificar esta configuración).

Una vez seleccionado se muestra el menú principal (Figura 36) donde se puede elegir entre realizar un vuelo “libre” que permite tomar fotografías al cubrir ciertos intervalos de desplazamiento vertical y horizontal y un vuelo en rejilla automatizado al cual se le configura la altura de vuelo, porcentaje de traslape de las fotografías (la aplicación define la distancia entre líneas de vuelo como 2 veces la distancia longitudinal entre capturas fotográficas), las dimensiones de la rejilla y a grosso modo la velocidad de vuelo (de lento a rápido).



La selección de una u otra opción dependerá del tipo de proyecto. Para topografía generalmente se obtienen mejores resultados siguiendo el patrón de rejilla tradicional y será el plan de adquisición utilizado en ésta investigación. En esta etapa el tiempo máximo de vuelo se vuelve la única limitante, siendo establecida según las características de la aeronave.

Para cambiar el modelo de dron seleccionado se deberá ingresar a la configuración general (Presionando  Settings en el menú principal) donde también se podrán modificar otras opciones como el sistema de unidades mostradas, decidir si la misión de vuelo se sincronizará una vez realizada, seleccionar la carpeta de destino de los archivos que creará la aplicación en el dispositivo, la opción de activar la aceleración del hardware y activar el “modo avanzado” que permitirá tener más libertad en la configuración de la misión (respecto al traslape, altura de vuelo, ángulo de la cámara y la velocidad del dron).

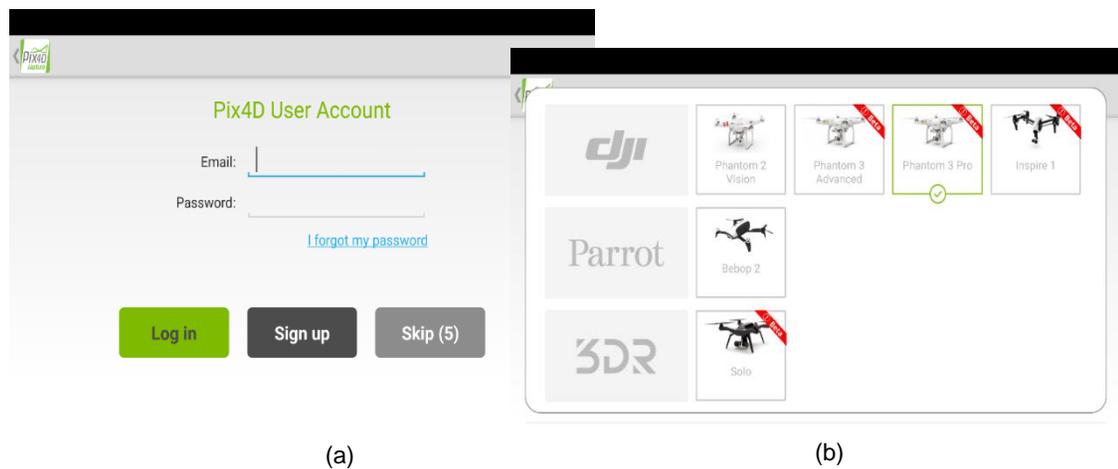


Figura 35. Configuración inicial de Pix4D Capture.

(a) Ventana de configuración de la cuenta de usuario. (b) Ventana de selección del modelo de dron.

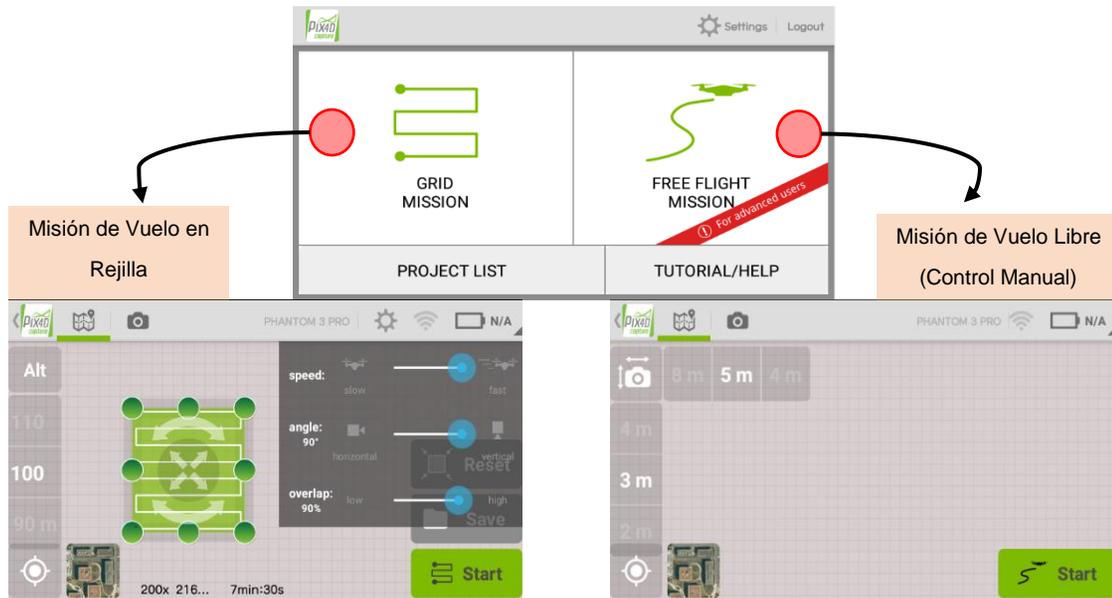


Figura 36. Menú principal de Pix4D Capture y tipos de misiones disponibles.

4.4.3.1.1 CONFIGURACIÓN DE LA REJILLA

Seleccionada, en el menú principal, la opción *Grid Mission* se desplegará una ventana para configurar la misión de vuelo (Figura 36). En dicha ventana se podrá elegir entre la vista del mapa y la vista de la cámara del dron. Para configurar la rejilla se deberá seleccionar *Map View*  donde serán visibles las siguientes opciones:

- 1) **Altura de Vuelo:** Se podrá configurar alturas de 10, 15, 20, 25 y 30m y posteriormente en incrementos de 10m (40, 50, 60, etc.) hasta 500m.
- 2) **Velocidad:** Esta se podrá configurar en el rango de Lento a Rápido en 6 niveles donde rápido representa la velocidad máxima de la aeronave (Versión 3.0.1). A mayor velocidad se podrán realizar misiones más extensas. La velocidad también depende de aspectos como la altitud.
- 3) **Ángulo de la cámara:** Esta se configura de 0° a 90°, donde 90° permitirá la captura de fotografías nadir y de 0 a 89 grados fotografías oblicuas.



- 4) Traslape: Aquí se define el traslape longitudinal de las fotografías desde 0% a 95%. La distancia transversal se define como el doble de la distancia longitudinal entre capturas consecutivas. Se puede relacionar la siguiente ecuación:

$$T_T = (2 \times T_L) - 100\% \quad \text{Ec 4.13}$$

T_T = Traslape transversal escrito en porcentaje en base a las dimensiones en altura de la fotografía.

T_L = Traslape longitudinal escrito en porcentaje en base a las dimensiones en altura de la fotografía.

Definidas estas opciones (debe estar activado el modo avanzado) se procederá a establecer la configuración geométrica de la rejilla (Figura 37), para lo cual se pueden modificar:

- ✓ Su tamaño pulsando y arrastrando los puntos al borde de la rejilla.
- ✓ Su orientación presionando alguna de las flechas y arrastrando hasta tener la orientación deseada.
- ✓ Su posición presionando el círculo al centro de la rejilla y arrastrándola a la posición deseada.

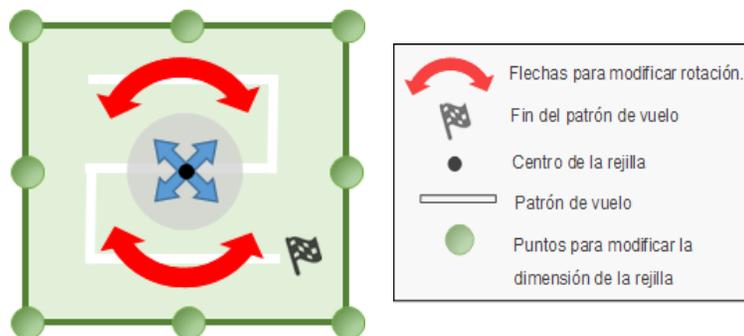


Figura 37. Modelo de rejilla a configurarse en Pix4D Capture.
Fuente: Elaboración propia.



Lo anterior permitirá a la aplicación calcular un estimado del tiempo requerido para completar el recorrido de la rejilla. Se deberá cuidar en todo caso que el tiempo no exceda el límite permitido, es decir, que durante el tiempo que se ejecuta la misión el nivel la batería sea mayor al 20%. De la siguiente expresión (propuesta por el grupo de tesis) se podrá calcular a groso modo el porcentaje de batería gastado en cada misión bajo condiciones específicas (altura, velocidad, longitud del recorrido, etc.) o el tiempo de vuelo máximo para un porcentaje y condiciones de vuelo dadas.

$$P_B = \frac{t_P}{\left(\frac{t_{Máx}}{N_{Máx}}\right) \times N_{Útil}} \times 100\% \quad \text{Ec 4.14}$$

P_B = Porcentaje de carga útil consumido durante la misión.

t_P = Tiempo de Vuelo Propuesto

$t_{Máx}$ = Tiempo de Vuelo Máximo

$N_{Máx}$ = Nivel de la batería Máximo

$N_{Útil}$ = Nivel de la batería Útil (Nivel Real – 20%)

4.4.3.1.2 CONFIGURACIÓN DEL PROYECTO

Se podrán crear múltiples misiones con el fin de cubrir el área total del proyecto y guardarse en un solo proyecto de vuelo, al cual se podrá tener acceso desde el menú principal seleccionando *Project Manager*.

Para elaborar el proyecto dentro de la aplicación se deberá crear la primera misión y luego guardar los cambios de la misma (presionando “Save”). Posteriormente se abrirá el proyecto (desde el menú principal seleccionando “Project Manager” y luego el proyecto en cuestión) y se agregarán nuevas misiones seleccionando la opción *Add* y guardando los cambios una vez estén configuradas.



Una vez finalizada la configuración de todas las misiones que constituirán el proyecto se podrá seleccionar que misiones realizar desde esta ventana tocando la rejilla en el mapa o seleccionándolo desde una lista y revisar la información de cada misión al seleccionar la misión de interés y tocar la opción de “Info”. Esta información incluirá las dimensiones de la malla, traslape, altura de vuelo, modelo de la aeronave, coordenadas del centro de la rejilla, etc. Una vez ejecutada se completaran otros campos como el tiempo de vuelo real, fotografías tomadas, hora de ejecución, etc.

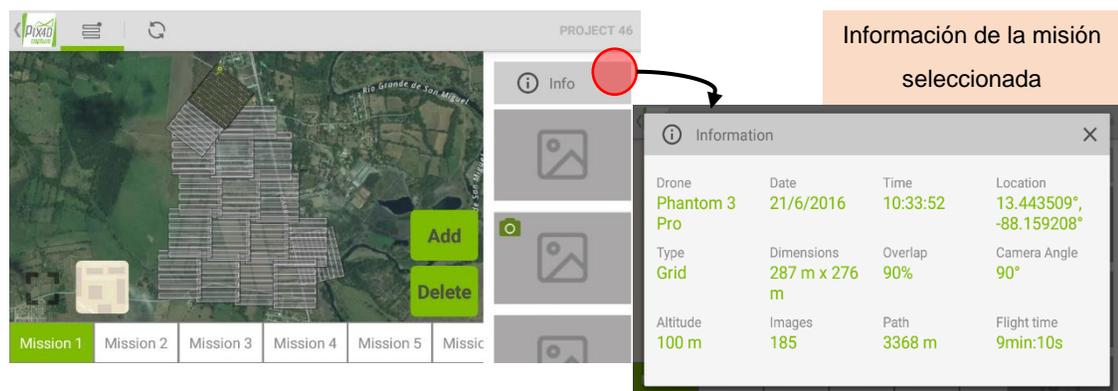


Figura 38: Proyecto de vuelo con las misiones proyectadas e información por misión.

Al tener las opciones avanzadas encendidas, se podrá modificar la posición del centro de la rejilla haciendo una pulsación larga hasta que se abra la opción de modificar la latitud y longitud del centro.

4.4.3.2 MÉTODO ALTERNATIVO

Si la misión fuera a ejecutarse de forma manual o si se necesitara tener un control más minucioso sobre el dimensionamiento de la rejilla, el traslape entre múltiples misiones y la cobertura del proyecto se podrá dimensionar manualmente según los criterios ya descritos en el capítulo (tomando en consideración la configuración de la aplicación) y luego proyectarse en la aplicación.



Este dimensionamiento puede realizarse dentro de un software de CAD de la siguiente manera:

1. Se prepara el entorno de trabajo configurando en el dibujo un sistema de coordenadas cualquiera y luego se cargando la vista satelital de la zona de interés sobre la cual se propondrán las misiones.
2. Establecida la altura de vuelo se calcula el GSD (Ec. 4.9) y las dimensiones de la fotografía (Ec. 4.7) según las características de la cámara.
3. Calculada la dimensión de la imagen sobre el terreno se calcula la distancia entre capturas B (Ec. 4.11) y la distancia entre las líneas de vuelo A (Ec. 4.12). Si se cargará la misión a Pix4D Capture se deberá tomar en cuenta la configuración de A para este caso como el doble de B.
4. Posteriormente se definirá la longitud de la línea de vuelo según el número de fotografías que se desea tomar y el número de pasadas que se realizara en el vuelo. Se recomienda que la misión sea en lo posible regular y sus dimensiones (largo por ancho) no difieran mucho ya que en misiones muy largas se corre el riesgo de perder la conexión con la aeronave.
5. Luego se trazará un rectángulo que encierre las pasadas y quedaran definidas las dimensiones de la rejilla donde Largo = Longitud de la línea de vuelo y Ancho = Número de líneas de vuelo multiplicado por A.
6. Definir la orientación de la malla girando de forma manual el rectángulo. Las misiones suelen orientarse de Norte a Sur o de Oeste a Este.
7. Dimensionar el traslape deseado entre misiones (usualmente menor al 20% de la dimensión de la rejilla).
8. Una vez completado el proyecto de vuelo se insertarán puntos en los centros de cada misión, asignándoles coordenadas, y se exportarán para configurar el proyecto en base a estos valores. Las coordenadas deberán convertirse a sus correspondientes en latitud y longitud.



9. Si el vuelo se ejecutará de forma manual habrá que exportar las coordenadas iniciales y finales para cada línea de vuelo y de los puntos considerados para el centro de cada fotografía (por misión), estas coordenadas (conocidas como *waypoints*) se utilizan como guía para orientar el desplazamiento durante el vuelo.

Este modelo se utiliza posteriormente para proyectar puntos de apoyo que sean necesarios para unificar el proyecto (descrito en la sección siguiente y en el Capítulo 5).

4.4.4 CONSIDERACIONES ADICIONALES DEL PLAN DE VUELO

Otras consideraciones a tenerse en cuenta surgen de la posibilidad de mezclar vuelos a diferentes alturas y/o fotografías obtenidas desde diferentes UAV. Para mantener las variaciones del GSD al mínimo se debe cuidar:

1) Variaciones en la distancia focal

Es importante considerar los siguientes aspectos:

- ✓ A una altitud constante e incrementando la distancia focal se captura un área menor y a una distancia focal constante y reduciendo la altitud se captura un área menor.

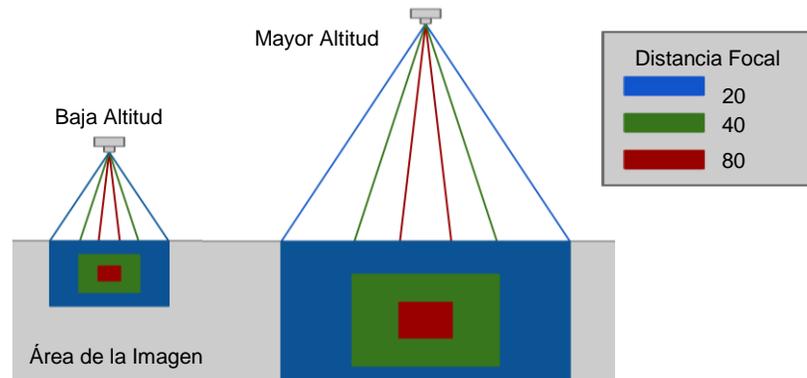


Figura 39. Variación del área cubierta por una fotografía según cambios en la distancia focal y la altura de vuelo.

Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.



Por consiguiente el GSD se verá reducido y la imagen tendrá una resolución espacial mayor. Para ambos casos se debe aumentar el ritmo de capturas fotográficas para poder mantener un buen traslape.

2) Tipo de Terreno

El levantamiento fotogramétrico deberá tener en consideración las características de la zona a levantar, por lo que para realizar el plan de adquisición de imágenes se debe proceder teniéndolas en cuenta.

- ✓ En bosques y sitios con vegetación densa se debe volar alto para facilitar la reconstrucción, pero la resolución espacial se reducirá.
- ✓ En edificios, el volar alto reduce los problemas con las esquinas de los edificios, pero la resolución espacial se reducirá.

Para proyectos que incluyan terrenos con pendientes elevadas y diferencias altas en la elevación, se deberá diseñar la misión de vuelo considerando para el GSD el punto más bajo y para el traslape el punto más alto recorridos durante el vuelo (Figura 40).

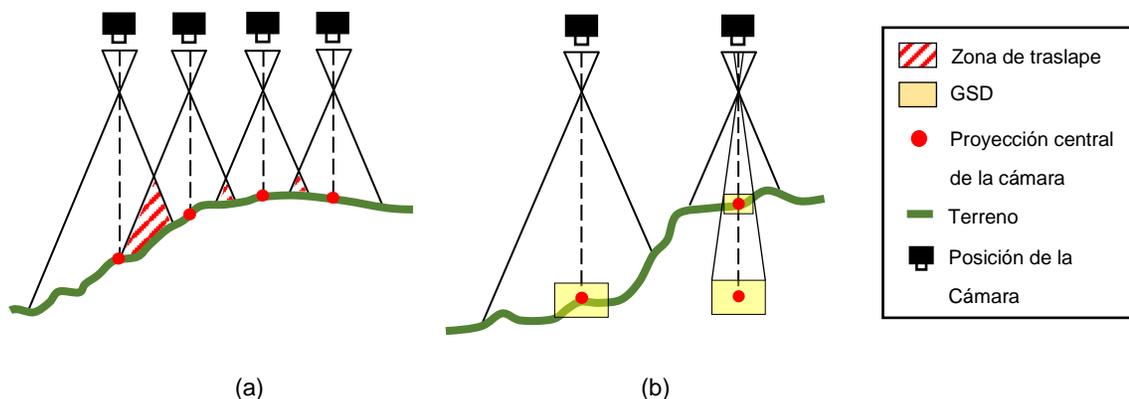


Figura 40. Relación entre traslape y GSD debido a la orografía del terreno. (a) Variación del traslape entre fotografías al variar el relieve del terreno. (b) Variación del GSD por la distancia entre el punto de captura y el terreno. **Fuente:** Grupo de tesis.

Para una distancia focal y un ritmo de capturas fotográficas constantes el aumentar la altitud aumentará el traslape. Si se tuviera una baja altitud con gran



distancia focal (f_c) se requerirá aumentar el ritmo de capturas fotográficas en orden de mantener un buen traslape.

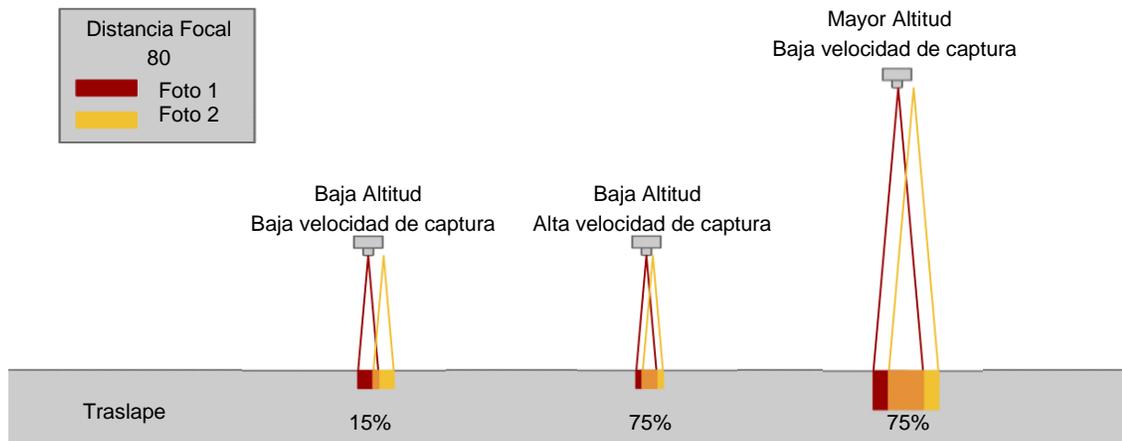


Figura 41. Variación del traslape entre fotografías según cambios en la velocidad de captura y la altura de vuelo.

Fuente: Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

4.5 APOYO TOPOGRÁFICO DEL VUELO (FASE 2)

La toma de datos y procesamiento de los puntos de apoyo es lo que se suele denominar como “apoyo del vuelo”. El número y distribución de puntos de apoyo y puntos de control dependerá del número de fotografías necesarias para cubrir toda la zona y de la distribución y características de la misión o misiones de vuelo (Ver 4.3).

Es muy importante especificar las tolerancias tanto planimétricas como altimétricas que han de cumplir todos los puntos medidos, puesto que deberán incluirse en la etapa de procesamiento (Véase 5.1.2.3).

4.5.1 METODOLOGÍA

La toma de datos topográficos consiste en la medición de las zonas necesarias para realizar el levantamiento del perímetro, que servirán como puntos de control



(Check Points), y en la obtención de las coordenadas de los puntos de apoyo (GCPs) sobre el terreno necesarios para realizar la aerotriangulación. Dichos puntos deben ser identificables en las fotografías y ubicarse en zonas descubiertas. Los puntos deberán tener posición planimétrica y altimétrica para poder usarse en la elaboración del modelo digital del terreno (MDT).

La determinación de las coordenadas planimétricas y altimétricas de estos puntos se conoce con el nombre de apoyo de campo. En la realización de los trabajos topográficos y geodésicos que lleva consigo la fotogrametría es necesario utilizar métodos e instrumentos que agilicen al máximo la eficiencia y precisión de esta fase.

Esta fase del proyecto de vuelo fotogramétrico se basará en la obtención de puntos topográficos mediante el uso de:

- 1) Instrumentos topográficos. Adquiriendo la información directamente del terreno (Utilizando procedimientos clásicos de la topografía mediante estación total o GPS).
- 2) Bases de datos. Extrayendo la información de una base de datos existente como datos topográficos actualizados de la misma zona o servicios de mapas web (Web Map Service) como Google Maps.

El presente estudio se referirá a los puntos de apoyo o GCP (Ground Control Point) como aquellos a ser utilizados para ajustar la precisión y orientación del modelo de la superficie y que son identificables en las fotografías; y a puntos de control a aquellos puntos con coordenadas que se utilizarán para comprobar la precisión del levantamiento y cubrir los fallos propios de la técnica.

4.5.2 PUNTOS DE CONTROL

Se recolectan puntos de control para complementar la topografía, linderos, líneas constructivas, etc. que por algún motivo no sean perceptibles desde las



fotografías aéreas. Dichos puntos se anexarán a la superficie en el procesamiento.

4.5.3 PUNTOS DE APOYO (GCP)

Para que el vuelo sea directamente relacionable con el terreno (es decir pueda ser georreferenciado) se precisa la adquisición de puntos de apoyo, cuya posición deberá ser descrita completamente (x,y,z).

Al usarse GCPs se debe considerar lo siguiente:

1. Número y distribución de los GCPs
2. La técnica de adquisición de los GCPs

Sabiendo que en términos generales se recomienda agregar GCPs para hacer un proyecto más estable y preciso, el número de GCPs dependerá de la precisión relativa de las coordenadas de las fotografías.

Para llevar a cabo el ajuste es necesario colocar como mínimo tres GCP y cuando son proyectos grandes se recomienda utilizar un mínimo de 5 (5 a 10 GCP suelen ser suficientes aún para grandes proyectos). Se pueden colocar más puntos de apoyo pero esto no ayudará de manera significativa a mejorar el resultado, al igual que no lo afectará negativamente tener muchos GCPs.

Ya que el número mínimo de puntos de apoyo necesarios para la realización del proceso de restitución sería de 3 (teniendo en cuenta la posibilidad de que existiera algún error en alguno de estos puntos), se consideran necesarias para proceder a una restitución fiable las coordenadas planimétricas y altimétricas de cuatro puntos de apoyo fotogramétrico y la cota altimétrica de un punto más, para un buen ajuste del modelo.

En proyectos con imágenes georreferenciadas los GCPs aumentan la precisión absoluta del proyecto, desplazando el modelo a su posición exacta en la Tierra. Estos reducen el error debido a la incerteza del GPS de metros a centímetros.



En los proyectos sin imágenes georreferenciadas los GCPs son requeridos si se necesita una salida de datos georreferenciada. Si ese es el caso, los GCPs corregirán la escala, orientación y la posición del modelo. Adicionalmente los GCPs aumentan la precisión relativa de los resultados así como de la reconstrucción del modelo 3D.

Un GCP no debe ser más preciso que 1/10 del GSD. Por ejemplo, si el GSD es 10cm, la precisión del GCP no debe ser inferior de 1cm, ya que ellos no podrán ser marcados en las imágenes con dicha precisión.

Algunos casos especiales en los que se recomienda el uso de GCP son:

- **Mapeo de un corredor (rieles, ríos, carreteras, etc.).** Aunque no sea necesario el uso de GCPs, si permitirán tener mejores resultados. Si las imágenes tienen una georreferenciación precisa, de 8 a 10 GCPs serán suficientes. La longitud del proyecto también afecta el número de GCPs requeridos por lo que entre más largo el corredor se necesitaran más GCPs. Para vuelos realizados en una sola línea de vuelo los puntos de apoyo terrestre se definen a lo largo de la línea de vuelo en zigzag (Figura 42a).

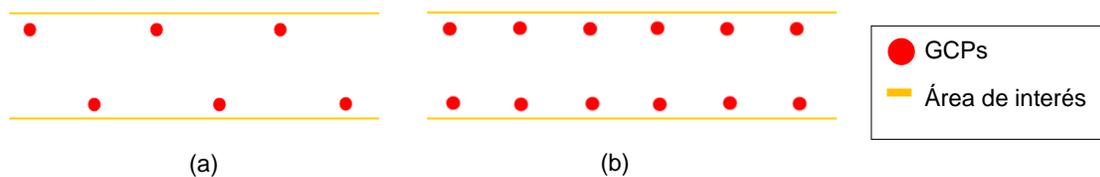


Figura 42. Distribución de GCPs en corredores.

(a) Distribución recomendada para vuelos fotogramétricos realizados en una sola línea de vuelo. (b) Distribución ideal de puntos de apoyo si no hubiera limitación en el tiempo. **Fuente:** Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

- **Reconstrucción de edificios y de una ciudad (fachadas visibles).** Para estos casos se recomienda encarecidamente el uso de GCP para ajustar



adecuadamente los diferentes conjuntos de imágenes (aéreas nadir y/o oblicuas y/o terrestres).

- **Reconstrucción de un túnel.** Donde no se puede proceder con el plan de adquisición de imágenes ideal y deba procederse a realizar la toma de imágenes en una sola línea de vuelo se recomienda la utilización de GCPs.

4.5.3.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO

La ubicación de los puntos de apoyo se realiza a partir de la vista satelital del terreno, teniendo en cuenta que deben quedar bien distribuidos en área del proyecto. Debido a lo desactualizado de las vistas satelitales será necesario proyectar la ubicación de las marcas y evaluar su factibilidad en una inspección preliminar por la zona, en la cual se deberán seleccionar aquellas locaciones que brinden mejores resultados así como proponerse nuevas que reemplacen las que no sean útiles.

La elección de puntos de apoyo se hace tomando en cuenta los siguientes criterios:

- El detalle planimétrico deberá ser perfectamente identificable en las fotos.
- Los puntos se elegirán dentro de la zona marcada en el plan de vuelo de modo que estén distribuidos de forma homogénea en el área de interés (Figura 43a), con la finalidad de que cumplan los requisitos para la realización de la orientación absoluta del modelo.
- Preferentemente serán un detalle artificial y estable.
- Será conveniente ubicar los puntos altimétricos sobre partes del terreno de muy débil pendiente (lo más horizontal posible), evitando en lo posible los detalles que se presten a una mala puntería estereoscópica.
- No incluir las marcas en los vértices del área del proyecto ya que serán visibles en pocas imágenes (Figura 43b).



- Cada GCP debe ser identificable en al menos 5 imágenes, esto reducirá la imprecisión que puede generarse al incluir un GCP.
- En múltiples misiones deberán incluirse GCPs en la zona común de los vuelos para poder unificar el proyecto (Figura 43c).

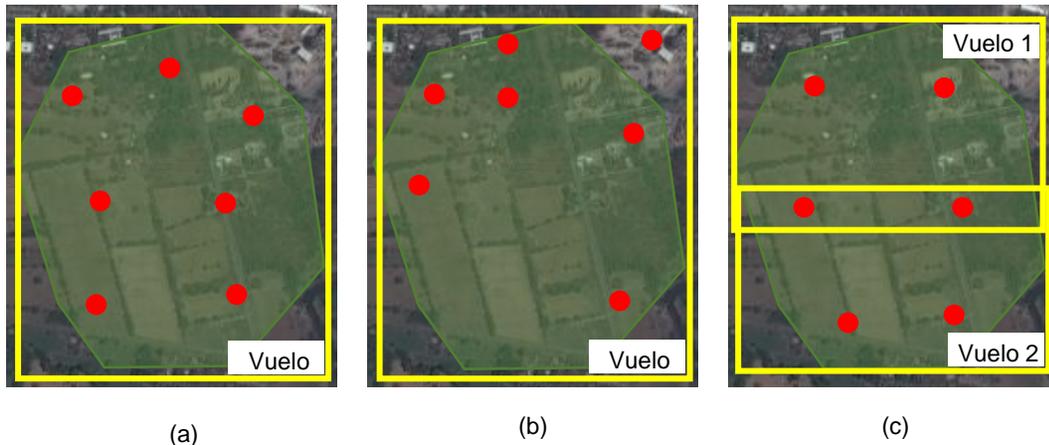


Figura 43. Distribución de GCPs en la zona de interés del proyecto.
(a) Distribución adecuada de GCPs dentro de la zona del proyecto. (b) Distribución equivocada de los GCPs dentro de la zona de interés del proyecto.
(c) Distribución de los GCPs en la zona común de múltiples misiones de vuelo.

Fuente: Grupo de tesis.

4.5.3.2 SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO

La forma de estas señales adoptada generalmente es la cuadrada, en las que el material utilizado es de aluminio, contrachapado o cartón (Ver Figura 44). Se tiene que dividir en colores la marca, que sea brillante y el otro que sea un color oscuro para poder ubicar correctamente el centro en las fotografías (punto al cual se le han asignado coordenadas).

Otra forma adoptada en algunos organismos es la circular, pudiéndose mejorar sustituyendo los círculos por cruces.

Las dimensiones de estas señales variarán con el GSD, generalmente las marcas se le colocan dos colores para poder distinguir fácilmente el centro, la marca tiene que ser de 5 a 10 veces mayor que el tamaño del GSD.



$$\text{Dimensiones de la marca} = \text{GSD} \times 10$$

Ec 4.13

Es preferible utilizar el mayor (que es el 10) para tener una mayor visibilidad en las imágenes e identificarlos con facilidad ya en muchos casos puede haber objetos cercanos y se corre riesgo de confundirlos con la marca.

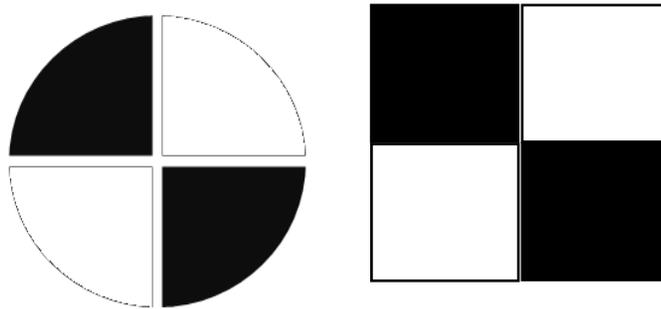


Figura 44. Tipos de marca utilizadas como GCP.
Fuente: Grupo de tesis.

4.5.3.3 COLOCACIÓN DE LOS PUNTOS DE APOYO

Cuando se ha identificado el área dónde colocar los puntos de apoyo se procede a la obtención de las coordenadas. Para el ajuste altimétrico, en general, serán buenos todos los situados a nivel del suelo y que no presenten altura sobre el terreno.

Procedimiento para marcas sobre el terreno:

Mediante replanteo se estima la posición propuesta para el punto. Una vez confirmada la utilidad de la posición de la marca y se valida su utilidad como GCP se colocan estacas u otro elemento que permita identificar posteriormente el punto del cual se tienen coordenadas. Después se posiciona el centro de la marca en la estaca y se procede a tomar las coordenadas. En caso que solo se le den coordenadas a la estaca y no queden puestas las marcas, al momento de colocarlas se debe verificar que las marcas queden con el centro en el punto marcado de la estaca para evitar errores y tener mayor precisión.



Procedimiento para marcas zonas construidas:

Para el caso en que las marcas se deban colocar en superficies donde se dificulte colocar una estaca como calles, zonas pavimentadas o aceras se podrá colocar las marcas y señalar el punto con coordenadas con pintura. Se elige un lugar que pueda ser visible en las fotografías y se le asignan coordenadas con el equipo topográfico.



Figura 45. Procedimiento de colocación de marcas y medición de coordenadas para GCPs.

(a) Identificación de la zona y colocación de estaca. (b) Colocación de Marca. (c) Marca circular con pintura en calle. (d) Medición de las coordenadas según el instrumento topográfico seleccionado (En la fotografía RTK).

Fuente: Grupo de tesis.

También se podrán utilizar esquinas, intersecciones o cualquier otro elemento artificial que cumpla con las condiciones ya establecidas.

4.6 ADQUISICIÓN DE FOTOGRAFÍAS (FASE 3)

La etapa de adquisición de las fotografías o Fase 3 del proyecto de vuelo incluye las actividades a realizarse al momento de ejecutar la misión de vuelo, preparación del equipo, movilización a la zona de despegue y aterrizaje,



procedimientos de seguridad necesarios para realizar la actividad, procesos de calibración y ajustes básicos de la cámara.

4.6.1 AJUSTES DE LA CÁMARA

- La velocidad de obturación, apertura y la ISO se deben establecer en automático. Si las imágenes son borrosas o ruidosas, se recomienda configurar manualmente estos parámetros.
- Debe existir un equilibrio entre la velocidad de obturación, la abertura y la sensibilidad ISO. Para el procesamiento, las imágenes deben ser nítidas y tener la menor cantidad de ruido. Tales imágenes pueden ser obtenidas cuando la escena está bien iluminada (deben evitarse las nubes dispersas) y los parámetros de la cámara están bien ajustados. Si la escena no está suficientemente iluminada, las imágenes tendrán más ruido y serán menos nítidas, lo que disminuye la precisión de los resultados.
- Como regla general, la velocidad de obturación debe ser fija, la ISO se debe establecer en un valor bajo que no produzca imágenes con ruido, y la abertura debe estar en modo automático para ajustarse a los diferentes niveles de brillo de la escena. Si la compensación no es correcta, es posible también obtener imágenes sobreexpuestas o subexpuestas.
- La velocidad de obturación debe ser fija y ajustada a una velocidad media (entre 1/300 segundo y 1/800 segundo), pero lo suficientemente rápida como para no producir imágenes borrosas. Si más del 5% de las imágenes están sujetas a un desenfoque direccional, es un buen indicador de que la velocidad de obturación debe ser ligeramente mayor.
- La ISO debe ajustarse lo más bajo posible (mínimo 100). Un elevado valor ISO generalmente introduce ruido en las imágenes y reduce drásticamente la calidad de los resultados procesados.



- La abertura mínima y los valores máximos dependen de la lente. Alta apertura se traduce en números bajos, por ejemplo f2.7 (que capturar una gran cantidad de luz). Si se ajustan la velocidad de obturación y la ISO, es mejor dejar la abertura (f) en modo automático.
- La estabilización electrónica y mecánica debe ser desactivada ya que interfiere con los algoritmos.
- El modo de enfoque recomendado es de Enfoque Manual en el Infinito. Este modo de enfoque siempre debe dar imágenes enfocadas para proyectos aéreos. Para los proyectos terrestres, es probable que este modo produzca resultados desenfocados si utiliza una longitud focal larga.

4.6.1.1 RESUMEN

- Respecto al cuerpo de la cámara y lentes:
 - ✓ Selección de lentes de Perspectiva u Ojo de Pez según el proyecto.
 - ✓ El zoom debe estar estable (fijo).
 - ✓ Utilizar una distancia focal fija.
 - ✓ El uso de los fotogramas (frames) de video, para la reconstrucción, no son recomendables debido al efecto Rolling Shutter y a la baja resolución.
- Configuración de la cámara:
 - ✓ Las opciones de estabilización deben apagarse.
 - ✓ Obturador/Apertura/ISO debe colocarse en automático.
 - ✓ Si las imágenes se presentan borrosas o con ruido, se debe configurar manualmente el Obturador/Apertura/ISO.
 - ✓ Seleccionar el Enfoque Manual en Infinito.

Algunos problemas que pueden darse con las imágenes fotográficas son:

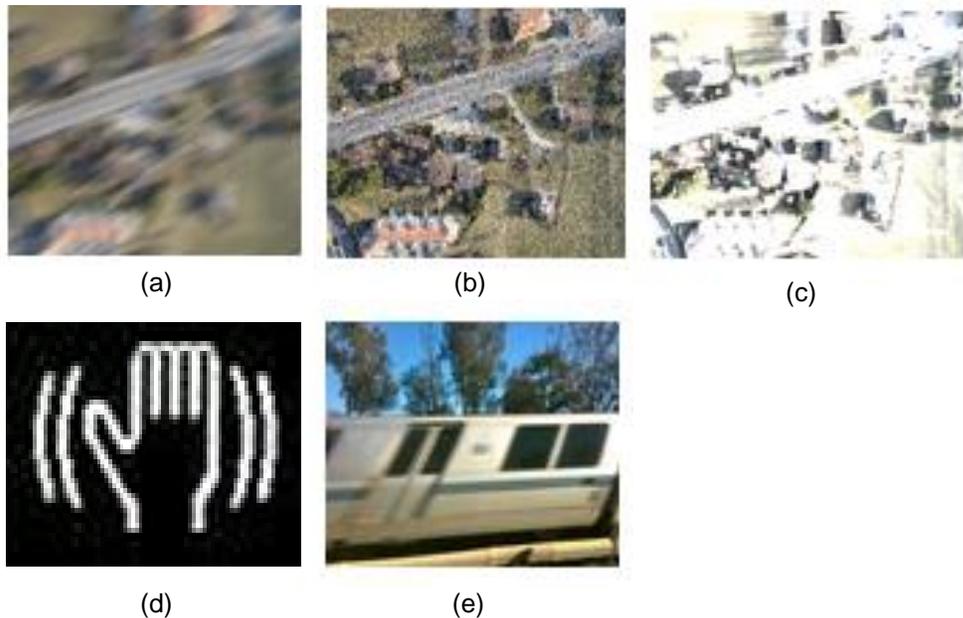


Figura 46. Problemas de imágenes fotográficas, debido a los parámetros configurados en la cámara o uso de equipo inadecuado.

(a) Fotografía borrosa debido a la baja velocidad del obturador. (b) Fotografía con ruido debido a una alta configuración de la sensibilidad ISO. (c) Sobreexposición o subexposición (debido a la apertura y/o velocidad de obturador). (d) Distorsión debido a la estabilización electrónica o mecánica de la imagen. (e) Distorsión debido al efecto Rolling Shutter. **Fuente:** Manual de Pix4Dmapper 2.1 recuperado en marzo de 2016.

Como regla general las cámaras pesadas (alta resolución por pixel) generan mejores resultados, pero requieren de una plataforma de vuelo con una carga útil superior.

4.6.2 PREPARACIÓN DEL EQUIPO

Antes de realizar las misiones de vuelo se deberá comprobar que los componentes del equipo estén correctamente instalados para obtener los



resultados de calidad esperados. Para la preparación del equipo se realizan las siguientes actividades¹³:

- ✓ Revisión del completo nivel de carga de la batería inteligente, el control y el dispositivo móvil.
- ✓ Colocación de las hélices.
- ✓ Instalación de la batería.
- ✓ Retirar el protector de la cámara (el no retirarlo puede ocasionar que se dañe el motor [gimbal] que estabiliza y hace girar la cámara).
- ✓ Colocación de la tarjeta de memoria donde se almacenan las fotografías (Micro-SD de hasta 64GB).
- ✓ Preparación del control y conexión de la aplicación DJI GO con la aeronave.
- ✓ Calibración del equipo.

Tabla 13. *Requerimientos de la Aplicación DJI GO desarrollada por DJI TECHNOLOGY CO., LTD para el control de la aeronave.*

Sistema	iOS 8.0 o superior	Android 4.1 o superior	Dispositivos DJI Compatibles
Versión	2.8.3 (01-06-2016)	2.8.2 (05-07-2016)	Inspire 1, Inspire Pro, Inspire RAW, Phantom 3 Standard, Phantom 3 Advanced, Phantom 3 Professional, Phantom 4, Matrice 100, Matrice 600, Osmo, Osmo Pro y Osmo RAW.
Tamaño	134 MB	90 MB	

4.6.2.1 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Para toda nueva locación de vuelo se debe calibrar la brújula ya que una mala calibración producirá un defectuoso desempeño en el vuelo o un fallo del mismo.

¹³ El UAV utilizado en la investigación es el Phantom 3 Pro por lo que las preparaciones previas al vuelo son propias de este equipo de la empresa DJI.



La calibración de la brújula se debe realizar en espacios abiertos realizando los siguientes pasos:

1. Se abre la aplicación de DJI del móvil, se presiona la barra de estado del drone y se selecciona “Compass Calibration” para calibrar la brújula y enseguida la pantalla da las instrucciones cómo calibrar (Figura 47).

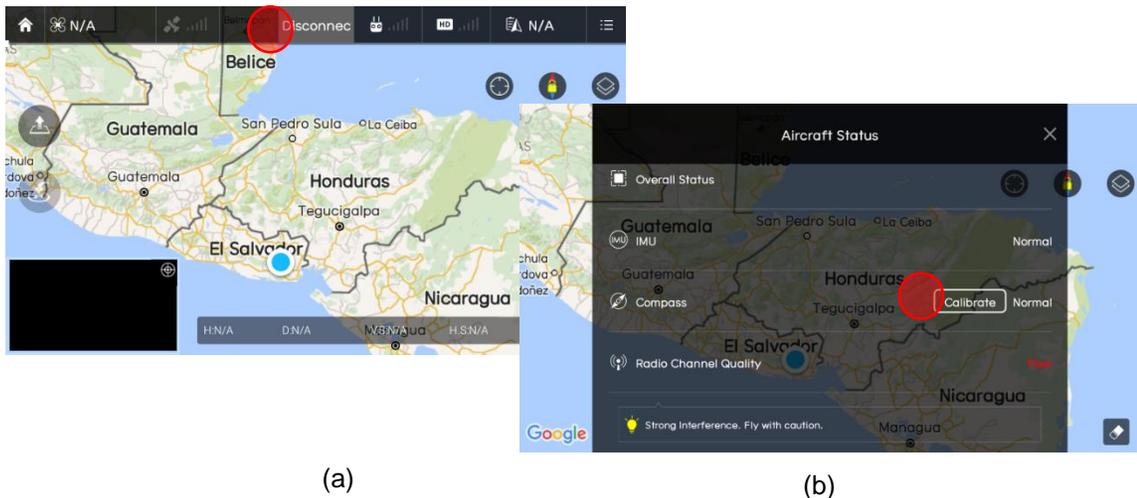
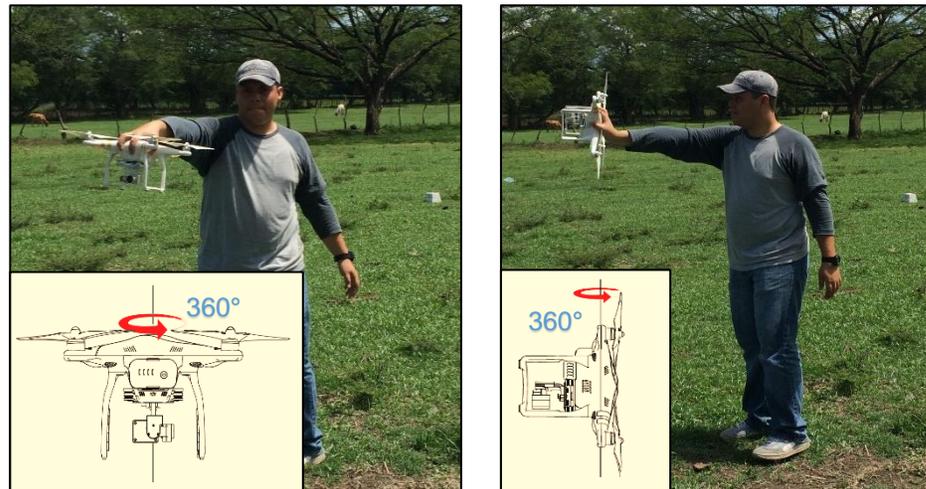


Figura 47. Proceso de calibración de la brújula desde la Aplicación DJI GO.
(a) Se presiona la opción de la barra de estado de la aeronave. (b) Se selecciona calibración de la brújula.

2. Se mantiene el drone horizontalmente y se gira 360°, como se observa en la figura 48a.
3. Cuando calibración horizontal está completa después del giro de los 360°, se pone verticalmente y con la cámara viendo hacia abajo y se gira 360°, como se muestra en la figura 48b. Cuando este calibrado se dejará de mostrar la indicación del proceso de calibrado.



(a)

(b)

Figura 48. Proceso de calibración de la brújula.

(a) Calibración en posición horizontal. (b) Calibración en posición vertical. **Fuente:** Grupo de tesis.

Para asegurar un rendimiento eficiente, a la hora de calibrar se debe tomar en cuenta:

- No calibrar la brújula cuando hay posibilidad de interferencia magnética fuerte como magnetita, estructuras de estacionamiento y refuerzos de acero subterráneos.
- No llevar materiales ferromagnéticos durante la calibración, como llaves o teléfonos móviles.
- No realizar la calibración junto a grandes objetos metálicos.
- No realizar la calibración en interiores.

4.6.2.2 CUÁNDO RECALIBRAR

Si el indicador del estado de la aeronave parpadea en rojo y amarillo después de la proceso de calibración se debe mover la aeronave de locación y repetir el procedimiento. Otras situaciones que requieren recalibrar la brújula son:



- ✓ Cuando los datos de la brújula están fuera de lo normal y el indicador del estado de la aeronave parpadea en verde y amarillo.
- ✓ Cuando se realiza un vuelo en una nueva locación o en una locación que es diferente a los vuelos recientes.
- ✓ Siempre que algún elemento mecánico o físico del drone ha sido cambiado.
- ✓ Cuando se observa una deriva severa durante el vuelo y el drone no vuela en línea recta.

4.6.3 EJECUCIÓN DEL VUELO

Una vez que se comprueba que el equipo está en condiciones de volar, con el fin de realizar el vuelo y cubrir toda la zona deseada se deberá proceder a las siguientes etapas:

4.6.3.1 PREPARACIÓN DEL UAS

Se debe saber manejar el drone de forma manual, esto permitirá evitar obstáculos o recuperarlo en caso de interferencia con el GPS.

Antes del despegue, la aplicación envía la misión de vuelo al drone, la cual seguirá durante el vuelo automatizado. Para los drones de DJI el control se conecta mediante Wi-Fi (P2V, P2V+) o a través de un cable USB (I1, P3A, P3P). EL control a su vez envía la señal al drone mediante una red inalámbrica propia de DJI.

Cuando se vuela con Pix4Dcapture:

- Se requiere que se mantenga la conexión con el drone:
Para los modelos I1, P2V, P2V+, P3A, P3P y Solo, si la conexión se pierde, las imágenes no se tomarán ya que la aplicación es responsable de disparar la cámara del drone. Sin embargo el vuelo continúa ya que los



waypoints (Puntos de marca que la aeronave debe seguir) son configurados en el dron antes de despegar.

- Se requiere una buena señal del GPS: Si el dron lee equivocadamente las coordenadas del GPS, podría volar en una dirección aleatoria. Esto pasa cuando el dron vuela en un entorno con interferencia (cerca de grandes estructuras metálicas y donde la señal del GPS rebota en objetos como grandes edificios). Entonces se requerirá la operación manual del dron para recuperarlo.
- Evitar obstáculos: No debe haber obstáculos entre el punto de despegue del dron y la elevación de vuelo durante el despegue o aterrizaje. Se debe seleccionar una zona despejada para el aterrizaje/despegue con al menos 10x10 metros donde se pueda tener fácilmente señal del GPS.
- La duración de la batería: Esta depende de múltiples factores como el viento, altitud, temperatura, etc., y es imposible predecir la duración de la batería. Si la aplicación está conectada con el dron y la batería está por debajo del 20%, la aeronave volará al punto de casa (Punto de despegue). Si la conexión con el dron se corta y la batería está por debajo del 15%, el dron aterrizará en el punto donde se encuentre. Se requerirá la operación manual del dron en esta etapa.
- El Firmware del dron debe estar actualizado: Usando DJI VISION (P2V, P2V+), DJI GO (I1, P3A, P3P), FreeFlight 3 (B2) o 3DR Solo (Solo) para revisar el estado del firmware.

4.6.3.2 EJECUCIÓN DEL VUELO

Una vez realizado el proceso de calibración de la brújula y verificado el nivel de la batería, es necesario ejecutar el despegue de la aeronave utilizando la aplicación DJI GO. Cuando se está en condiciones para el vuelo, en la pantalla del equipo móvil (Figura 49), aparece la imagen que capta la cámara e indica que está recibiendo señal GPS y es “seguro volar”.



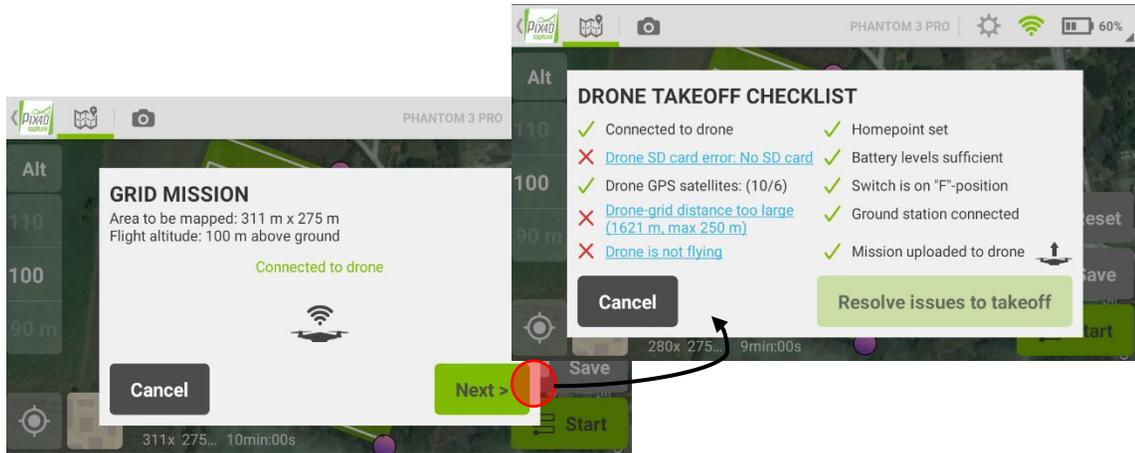
Figura 49. Vista principal de la Aplicación DJI GO (Versión para sistema Android).
Fuente: Grupo de tesis.

La aeronave debe elevarse y posicionarse cerca del centro de la misión (como máximo a 250m de éste) pero no muy lejos del control remoto (si es posible) para evitar inconvenientes al cargar la misión en el dron y optimizar el consumo de batería.

Deberá entonces cerrarse la aplicación de DJI GO¹⁴ para poder abrir Pix4D Capture y seleccionar la misión. Cuando se ha elegido, se presiona inicio (Start) para cargar la misión a la aeronave (Figura 50a).

Una vez que se ha conectado correctamente, se continúa a completar las preparaciones para el vuelo (Next > Drone Takeoff Checklist). Todas las revisiones deben ser positivas (señalado con ✓) para poder ejecutar la misión. Las que presenten inconvenientes (marcada con ✗) se deben solucionar, de lo contrario no se podrá realizar la misión (Figura 50b).

¹⁴ Se debe cerrar ya que las ordenes enviadas podrían entrar en conflicto y fallar el vuelo.



(a)

(b)

Figura 50. Ventana de inicio de vuelo.

(a) Proceso de conexión con el drone y resumen de la misión. (b) Ventana de las revisiones previas a la ejecución del vuelo. **Fuente:** Grupo de tesis.

Un fallo en la lista de verificación puede deberse a diferentes causas y tener distintas soluciones. Dependiendo del elemento de la revisión con el que se tenga problemas se podrá proceder como se describe en la siguiente tabla.

Tabla 14. Lista de revisión previa al inicio de la misión.

ELEMENTO CON INCONVENIENTE	POSIBLE SOLUCIÓN
Conexión con el drone	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Se debe revisar la conexión inalámbrica, verificando si está disponible. ❖ Mover a la posición correcta antenas del control. ❖ Reiniciar la aplicación y el drone si no se encuentra solución.
Tarjeta SD en el drone	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Se deberá verificar que la tarjeta este instalada y que no esté llena. ❖ Si no está llena debe esperar a que se actualice el estado.
Satélites disponibles (Drone GPS satellites)	Para realizar un vuelo se necesita como mínimo la conexión a 6 satélites GPS. Por lo que es necesario esperar un momento para que tenga señal de más satélites.
Cercanía del drone a la rejilla.	La aeronave se tiene que acercar al centro de la rejilla ya que no puede estar alejada más de 250 metros antes de iniciar la misión.



<i>El drone no está volando</i>	Encender los motores y hacer que despegue. Elevarlo de 1 a 2 metros de altura es suficiente.
<i>Definición del Homepoint</i>	Verificar que la revisión <i>Drone GPS satellites</i> sea positiva. Las coordenadas del <i>Homepoint</i> (punto de casa) se definen por la posición del drone en el despegue. Para ello es necesario tener suficiente señal GPS.
<i>Niveles de la batería</i>	<ul style="list-style-type: none">❖ Revisar que la batería del drone este cargada.❖ Revisar que la batería del control este cargada. Para todo vuelo es recomendable que la batería esté completamente cargada. El nivel de la batería debe ser mayor al 20% en todo caso.
<i>Posición de la palanca P.A.F. del control</i>	<ul style="list-style-type: none">❖ Verificar que la revisión <i>Drone GPS satellites</i> sea positiva.❖ Mover la palanca P.A.F. del control a la posición F.
<i>Conexión con la estación de tierra</i>	<ul style="list-style-type: none">❖ La aplicación debe estar conectada a la aeronave, en caso que no se pueda conectar se debe reiniciar el drone y el dispositivo (debe estar conectado a internet cuando se reinicie).❖ Si el drone no está volando hacer que despegue.❖ Si el firmware del drone no se ha actualizado, actualizarlo.

Cuando la misión es cargada (Última revisión) se puede dar la orden de inicio. A partir de aquí no se requiere ningún control manual, salvo si se debe cancelar el vuelo (por las casusas ya antes mencionadas). Se debe procurar que no se pierda la conexión inalámbrica con la aeronave, por lo que durante el vuelo el control debe mantenerse en una zona abierta.

Desde el controlador de vuelo se comprueba que la trayectoria de la aeronave era la programada y que los valores del número de satélites utilizables, el estado de la batería, la altura de vuelo y la velocidad durante el vuelo sean los adecuados.

4.6.3.3 CONDICIONES DE USO DEL PHANTOM 3 PROFESSIONAL

- 1) No utilizar la aeronave en condiciones climáticas adversas, como viento a una velocidad superior a 10 m/s, lluvia y bruma industrial.



- 2) Volar en espacios abiertos. Las estructuras altas y las grandes estructuras metálicas pueden afectar a la precisión de la brújula y del sistema GPS.
- 3) Evitar obstáculos como multitudes, líneas de alta tensión, árboles y masas de agua.
- 4) Reducir al mínimo las interferencias evitando zonas con altos niveles de electromagnetismo, incluidos repetidores y torres de radiotransmisión.
- 5) El rendimiento de la aeronave y de la batería está sujeto a factores medioambientales, como la densidad del aire y la temperatura. No se debe volar a altitudes superiores a 500 metros sobre el nivel del mar, ya que puede afectar al rendimiento de la batería y la aeronave.

4.7 PROYECTO DE VUELO UES FMO

4.7.1 DESCRIPCIÓN

Se describe la planificación de un vuelo fotogramétrico sobre el terreno de la Facultad Multidisciplinaria Oriental y sus alrededores. Considerando un terreno aproximadamente plano, dedicado a agricultura y con zonas de vegetación densa.

4.7.1 PLAN DE VUELO

Las misiones se ejecutarán de forma autónoma (pre programadas) haciendo uso de la aplicación Pix4D Capture utilizando un drone multirrotor y bajo las condiciones ya descritas, ubicando y dimensionando cada misión inicialmente en AutoCAD Civil 3D para mejorar la calidad del producto final. El plan de vuelo queda definido de la siguiente manera:

- Equipo: UAV multirrotor **Phantom 3 Professional** fabricado por DJI.
- Cámara: Se deberá definir los parámetros internos de la cámara a utilizarse en fotogrametría. Las características de la cámara del drone utilizado se detallan a continuación:



Tabla 15. Características internas de la cámara del Phantom 3 Professional.
Fuente: Base de datos de Pix4D Mapper.

GENERALIDADES			
Modelo de la Cámara		FC300X_3.6_4000X3000	
Exif ID	FC300X_3.6_4000X3000		
Bandas	RGB		
PARÁMETROS DEL MODELO DE LA CÁMARA			
Lente	Perspectiva	Modelo del Obturador	
Ancho de Imagen (Pixel)	4000	Ancho de Imagen (mm)	6.31748
Alto de Imagen (Pixel)	3000	Alto de Imagen (mm)	4.73811
		Tamaño del Pixel (μm)	1.57937
Distancia Focal (Pixel)	2249.02	Distancia Focal (mm)	3.55204
Punto Principal en X (Pixel)	1876.81	Punto Principal en X (mm)	2.96417
Punto Principal en Y (Pixel)	1421.31	Punto Principal en Y (mm)	2.24478
Modelo de la Cámara con Distorsión		5	
Distorsión Radial R1	-0.014393	Distorsión Tangencial T1	0.00127711
Distorsión Radial R2	1.0125235	Distorsión Tangencial T2	0.00042117
Distorsión Radial R3	-2.2309E-05		

- GSD y altura de vuelo: Por la orografía de la zona, la altura de vuelo se mantendrá constante para cada misión, además debido al tipo de terreno se debe elegir una que permita incluir mucho contenido identificable entre fotografías. Por lo tanto el GSD del proyecto se definirá en un valor máximo de 5cm lo que permitirá tener un nivel de detalle alto.
Se calcula entonces la altura de vuelo según la ecuación 4.9, para lo que se hacen iteraciones hasta obtener un resultado aceptable:
 - De ecuación 4.9 y una altura de vuelo de 100m:



$$GSD = \frac{100\text{m} \times 6.31748\text{mm} \times 100\text{cm/m}}{3.55204\text{mm} \times 4000\text{px}} = 4.44637\text{cm/px}$$

- De ecuación 4.9 y una altura de vuelo de 110m:

$$GSD = \frac{110\text{m} \times 6.31748\text{mm} \times 100\text{cm/m}}{3.55204\text{mm} \times 4000\text{px}} = 4.89101\text{cm/px}$$

Debido a las limitantes del vuelo programado estas son las alturas de vuelo que brindaran resultados cercanos a una GSD de 5cm, para lo cual se selecciona una **altura de vuelo de 100m** por posibles variaciones con un **GSD estimado de 4.45cm/px**.

- Tipo de plan de adquisición: Este será de **tipo rejilla** y se ejecutarán **múltiples misiones** para cubrir las zonas del proyecto y sus alrededores.
- Traslape: Este será de **90% frontal y 80% transversal**, referido a la dimensión vertical de la fotografía (debido a las limitaciones de la aplicación). Para terrenos similares se recomienda valores de traslape altos, mayores a 85% en el frontal y 70% en el transversal.
- Velocidad de vuelo: Esta depende de varios factores y ya que el vuelo no se realizará de forma manual, esta variable se configurará en “Fast” en la aplicación para optimizar el consumo de batería.
- Tiempo de Vuelo: Este depende de varios factores. Se realizarán misiones con un porcentaje de batería mayor al 85% y en misiones de duración, por seguridad, no mayor a **11 minutos**. Ya que el tiempo máximo de vuelo del drone es de 18 minutos y según la ecuación 4.14 se tiene:
 - El tiempo de vuelo, del nivel útil de batería ($N_{\text{Útil}} = \text{Nivel de batería}-20\%$), en condiciones óptimas (carga completa) será:
$$\left(\frac{t_{\text{Máx}}}{N_{\text{Más}}}\right) \times N_{\text{Útil}} = \left(\frac{18\text{min}}{100\%}\right) \times 80\% = 14.4\text{min}$$
 - El porcentaje, del nivel útil de batería (comparado con las condiciones óptimas), gastado en un vuelo de 11 minutos será:



$$P_B = \frac{t_p}{\left(\frac{t_{M\acute{a}x}}{N_{M\acute{a}s}}\right) \times N_{\acute{u}til}} \times 100\% = \frac{11\text{min}}{\left(\frac{18\text{min}}{100\%}\right) \times 80\%} \times 100\% = 76.39\%$$

- **Dimensión de la misión:** Este se define en AutoCAD Civil 3D como se describe en la sección 4.4.3.2. Según el GSD, la altura de vuelo, una configuración de proporción de 4:3 en la fotografía y los parámetros de la cámara ya descritos. Se calculan entonces los elementos para definir el modelo básico de la misión (Tabla 16) a partir del cual se cubrirá el proyecto:

Tabla 16. Definición de las características del modelo básico de la misión.

Fuente: Grupo de tesis.

▪ Ancho = 4000px × 4.44637 cm/px = 177.85m	De ecuación 4.7
▪ Alto = 3000px × 4.44637 cm/px = 133.39m	De ecuación 4.7
▪ $B = S_1 \left(1 - \frac{p\%}{100}\right) = 133.39 \left(1 - \frac{90}{100}\right) = 13.339\text{m}$	De ecuación 4.11
▪ $A = 2 \times B = 2(13.339\text{m}) = 26.678\text{m}$	Por limitante de Pix4D Capture

El la figura se esquematiza el modelo básico para la misión de vuelo y los elementos que la definen recién descritos:

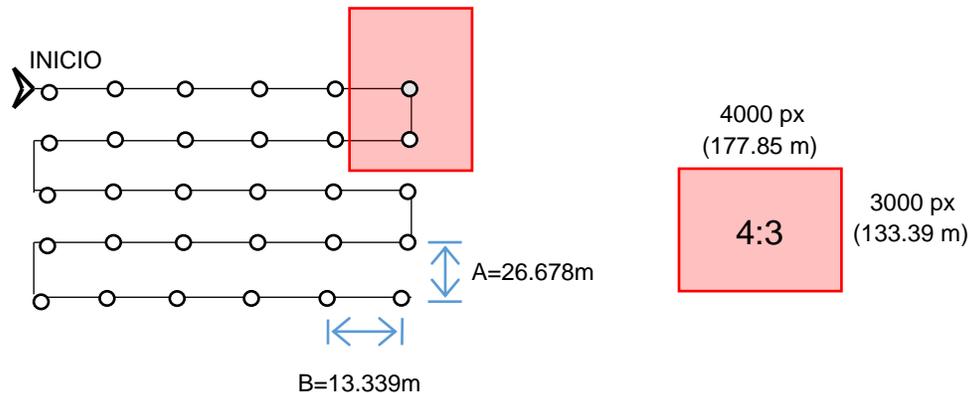


Figura 51. Modelo básico para la misión de vuelo.

Fuente: Grupo de tesis.

Definido el modelo se verificará su compatibilidad con la configuración de Pix4D Capture, para lo cual se dimensiona una rejilla con un número de



pasadas donde no se superen 11 minutos de vuelo. Se tienen los siguientes resultados:

*Tabla 17. Dimensiones de las misiones para el proyecto.
Fuente: Grupo de tesis.*

TIPO	N° DE PASADAS	DIMENSIONES EN PIX4D CAPTURE		DISTANCIA ENTRE PASADA (m)	N° DE FOTOGRAFÍAS	
		Y (m)	X (m)		POR PASADA	TOTAL
A	8	211	365	26.375	27	216
B	9	243	322	27	23	207
C	10	276	287	27.6	20	200
D	11	308	269	28	19	209

Las distancias entre pasada para cada tipo de rejilla se calcula dividiendo la distancia mínima necesaria para hacer ese número de pasadas entre el número de pasadas. Dividiendo esta distancia por dos se tendrá el recorrido entre capturas fotográficas.

La mayor distancia entre líneas de vuelo es de 28 m y entre fotografías consecutivas de 14 m, ya que estos cubren todos los escenarios se usarán para dimensionar el traslape entre misiones.

Se distribuyen las misiones de modo que cubran la zona del proyecto (Figura 52).

- Traslape entre vuelos: Para asegurar la cobertura entre las misiones se solaparan los vuelos:
 - **A lo largo de sus líneas de vuelo** el equivalente a 1.5 veces la distancia entre pasadas. Serán entonces **42 metros** (1.5 veces 28 m).
 - **A lo largo de la zona perpendicular a las líneas de vuelo** (zona de inicio/fin de las líneas de vuelo) el equivalente a 1.5 veces la distancia entre capturas fotográficas continuas en una pasada. Serán entonces **21 metros** (1.5 veces 14 m).



- **Coordenadas:** Las coordenadas del centro de cada misión se extraen según lo descrito en la sección 4.4.3.2 para un total de 18 misiones de vuelo (Tabla 18).

El proyecto completo se esquematiza en la figura:

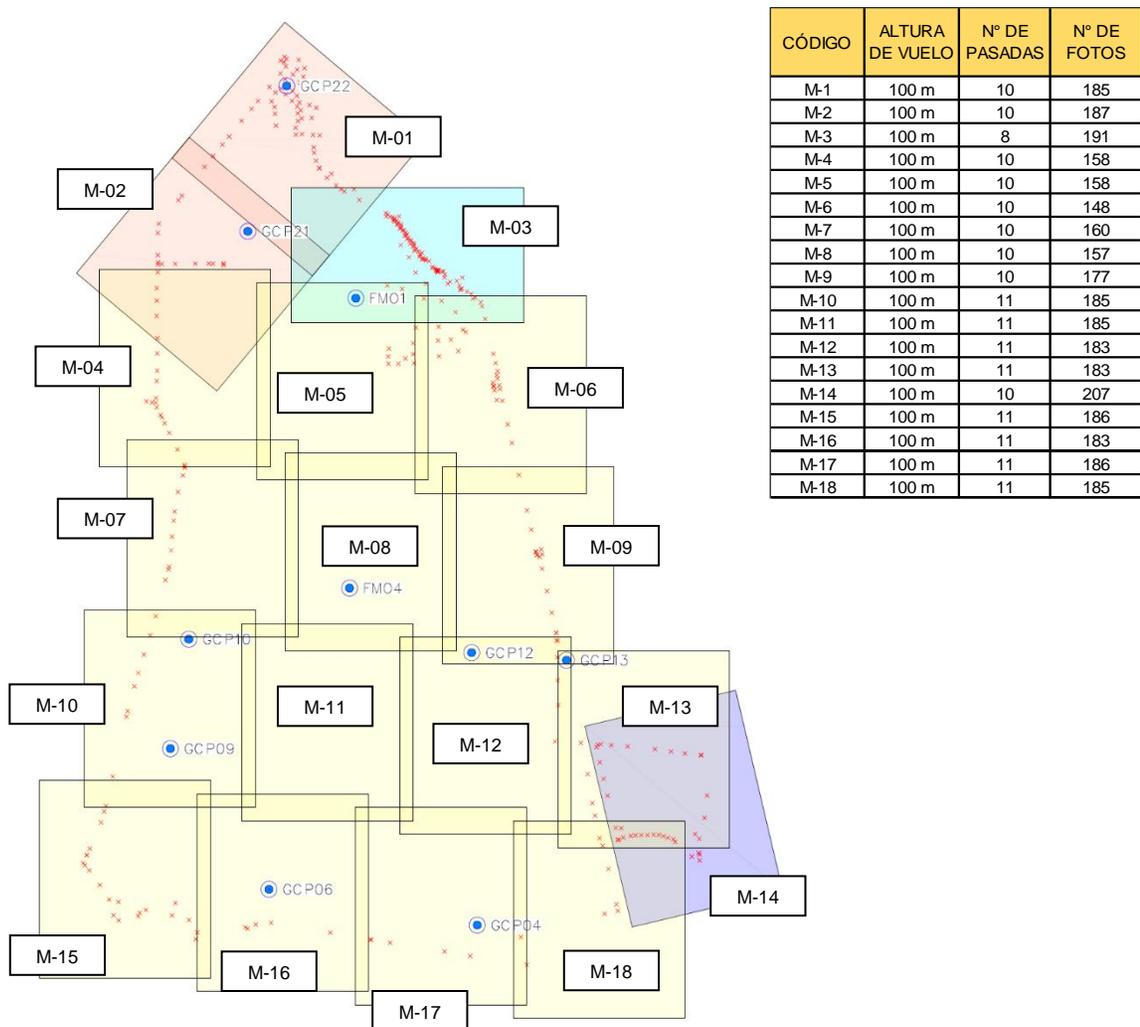


Figura 52. Distribución de las misiones de vuelo.
Fuente: Grupo de tesis.



Tabla 18. Coordenadas de las misiones para el proyecto.
Fuente: Grupo de tesis.

CÓDIGO	DIMENSIONES	ORIENTACIÓN	TRASLAPE		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS UTM	
			L	T	LATITUD	LONGITUD	Y	X
M-1	287 m x 276 m	NW-SE	90%	80%	13.44350927	-88.1592077	1486495.054	374508.18
M-2	287 m x 276 m	NW-SE	90%	80%	13.44187956	-88.1605857	1486315.492	374358.136
M-3	364 m x 211 m	W-E	90%	80%	13.44201892	-88.1576241	1486329.398	374678.857
M-4	269 m x 308 m	W-E	90%	80%	13.44041747	-88.1508434	1486153.898	374329.472
M-5	270 m x 308 m	W-E	90%	80%	13.44023817	-88.158552	1486132.898	374577.472
M-6	271 m x 308 m	W-E	90%	80%	13.44005885	-88.1562606	1486111.898	374825.472
M-7	272 m x 308 m	W-E	90%	80%	13.43801458	-88.1604281	1485887.898	374373.181
M-8	273 m x 308 m	W-E	90%	80%	13.43783527	-88.1581368	1485866.898	374621.181
M-9	269 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.42765595	-88.1558454	1485845.898	374869.181
M-10	270 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43560695	-88.1610408	1485621.898	374305.593
M-11	271 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43542765	-88.1587494	1485600.898	374553.593
M-12	272 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43524832	-88.1564581	1485579.898	374801.593
M-13	273 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43506898	-88.1541667	1485558.898	375049.593
M-14	322 m x 275 m	NW-SE	90%	80%	13.43423284	-88.1535778	1485466.112	375112.927
M-15	269 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43319921	-88.1616771	1485355.898	374235.439
M-16	270 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43301991	-88.1593858	1485334.898	374483.439
M-17	271 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43284059	-88.1570945	1485313.898	374731.439
M-18	272 m x 309 m	W-E	90%	80%	13.43266125	-88.1548031	1485292.898	374979.439

4.7.1.1 EJECUCIÓN

Las misiones se desarrollaron en el transcurso de 4 días del 21 al 24 de junio del 2016. Ya que por lo general se prefieren fotos con poca sombra, se intenta volar en horas cercanas al mediodía. Las sombras producen errores en el proceso de restitución. Las horas útiles de vuelo están relacionadas con la altura del sol sobre el horizonte, función de la latitud, de la fecha y la hora.

El programa de ejecución de las misiones se define en la siguiente tabla:



Tabla 19. Cronograma de ejecución de las misiones de vuelo del proyecto.
Fuente: Grupo de tesis.

FECHA	MISIONES	CÓDIGO	DURACIÓN (MIN:SEG)	HORA
21/06/2016	Misión 1	M-01	09:10	10:33:00 a.m.
	Misión 2	M-02	09:01	11:18:00 a.m.
	Misión 3	M-03	08:44	03:14:08 p.m.
22/06/2016	Misión 4	M-04	08:15	10:25:22 a.m.
	Misión 5	M-05	07:58:	10:56:43 a.m.
	Misión 6	M-06	07:46	11:19:39 a.m.
	Misión 7	M-07	08:09	12:22:38 p.m.
	Misión 8	M-08	08:09	01:09:39 p.m.
23/06/2016	Misión 9	M-09	08:59	09:50:52 a.m.
	Misión 10	M-10	09:13	10:34:57 a.m.
	Misión 11	M-11	09:05	11:05:12 a.m.
	Misión 12	M-12	09:00	02:07:50 p.m.
	Misión 13	M-13	09:09	02:32:06 p.m.
	Misión 14	M-14	10:12	02:48:23 p.m.
24/06/2016	Misión 15	M-15	09:16	10:04:46 a.m.
	Misión 16	M-16	08:50	10:41:50 a.m.
	Misión 17	M-17	09:14	11:16:18 a.m.
	Misión 18	M-18	09:03	11:34:01 a.m.

4.7.2 APOYO TERRESTRE

4.7.2.1 EQUIPO UTILIZADO

La obtención de los datos se realizó con el equipo ACNOVO GX9 GNSS (en modo de trabajo RTK), debido a las precisiones centimétricas que ofrece. El equipo utilizado está compuesto por una base, un rover, el colector de datos y los accesorios.



La técnica de posicionamiento RTK se basa en la solución de la portadora de las señales transmitidas por los sistemas globales de navegación por satélites GPS, GLONASS y Galileo. Una estación de referencia provee correcciones instantáneas para estaciones móviles, lo que hace que con la precisión obtenida se llegue al nivel milimétrico.

La estación base retransmite la fase de la portadora que midió, y las unidades móviles comparan sus propias medidas de la fase con la recibida de la estación de referencia. Esto permite que las estaciones móviles calculen sus posiciones relativas con precisión milimétrica, al mismo tiempo en que sus posiciones relativas absolutas son relacionadas con las coordenadas de la estación base.



Figura 53. Equipo ACNOVO GX9 GNS.

4.6.7.2 OBTENCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL Y GCP

La obtención de puntos de control se realiza con él con el objetivo de fijar los límites de la Facultad Multidisciplinaria Oriental, ya que la vegetación no permite observarlos claramente desde las fotografías aéreas; el trazado del perímetro se



realizará a través de estos puntos para obtener una mayor precisión en la vectorización de los linderos.

Para la obtención de los puntos de control topográficos de los linderos del área se partió de una base de datos conocida¹⁵, las dos estaciones geodésicas que se utilizaron para el posicionamiento de la base fueron las FMO1 para la obtención de puntos de costado norte; y para la obtención de puntos de la zona sur de la facultad, se estableció en la estación geodésica FMO4, partiendo de los monumentos ya construidos dentro de la facultad.



Figura 54. Desarrollo del trabajo topográfico.

Fijación de la base en FMO4 (Izquierda) al norte de la cancha de agronomía y del FMO1 (Centro) al costado norte de edificio del edificio de Unidad Bibliotecaria. (Derercha) Recolección de datos de linderos. Fuente: Grupo de tesis.

También se tomaron puntos de apoyo (CGP) para el ajuste del modelo estereoscópico a los cuales se les asignaron coordenadas mediante el uso del

¹⁵ Los datos se tomaron del trabajo de grado MANUAL TÉCNICO PARA EL LEVANTAMIENTO GEODÉSICO CON GPS DE UNA FRECUENCIA APLICANDO EL SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN (GNSS) UTILIZANDO UN MODELO GEOIDAL Y SU ANÁLISIS COMPARATIVO CON LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL presentado en marzo del 2014 en la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador.



mismo equipo aplicando el método de medición cinemático en tiempo real (RTK). Se colocaron estacas al nivel del terreno para señalar los puntos y finalmente se colocaron marcas cuadradas de 50x50 cm hechas de cartón y forradas con papel blanco y azul que servirían para su identificación en la fotografías.

Se comprobaron las coordenadas de los monumentos con el uso del RTK el cual se configuro en el sistema Lambert en base a los datos descritos en la siguiente tabla:

Tabla 20. Datos para la proyección Lambert 3 Parámetros El Salvador.
Fuente: Centro Nacional de Registro.

DATUM HORIZONTAL: NAD 27 EL SALVADOR		
PROYECCIÓN		CÓNICA CONFORMAL LAMBERT (2 PARALELOS) 3 PARÁMETROS EL SALVADOR
a	Esferoide:	Clarke 1866
	➤ Semieje Mayor del Elipsoide:	6378206.4 m
	➤ Semieje Menor del Elipsoide:	6356583.8 m
	➤ Achatamiento 1/f:	294.9786982139
	➤ Excentricidad:	0.006758657997291
b	Falso Este:	500,000.000 m
c	Falso Norte:	295,809.184 m
d	Latitud de Origen de la Proyección:	13°47'00" N
e	Longitud de Origen de la Proyección:	89°00'00" W
f	Primer Paralelo Normal:	14°15'00" N
g	Segundo Paralelo Normal:	13°19'00" N
h	Factor de Escala en el Origen:	0.99996704
PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN		Método Molodensky (WGS-84 a Lambert NAD 27, 3 Parámetros El Salvador)
	➤ Tx:	0 m
	➤ Ty:	105.5 m
	➤ Tz:	197.2 m



4.7.2.3 RESULTADOS

Como resultado de esta fase topográfica se identificaron 27 puntos distribuidos dentro de la zona del proyecto, como candidatos a GCPs, los cuales se marcaron con una estaca y se procedió a la toma de sus coordenadas (como se describió anteriormente).

Por su distribución favorable se seleccionaron 11 de estos puntos para usarse en la etapa de procesamiento, los otros restantes fueron usados como puntos de amarre manuales (Manual Tie Points) o puntos de apoyo (Check Points) en el proyecto.

Se recuperaron del terreno un total de **362 puntos** de los cuales 6 corresponden a los monumentos tipo 3, de la red geodésica, ubicados en la facultad, 10 al lindero de la facultad formado por el río El Jute (al costado suroeste), 8 de vías de acceso pavimentadas, 20 a cercos internos, 182 a los vértices de los linderos, falsos, esquinas y elementos del perímetro de la facultad, 104 puntos de nivel y 27 posibles GCPs.

En la figura se presenta la distribución dentro del terreno y los GCPs utilizados. Las coordenadas tomadas en proyección Lambert y su correspondiente en WGS-84/UTM zona 16N se detallan a continuación:

*Tabla 21. Coordenadas de los puntos de apoyo.
Fuente: Grupo de tesis.*

PROYECCIÓN	LAMBERT 3 PARÁMETROS EL SALVADOR			WGS-84/UTM ZONA 16N		
	NORTE	ESTE	ALTURA	NORTE	ESTE	ALTURA
FMO1	258047.7569	591142.8368	95.7004	1486257	374612	95.7004
FMO4	257595.4531	591132.9239	89.7239	1485805	374598	89.7721
GCP04	257069.5938	591333.3014	86.1996	1485278	374794	86.1996
GCP06	257125.4396	591006.4610	87.1916	1485336	374468	87.1916



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

GCP09	257344.9578	590851.7036	88.2800	1485557	374315	88.28
GCP10	257515.7435	590880.6134	88.1990	1485727	374345	88.199
GCP12	257494.6474	591324.6546	91.5938	1485703	374789	91.5938
GCP13	257482.9155	591473.5412	89.2613	1485690	374938	89.2613
GCP21	258151.9826	590973.2911	95.2072	1486363	374443	95.2072
GCP22	258378.9103	591034.2217	96.5226	1486589	374506	96.5226
GCP26	258155.4896	591323.5762	94.5505	1486363	374793	94.5505



Figura 55. Ubicación de los puntos tomados durante la fase de apoyo topográfico.
Fuente: Imagen satelital recuperada de Google Earth y proyección de los puntos en AutoCAD Civil 3D por el Grupo de tesis.

CAPÍTULO 5.



*PROCESAMIENTO DIGITAL DE
IMÁGENES Y GENERACIÓN DE
PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS*



5.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

En el capítulo anterior se describieron los principios básicos que determinan la planificación y ejecución de un proyecto de vuelo fotogramétrico. El resultado de la ejecución de éste proyecto es un conjunto de información aérea (fotografías georreferenciadas) y terrestre (puntos de apoyo y puntos de control) que permite proceder a la etapa de procesamiento de datos.

En la etapa de procesamiento de datos se utiliza un software especializado en fotogrametría que hace uso de los principios fundamentales de la técnica para hacer el tratamiento digital de las imágenes, integrando la información de cada imagen aérea georreferenciada y de los puntos de apoyo terrestre para la obtención de un modelo tridimensional de la superficie, una imagen rectificadas de la zona en tratamiento y la generación de cartografía básica.

Existe una variedad de programas especializados capaces de realizar procesamientos fotogramétricos y el posterior tratamiento de estos, creando una nube de puntos con coordenadas x , y , z , un modelo digital del terreno y composición de una ortoimagen georreferenciada. Programas como Photomodeler, Agisoft Photoscan o Pix4D Mapper se encargan de generar un modelo con el conjunto de los datos obtenidos. Éste último programa es el utilizado para el tratamiento de las fotografías obtenidas en la etapa anterior del proyecto presentado.

5.1.1 PIX4D MAPPER

Pix4D Mapper es un software especializado en fotogrametría que permite convertir imágenes en modelos 3D y ortomosaicos 2D georreferenciados.

La creación de proyectos en Pix4D se realiza a partir de conjuntos de imágenes tomadas de forma terrestre o aérea según el tipo de proyecto, haciendo posible el tratamiento de fotografías adquiridas diversas formas.



Pix4D Mapper permite procesar imágenes adquiridas con cámaras compactas ligeras, DSLR, de gran formato, de acción y con soportes.



Figura 56. Tipos de cámara soportados por Pix4D.

Las cámaras se pueden cargar en cualquier plataforma:

- UAVs para aficionados.
- UAVs profesionales.
- Aeronaves tripuladas.
- Helicópteros.
- Vehículos terrestres.
- Ninguna plataforma, para las imágenes terrestres (tomada con la mano).

Pix4Dmapper puede procesar las imágenes independientemente de las especificaciones espectrales de la cámara:

- Cámaras RGB.
- Cámaras NIR.
- Cámaras térmicas.
- Etcétera.

El software ofrece varias plantillas configuradas para el tratamiento de imágenes en casos particulares, permitiendo la creación de modelos 3D de objetos, mapas de reflectancia para agricultura de precisión y mapas 3D de superficies, entre otras opciones, siendo posible también crear plantillas personalizadas que se adapten mejor a las características particulares de cada proyecto.



Para la creación de mapas 3D el programa utiliza como imágenes de entrada cualquier fotografía aérea adquirida usando un plan de vuelo, sobre todo orientadas hacia el suelo.

En la etapa inicial del procesamiento Pix4D Mapper hace una triangulación aérea que permite la búsqueda de coincidencias entre fotografías para hacer emparejamientos y crear puntos de paso.

La segunda parte del procesamiento consiste en la densificación de la nube de puntos creada, donde es posible clasificar estos puntos entre terreno y objetos, según las dimensiones de cada conjunto de puntos. Luego de la densificación se crea la malla 3D texturizada, que es un modelo en tres dimensiones del terreno, donde son triangulados los puntos densificados de la nube.

Posterior a la segunda etapa se procede a la creación del ortomosaico, una composición de imágenes a la que se le han corregido todos los errores geométricos para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular.

El software permite salidas en diferentes formatos digitales de los productos generados en las diferentes etapas, para poder darles un tratamiento en otros programas.

5.1.1.1 VERSIONES DEL SOFTWARE

Pix4DMapper ofrece dos versiones para los usuarios: Pix4DMapper Discovery y Pix4DMapper Pro. La primera opción es una versión gratuita del programa, que permite realizar la primeras dos etapas del procesamiento, con algunas restricciones como la imposibilidad de clasificar automáticamente los puntos de la nube entre como parte del terreno o como objetos.

En la versión Pro del programa están disponibles todas las opciones de procesamiento ofrecidas por el programa, no disponibles en la versión Discovery.



La licencia de la versión Pro puede adquirirse con pagos para su uso durante un mes, un año o por tiempo ilimitado. También está disponible la opción de activar la versión Pro por un corto período de prueba para usuarios de Pix4D Mapper Discovery.

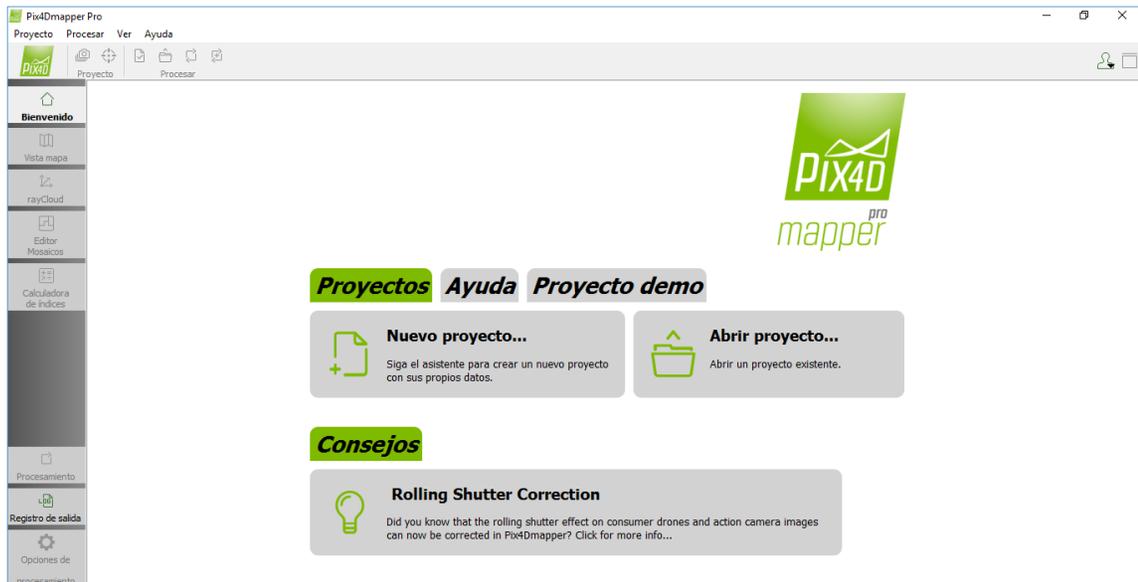


Figura 57. Pantalla de bienvenida de Pix4D Mapper Pro.

5.1.1.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los requerimientos mínimos del software (versión 2.1) son:

- ✓ Windows 7, 8 o 10 de 64 bits
- ✓ Procesador de dos núcleos
- ✓ 4 GB de RAM (Mínimo)
- ✓ Tarjeta Gráfica Nvidia o AMD no inferior a 2008 y modelos Intel de 2012.

Las características recomendadas del equipo son:

- ✓ Procesador de seis núcleos i7 o Xeon.
- ✓ 16 GB de RAM (o más dependiendo de la cantidad de datos a procesar).
- ✓ GPU compatible con CUDA.



Para equipos con OS X el software está disponible únicamente en versión beta. Los requerimientos mínimos recomendados son:

- ✓ Procesador i7.
- ✓ 16 GB de RAM (para proyectos grandes y procesamiento rápido).

5.1.2 PROYECTO UES FMO

El procesamiento de las imágenes captadas con el vehículo aéreo no tripulado en el proyecto de vuelo fotogramétrico en la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador se realizó en Pix4DMapper, con una cuenta de usuario de la versión Pro del software.

Las imágenes fueron adquiridas utilizando un drone pilotado a través de la aplicación para móviles Pix4DMapper Capture, que permite la programación y ejecución del plan de adquisición de fotografías aéreas de acuerdo a las necesidades del proyecto, como se describió en el capítulo 4.

5.1.2.1 CREACIÓN DEL PROYECTO EN PIX4D MAPPER

Para iniciar el procesamiento de las imágenes en el programa es necesaria la creación de un proyecto, contando con dos opciones para realizar esta acción: crear un nuevo proyecto y crear un proyecto combinando proyectos existentes.

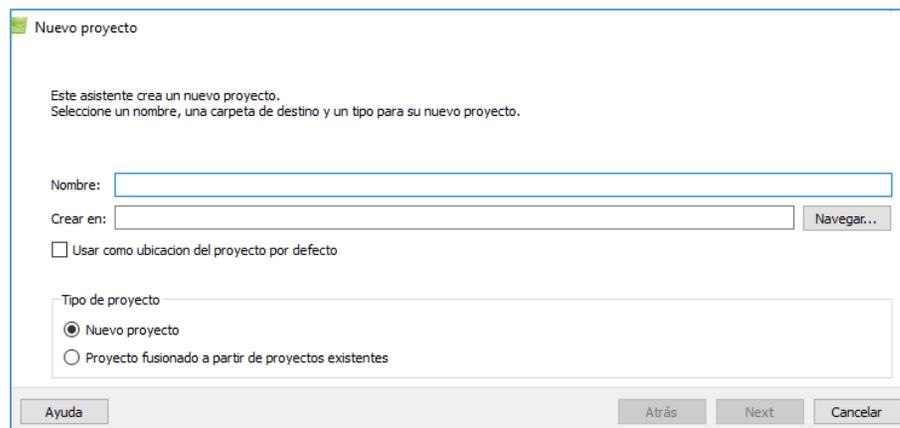


Figura 58. Asistente de creación de proyectos de Pix4D Mapper.



Luego de asignar un nombre y ruta al nuevo proyecto se procede a seleccionar las imágenes que serán procesadas, de forma individual o seleccionando todas las que se encuentren en ficheros seleccionados.

Una vez que todas las imágenes han sido seleccionadas se puede continuar con la creación del proyecto; el software no permite añadir más imágenes al proyecto una vez que éste ha sido creado. Si las imágenes que fueron añadidas son movidas de su ubicación original antes de finalizar el procesamiento éste no podrá ser ejecutado con éxito; si son movidas cuando el procesamiento ha finalizado, Pix4D solicitará la nueva ubicación de las imágenes. Es importante no renombrar éstas para que puedan ser encontradas por el software.

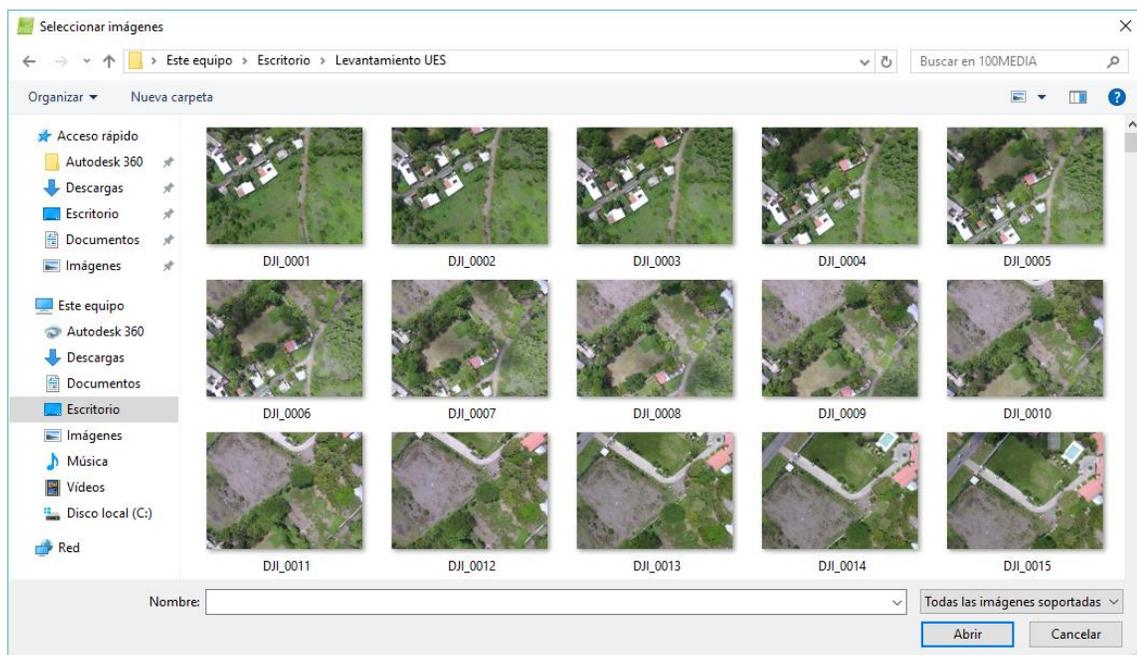


Figura 59. Selección de las imágenes agregadas al proyecto.

Al finalizar la selección de las fotografías que serán procesadas, el software lee la información EXIF de cada una para registrar su geolocalización, siendo posible importar la información de localización desde un archivo externo en caso de que las fotografías no estén georreferenciadas en el Exif.



Pix4D también identifica el sistema de coordenadas en que fue registrada la localización de las fotografías, además del modelo (o modelos) de cámara con que se adquirieron las imágenes y los parámetros internos de cada modelo. Cada imagen es procesada tomando en cuenta el nivel de precisión de su localización y es posible seleccionar el nivel de precisión que el software estimará para cada imagen. El nivel estándar de precisión para el software es de 5m en posición horizontal y de 10m en la vertical; para ubicaciones con poca precisión se selecciona el nivel bajo, que es de 50m en la posición horizontal y de 100m en la posición vertical. También es posible establecer un valor de precisión personalizado para cada fotografía, el cual deberá definirse según la precisión del aparato utilizado para georreferenciar las fotografías.

Una vez que son verificados los sistemas de coordenadas de la localización de las imágenes, el nivel de precisión de la localización y la selección del modelo de la cámara utilizada, se procede a seleccionar el sistema de coordenadas de los archivos de salida y las unidades de medición del proyecto.

The screenshot shows the 'Nuevo proyecto' dialog box with the 'Propiedades de imagen' section. It includes options for geolocation, camera model, and a table of image data.

Activada	Imagen	Grupo	Latitude [degree]	Longitud [degree]	Altitud [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]	Omega [grado]	Phi [grado]	Kappa [grado]
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0001.JPG	group1	13.44526742	-88.15944631	197.241	5.000	10.000	-1.23904	-1.57009	-128.28660
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0002.JPG	group1	13.44520306	-88.15935883	197.041	5.000	10.000	-1.20309	-1.59779	-126.98638
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0003.JPG	group1	13.44512600	-88.15925692	197.241	5.000	10.000	-1.27496	-1.66881	-127.38815
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0004.JPG	group1	13.44496856	-88.15905153	197.241	5.000	10.000	-1.29525	-1.65311	-128.08822
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0005.JPG	group1	13.44488597	-88.15894244	197.441	5.000	10.000	-1.25269	-1.55922	-128.78655
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0006.JPG	group1	13.44480244	-88.15883292	197.341	5.000	10.000	-1.25541	-1.55703	-128.88654
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0007.JPG	group1	13.44471894	-88.15872531	197.341	5.000	10.000	-1.31535	-1.63717	-128.78824

Figura 60. Propiedades de imágenes del nuevo proyecto.



5.1.2.1.1 SISTEMAS DE COORDENADAS A UTILIZAR

Pix4D Mapper posee una amplia lista de sistemas de coordenadas en su base de datos, además de permitir cargar la configuración de sistemas de coordenadas personalizados por el usuario, a partir de un archivo de extensión .prj, que contiene información de una determinada proyección geográfica.

El archivo .prj forma parte de los ficheros informáticos generados por software GIS para el almacenamiento digital de la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. En el archivo .prj es donde se guarda la información referida al sistema de coordenadas y es generado automáticamente al asignar la proyección geográfica a una capa vectorial en software GIS o al crear una nueva proyección con parámetros personalizados.

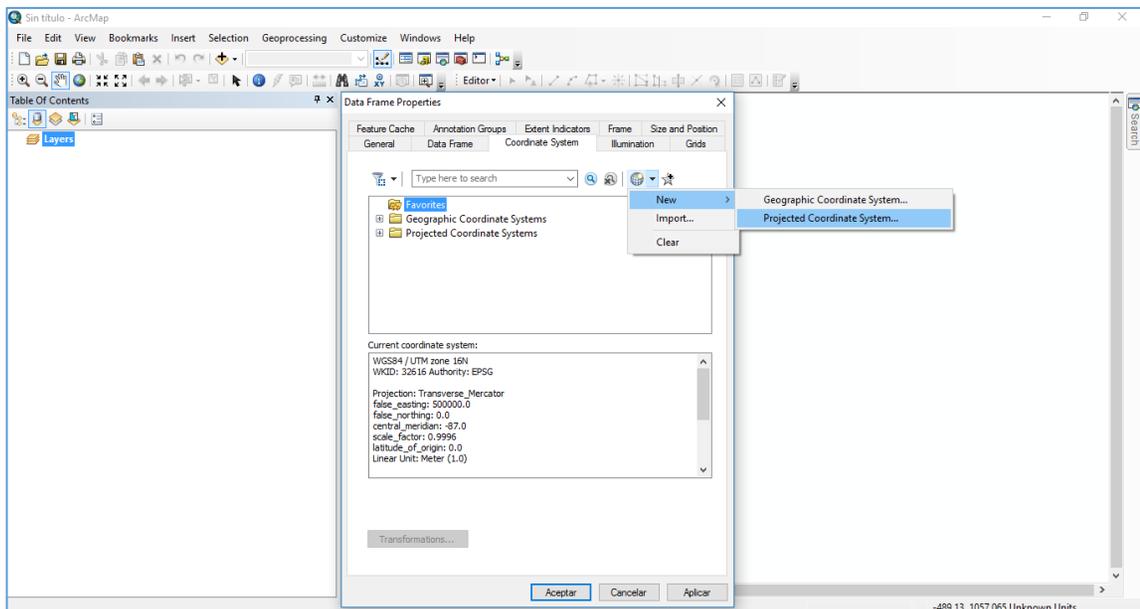


Figura 61. Creación de un nuevo sistema de coordenadas en un ArcMap 10.3.

Fuente: Grupo de tesis

Para generar un archivo .prj en ArcMap es necesario crear un nuevo y dar clic derecho sobre el elemento *Layers* en la tabla de contenido y ver sus propiedades. En la pestaña *Coordinate System* de las propiedades, se selecciona la opción



New>Projected Coordinate System... (Figura 61) y se configura la ventana con los parámetros de la proyección deseada (Figura 62).

Al crear un proyecto en Pix4D Mapper debe elegirse el sistema de coordenadas de salida de los productos del procesamiento de las imágenes, además del sistema en que serán añadidos GCPs o check points.

El sistema de coordenadas para la proyección Lambert en El Salvador existente en la base de datos de Pix4DMapper utiliza como datum Ocotepeque 1935, por lo que no es compatible con el sistema utilizado actualmente en El Salvador, que utiliza como datum NAD 27. Debido a esto se procedió a importar los parámetros de la proyección Cónica Conformal de Lambert definidos en la tabla 20, usando un archivo en formato prj generado al configurar esta proyección en ArcMap 10.3.

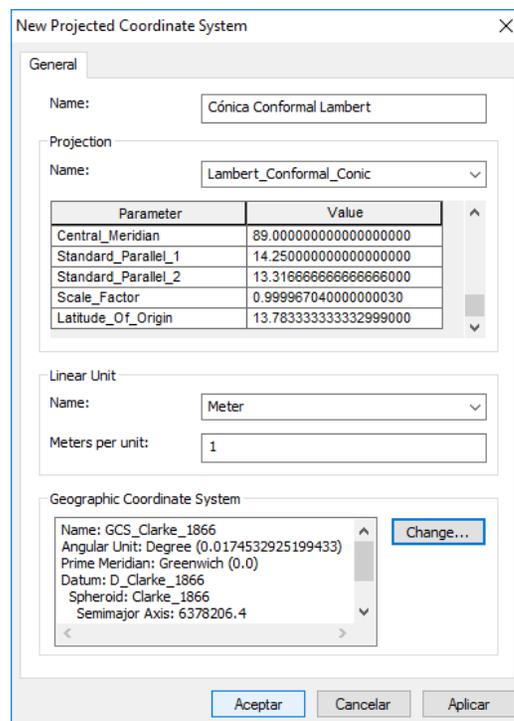


Figura 62. Ventana de creación de un nuevo sistema de coordenadas.
Fuente: Grupo de tesis



Para el procesamiento del Proyecto UES FMO se seleccionó como sistema de coordenadas de salida y de los puntos de apoyo terrestre **WGS84 / UTM zone 16N**, proyección UTM para la zona 16 norte, que usa el elipsoide WGS84 como modelo base. El motivo de selección de éste sistema de coordenadas se detalla en la sección 5.1.2.3.1 PROCESAMIENTO INICIAL > A. GESTOR DE GCP/MTP > IV. SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS.

Para obtener salidas de datos en más de un sistema de coordenadas es necesario repetir el procesamiento, pues el software genera los archivos considerando la proyección elegida.

Posterior a la selección del sistema de coordenadas de salida del proyecto y las unidades de medición es necesario seleccionar una plantilla para procesar las fotografías. Pix4D Mapper ofrece diferentes plantillas que se adaptan a las características de los proyectos, además de la opción de crear plantillas personalizadas según las necesidades del usuario.

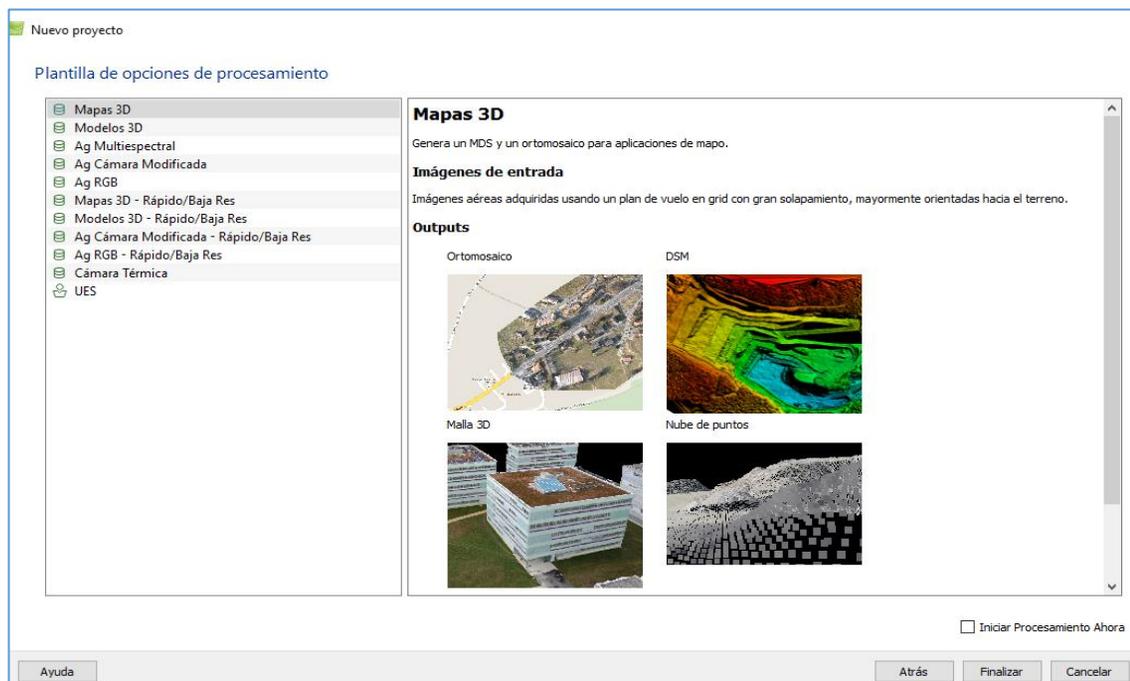


Figura 63. Plantillas de opciones de procesamiento en Pix4D Mapper.



5.1.2.2 CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DE PROCESAMIENTO

El procesamiento del proyecto UES FMO se realiza utilizando una plantilla personalizada nombrada **UES**, configurando cada opción tomando en cuenta las características del proyecto.

5.1.2.2.1 PROCESAMIENTO INICIAL

En la primera etapa del procesamiento del proyecto el software busca coincidencias entre fotografías para la creación de puntos de paso (también llamados puntos de amarre o *Tie Points*) que permitan generar una nube de puntos, utilizada para el modelado 3D de la superficie. El software integra la información de la geolocalización interna en las fotografías (si la poseen) y de puntos los de apoyo terrestre añadidos por el usuario, para hacer la triangulación aérea que definirá la posición de estos puntos de amarre.

Las opciones de procesamiento para la etapa inicial del proyecto son configuradas en tres pestañas, en la configuración general de esta etapa se estableció el uso de la escala de imagen de los keypoints a 1/2 (un medio del tamaño de la imagen), esto es ideal para grandes proyectos con alto grado de traslape. Una escala de 1/2 se puede utilizar para acelerar el procesamiento ya que, por lo general da como resultado una precisión ligeramente reducida, pues procesar a escala completa no produce resultados con una diferencia de precisión significativa.

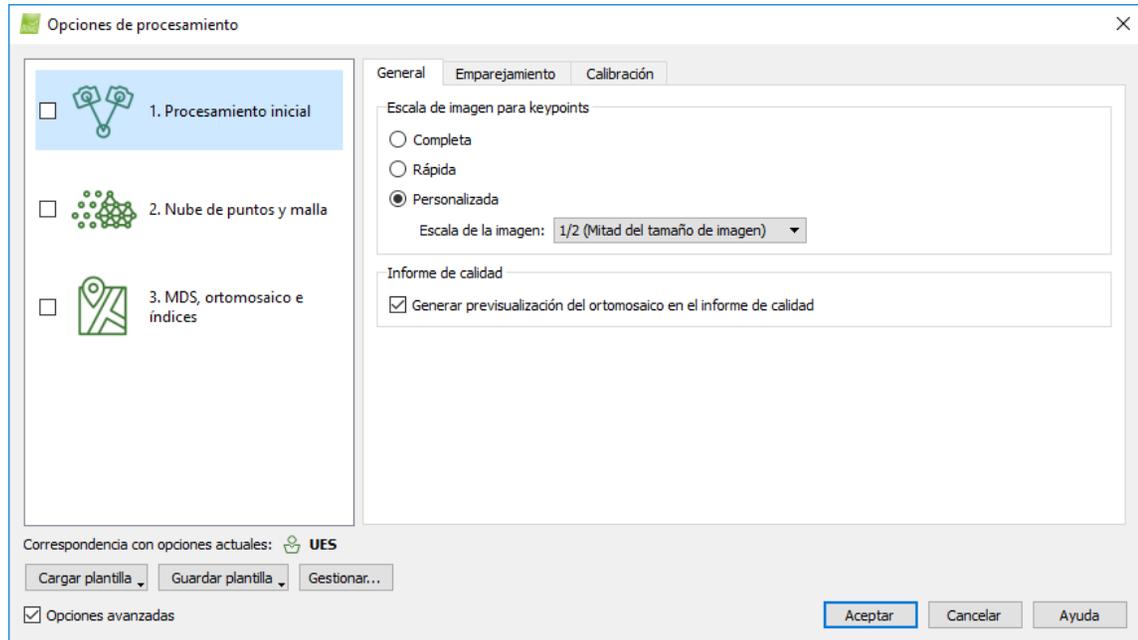


Figura 64. Configuración general de las opciones del procesamiento inicial.

En la segunda pestaña, para la búsqueda de coincidencias entre pares de imágenes se selecciona la opción de rejilla o corredor, que optimiza el pareo de imágenes en este tipo de proyectos. Se activa la opción de pareo geoméricamente verificado, una opción que hace que el procesamiento sea más lento pero con mejores resultados, ya que se tienen en cuenta las posiciones relativas de la cámara para descartar coincidencias poco realistas geoméricamente. Si no se selecciona, las coincidencias se establecen utilizando sólo el contenido de la imagen.

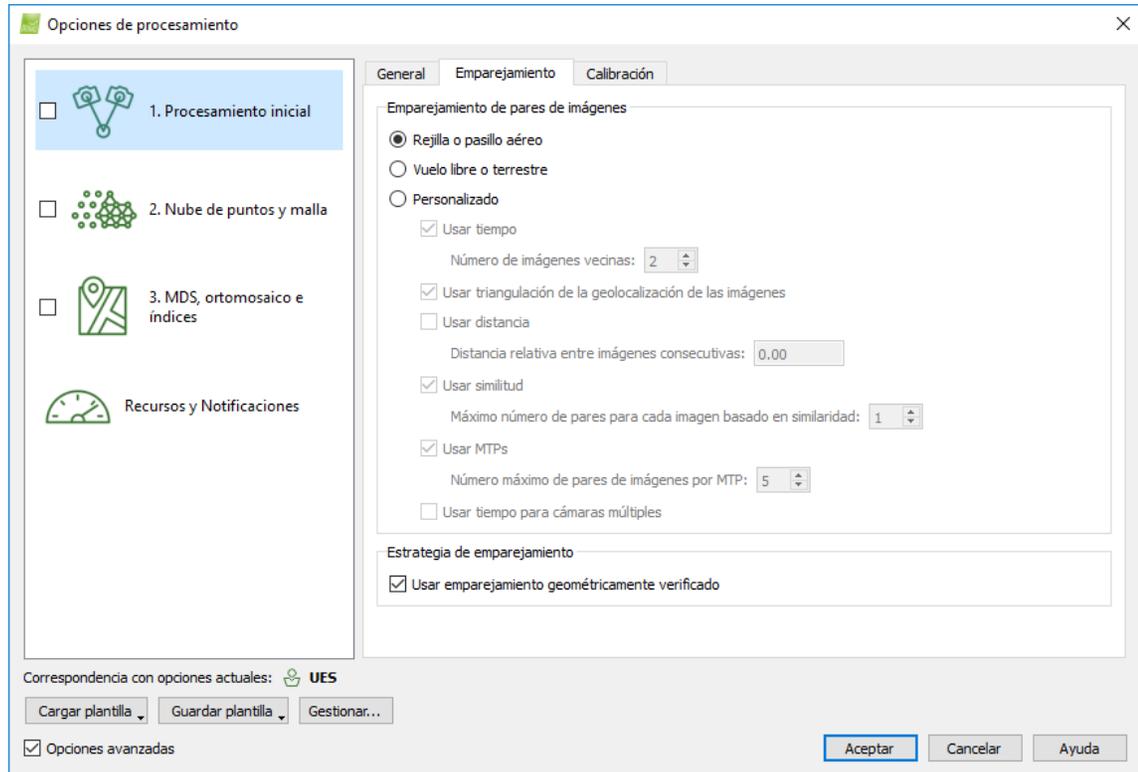


Figura 65. Configuración de las opciones de emparejamiento.

En la tercera pestaña se configuran las opciones para la calibración de las cámaras. Una imagen calibrada es aquella que tiene suficientes puntos clave (keypoints) que son emparejados de forma precisa con otras imágenes del proyecto. Cada coincidencia de puntos entre al menos dos imágenes permite la generación de un punto 3D.

Se configura el número previsto de keypoints en automático, esto permite que el programa seleccione de manera automática el número de keypoints que serán extraídos. Una configuración personalizada limitará el número de keypoints a la cantidad que el usuario defina. El método de calibración seleccionado para éste proyecto es el alternativo, una opción optimizada para imágenes aéreas nadir con geolocalización exacta, bajo contenido de textura y de terreno relativamente plano, como campos.



El proyecto es configurado para optimizar todos los parámetros internos de la cámara, pues las cámaras pequeñas, como las que se utilizan con vehículos aéreos no tripulados, son mucho más sensibles a la temperatura o vibraciones, que afecta a la calibración de la cámara. También se configura para la optimización de todos los parámetros externos de la cámara, para optimizar la rotación y la posición de ésta.

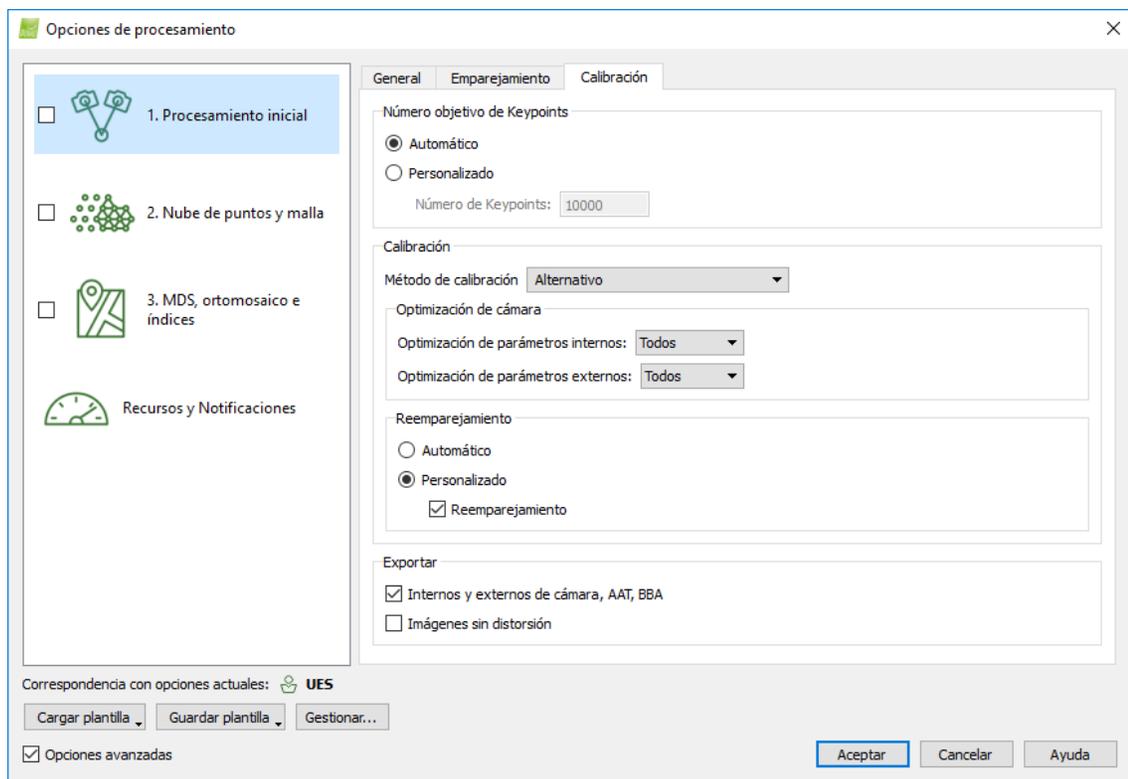


Figura 66. Configuración de las opciones de calibración.

Activar la opción de volver a emparejar permite al usuario añadir más coincidencias al finalizar la primera parte de la etapa de procesamiento inicial, que por lo general mejora la calidad de la reconstrucción.

5.1.2.2.2 NUBE DE PUNTOS Y MALLA

La segunda etapa del procesamiento consiste en la densificación de la nube de puntos y la malla 3D texturizada. Para el proceso de densificación de la nube de



puntos es considerada la escala de la imagen, la densidad de puntos deseada y la cantidad mínima de coincidencias entre fotografías para que un punto sea agregado a la nube.

La escala utilizada para el proyecto es 1/2 del tamaño de la imagen, la escala recomendada por los desarrolladores. En este caso la mitad del tamaño de las imágenes es utilizada para calcular puntos 3D adicionales. También se configuró la plantilla del proyecto para utilizar una escala múltiple, cuando se activa esta opción, los puntos 3D adicionales se calculan en múltiples escalas de imagen, empezando con la escala de imagen elegida (1/2) hasta llegar a escala de 1/8 (un octavo del tamaño de la imagen). Al estar seleccionada la escala a un medio, los puntos 3D adicionales de este proyecto se calculan en imágenes con la mitad, un cuarto y un octavo del tamaño de la imagen. Esto es útil para el cálculo de puntos 3D adicionales en las áreas de vegetación, así como mantener los detalles en áreas sin vegetación.

La densidad de la nube de puntos fue configurada para el nivel óptimo. En este nivel un punto 3D se calcula para cada $(4 / \text{Escala de la imagen})$ píxeles. Para este proyecto, con escala de un medio del tamaño de la imagen, un punto 3D se calcula para cada $4 / (0.5) = 8$ píxeles de la imagen original.

El número mínimo de coincidencias entre fotos representa la cantidad mínima de reproyecciones válidas por cada punto 3D a las imágenes. Para este proyecto fue definido 3 como valor mínimo.

Los formatos de salida elegidos para exportar la nube de puntos densificada son el formato LAS y el XYZ delimitado por comas.

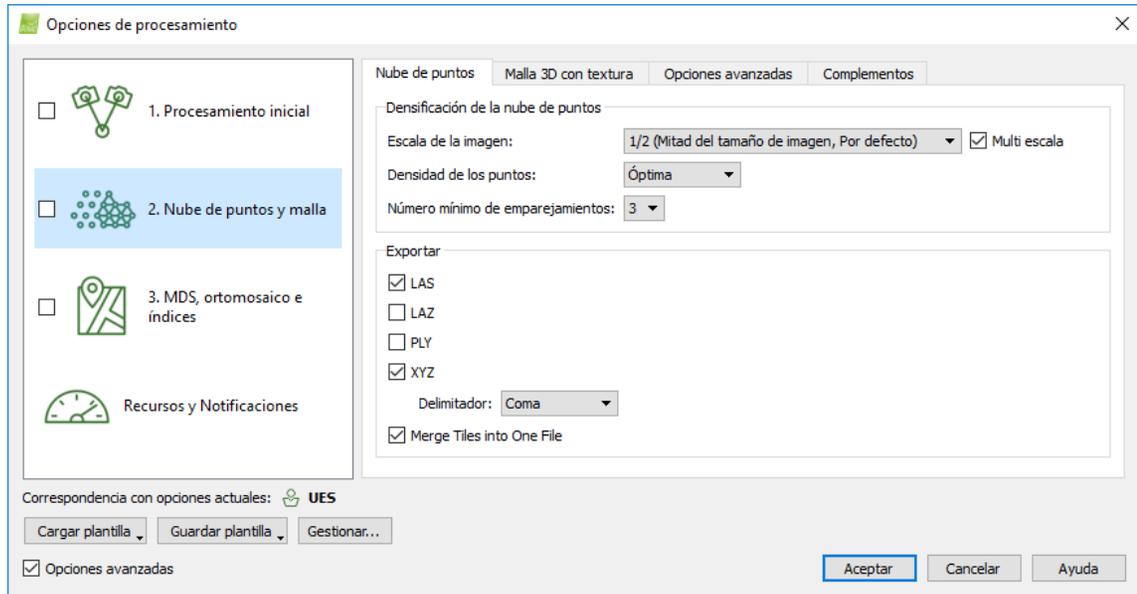


Figura 67. Configuración de las opciones de procesamiento de la nube de puntos.

La segunda pestaña a configurar para la segunda etapa del procesamiento permite al usuario elegir si se hará la creación de la malla 3D texturizada. Ésta es creada en el proyecto, utilizando una resolución baja.

Resolución media es la configuración recomendada para la mayoría de proyectos. Constituye un buen equilibrio entre el tamaño, tiempo de cálculo y el nivel de detalle de malla 3D texturizada, sin embargo en ocasiones se presentan fallas en la creación de la malla con éste nivel de resolución cuando se trabaja con grandes conjuntos de datos.

Los formatos de salida seleccionados para exportar la malla 3D texturizada son FBX, DXF, OBJ y PDF 3D.

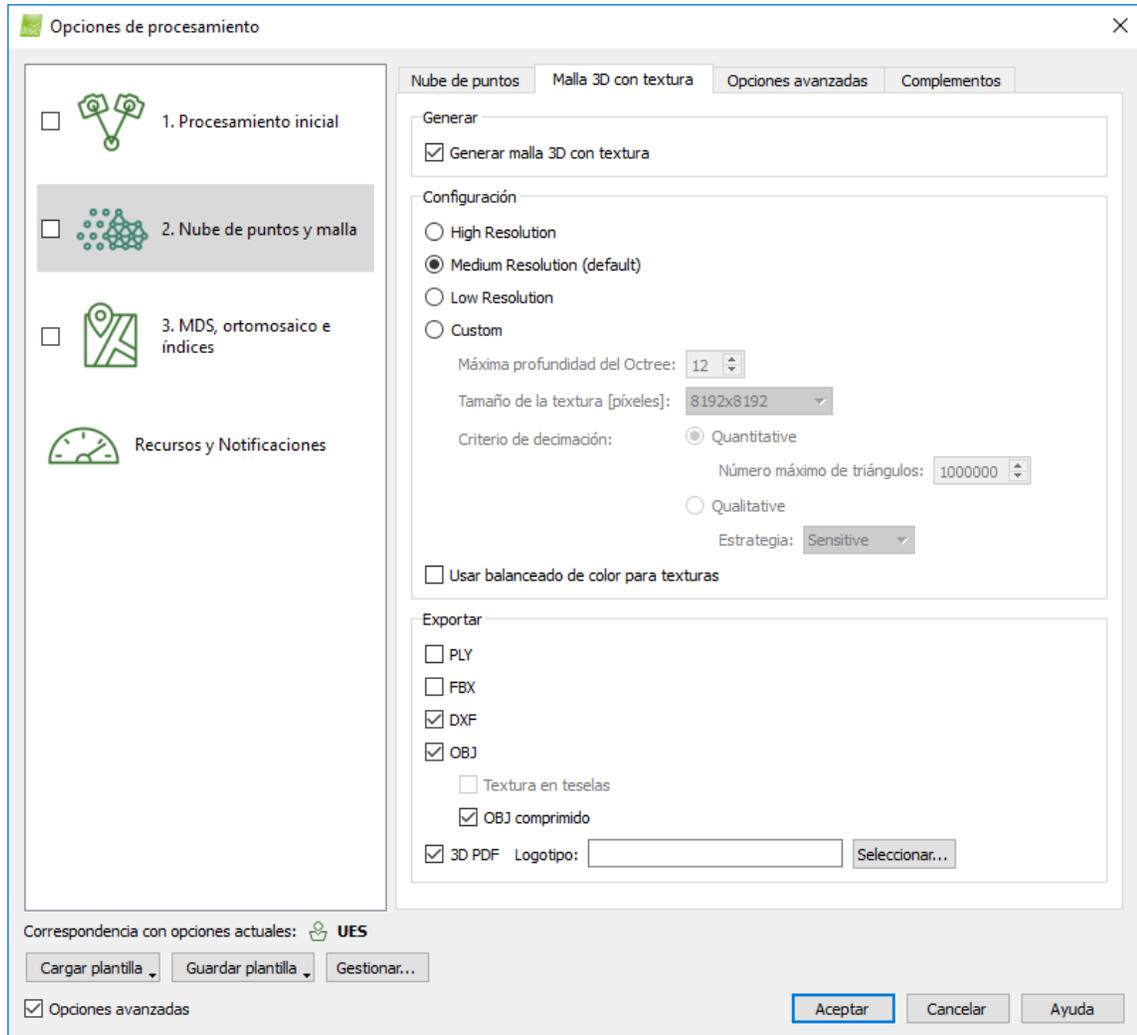


Figura 68. Configuración de las opciones de creación de malla 3D.

Las opciones avanzadas para la configuración de la segunda etapa permiten elegir el tamaño de la ventana de emparejamiento, en este caso de 7x7 píxeles, opción de procesamiento rápido recomendada para imágenes aéreas nadir; también permite elegir qué grupos de imágenes serán considerados para la densificación de la nube de puntos, además de la geometría y textura de la malla. En este proyecto se cuenta con un único grupo de imágenes (group1) que será incluido en todo el procesamiento.



Una posibilidad que ofrecen las opciones avanzadas es activar el uso de filtros para la densificación de la nube de puntos, como el uso de un área de procesamiento preestablecida, que limita el área a considerar en el procesamiento, permitiendo acortar el tiempo de la densificación y creación de la malla, además de omitir contenido no deseado. Otro filtro es el uso de anotaciones, para imágenes que tienen contenido que no desea ser incluido en la nube de puntos.

Una parte importante en esta etapa es la clasificación de la nube de puntos entre terreno y objetos, una opción que se encuentra en etapa de desarrollo (fase beta) para la etapa de procesamiento de este proyecto. Esto permite identificar en la nube de puntos todo lo que no sea parte del terreno (edificios, árboles, vehículos, etc.) para posteriormente separarlo del modelo.

La clasificación de la nube de puntos entre terreno y objetos fue configurada para que todo punto con una longitud entre 0.1m y 400m con elevación de 0.1m en adelante sea considerado como un objeto.

Finalmente, en las preferencias de la malla 3D con textura, se podrá configurar el valor del divisor de la densidad de muestra y el número de triángulos por hoja. El primer valor va de 1 (por defecto) a 5 y su aumento crea más triángulos en regiones con una menor densidad de puntos. El segundo valor se encontrará entre 8 y 128, los valores más altos conducirán a resultados menos detallados (y los tiempos de computación más rápido) ya que las regiones se subdividen con menos frecuencia. Los valores son configurados en 1 para el divisor de densidad de la muestra y 8 para el número máximo de triángulos por hoja.

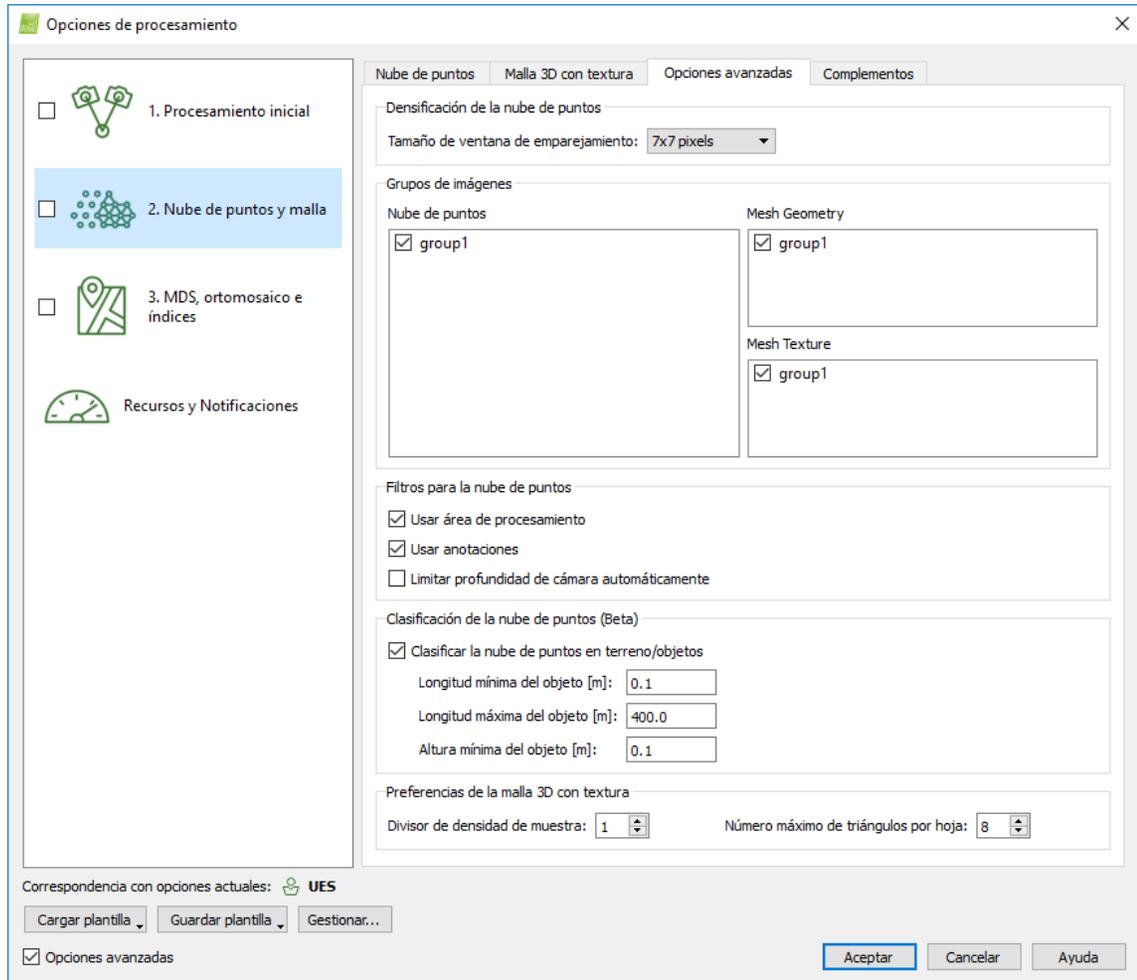


Figura 69. Opciones avanzadas del procesamiento de nube de puntos y malla.

La cuarta pestaña entre las opciones de procesamiento de la segunda etapa permite al usuario la activación de un *add-on* para la densificación de la nube de puntos, un complemento de pago que optimiza el procesamiento de imágenes con resolución mayor a 40MP, utilizando un algoritmo de coincidencia semi-Global para la densificación de nubes de puntos desarrollado por Pix4D.

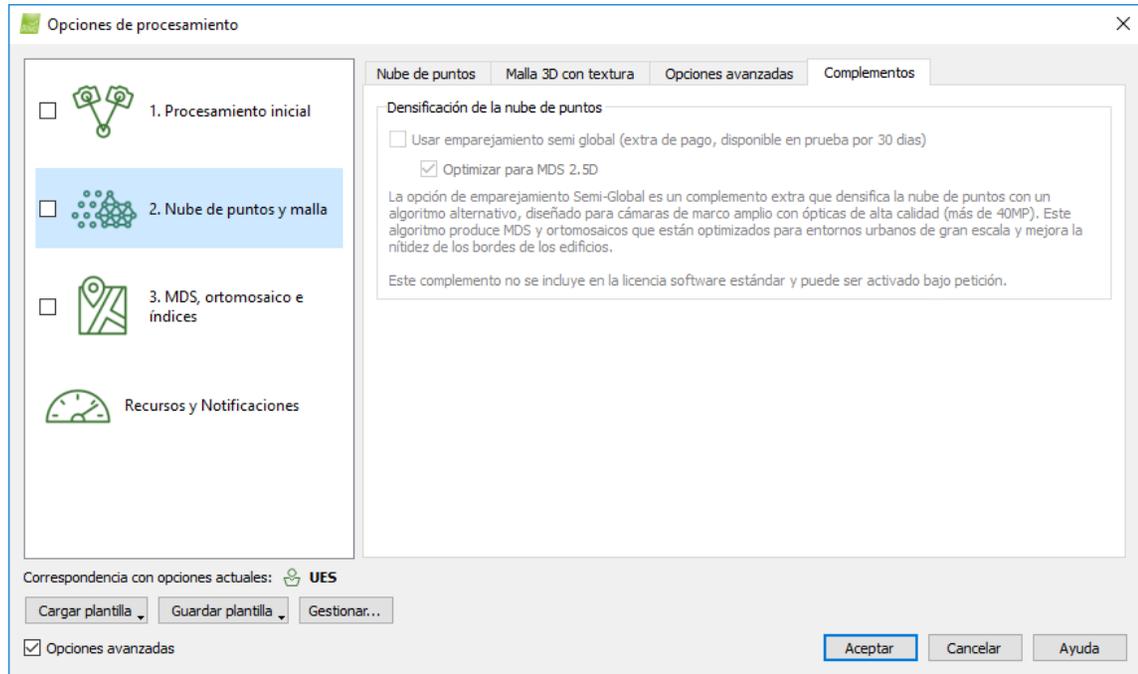


Figura 70. Complementos de la nube de puntos y malla.

5.1.2.2.3 DSM, ORTOMOSAICO E ÍNDICES

En esta etapa del procesamiento son creados el modelo digital de superficie (DSM) en diferentes formatos de salida, el ortomosaico y el mapa de reflectancia y mapas de índice.

La pestaña MDS y Ortomosaico de la configuración de la tercera etapa permite al usuario configurar las opciones de procesamiento y salidas deseadas para el modelo digital de superficie y el ortomosaico.

La resolución asignada automáticamente al ortomosaico y MDS es el GSD, pudiendo usarse múltiplos de éste. Para el proyecto UES FMO el valor de la resolución será el GSD.

El uso de filtros para el MDS permite mejorar la calidad visual del modelo. La generación de la nube de puntos puede conducir a puntos ruidosos y erróneos,



el filtrado de ruido corrige la altitud de estos puntos con la altitud media de los puntos vecinos.

Una vez que se ha aplicado el filtro de ruido, se genera una superficie usando los puntos. Esta superficie puede contener áreas con pequeñas protuberancias erróneas. El suavizado de superficie corrige estas áreas mediante el aplanamiento de ellos. Esta sección permite al usuario configurar los siguientes parámetros:

Sharp (por defecto): Trata de mantener la orientación de la superficie y mantener rasgos afilados, tales como esquinas y bordes de los edificios. Sólo áreas cuasi planas son aplanadas.

Smooth: Intenta suavizar áreas, asumiendo que existen rasgos afilados debido al ruido y que deben ser eliminados. Las áreas que no son muy planas se suavizan y se convierten planas.

Medium (Seleccionado en proyecto UES FMO): Este es un compromiso entre las otras dos opciones. Se trata de preservar rasgos afilados, mientras que suaviza las superficies en áreas más o menos planas.

En la sección Ráster MDS el software permite al usuario seleccionar si se generará el ráster MDS y el método con el que se generará.

GeoTIFF (activado por defecto): Guarda el MDS como un archivo GeoTIFF. Para la mayoría de los proyectos el MDS se divide en varias teselas y se genera un archivo GeoTIFF por tesela.

El método que se utiliza para la generación del ráster DSM afectará el tiempo de procesamiento y la calidad de los resultados.

Ponderación de distancia inversa: El algoritmo de ponderación de la distancia inversa se utiliza para interpolar entre puntos. Este método se recomienda para edificios.



Triangulación: Es utilizado el algoritmo de triangulación basado en triangulación de Delauney. Este método se recomienda para las zonas planas (campos de la agricultura) y las pilas de materiales. Este método es seleccionado para la creación del ortomosaico de éste proyecto, pues el área con edificios es muy poca y el relieve del área cubierta es bastante plano.

La opción fusionar teselas (activada por defecto) genera un solo archivo MDS GeoTIFF mediante la fusión de las teselas individuales. Cuando esta opción no está seleccionada, no se genera el archivo MDS fusionado.

Activar la opción GeoTIFF sin transparencia permite generar adicionalmente un ortomosaico sin transparencias, donde la transparencia es sustituida por el color negro.

La opción teselas de Google Maps y KML permite generar los archivos de salida para visualización del ortomosaico en Google Maps o Google Earh, así como en Mapbox si es seleccionada.

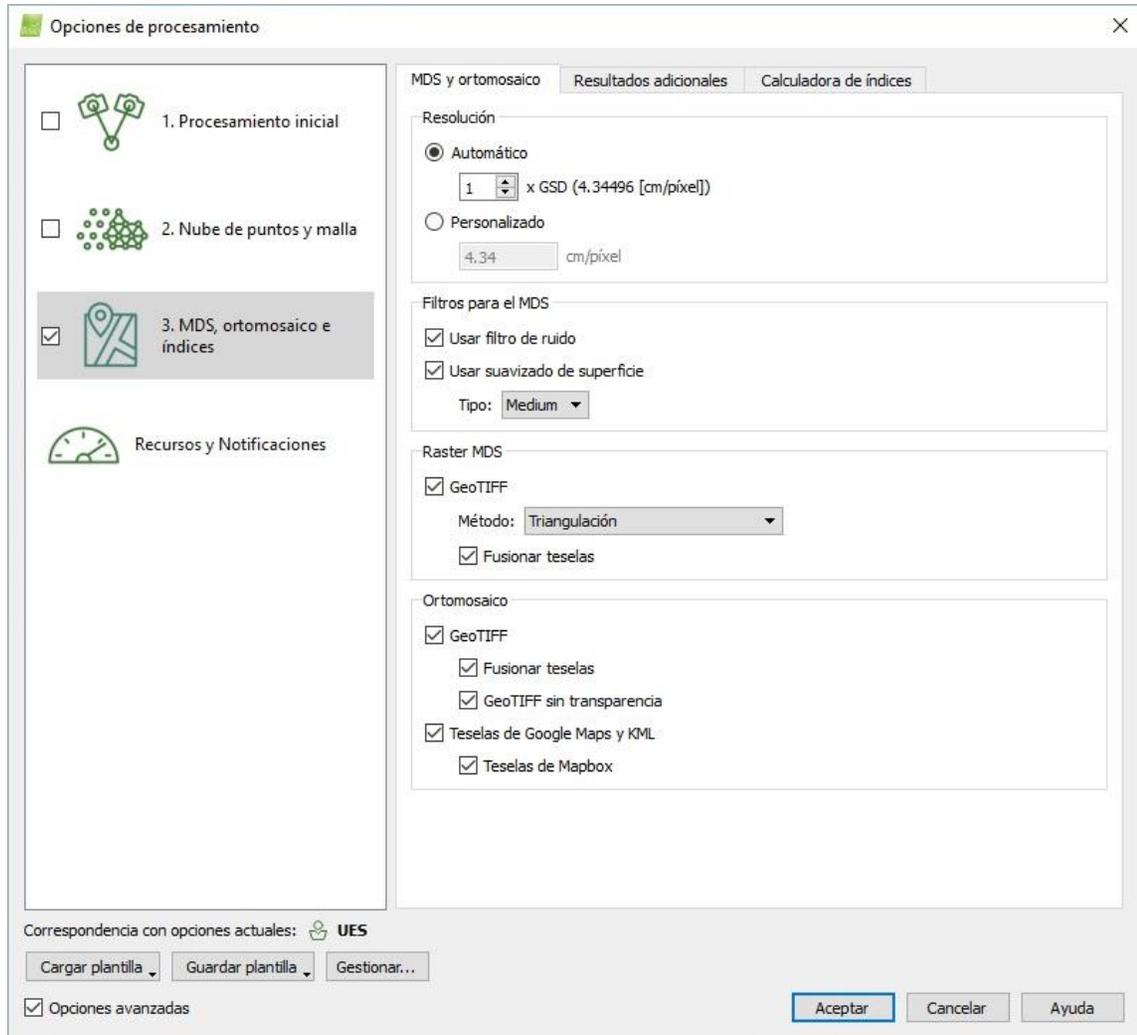


Figura 71. Configuración del MDS y ortomosaico.

En la pestaña resultados adicionales se selecciona si se desea obtener una grid del MDS y los formatos en que se generará ésta. También es posible generar curvas de nivel en diferentes formatos, y definir los parámetros para su creación, como se muestra en la figura.

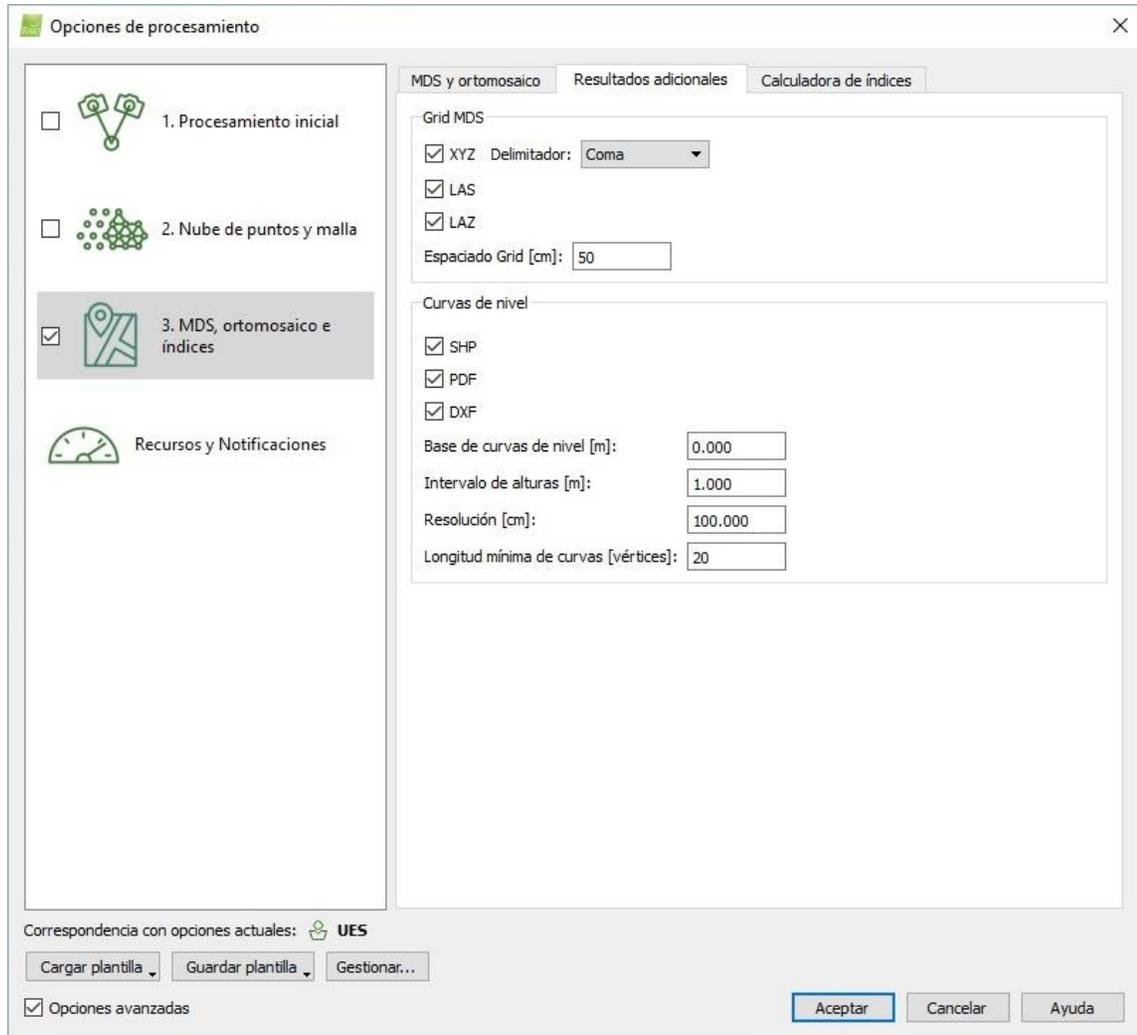


Figura 72. Configuración de resultados adicionales del paso 3.

La calculadora de índices no fue utilizada en éste proyecto, por tanto no fueron cambiadas las opciones de configuración predeterminadas.

El software permite generar mapas de reflectancia de las superficies y medir los índices de vegetación (NVDI) a partir de valores típicos de reflectancia a distintas longitudes de onda, presentados por estas según su tipo de cobertura. Esto es de gran utilidad para aplicaciones de la técnica en la agricultura, sin embargo no se encuentra dentro del área de interés de este estudio.



Para poder generar un mapa de reflectancia y usar la calculadora de índices es necesario hacer la calibración radiométrica de la cámara, calibrando y corrigiendo la reflectancia de la imagen, teniendo la iluminación y el sensor de influencia en consideración.

La calibración radiométrica se realiza a partir de la selección de una imagen de calibración radiométrica. Estas imágenes son adquiridas en campo, fotografiando en el sitio de trabajo una superficie de Lambert o “lambertiana”, que es una superficie ideal que refleja la energía incidente desde una dirección igual en todas direcciones, por lo cual al variar el punto de vista, su luminancia no cambia.

Al realizar la calibración radiométrica es posible configurar los parámetros necesarios para la creación del mapa de reflectancia, el cálculo de índices y para exportar los valores de índices en diferentes formatos.

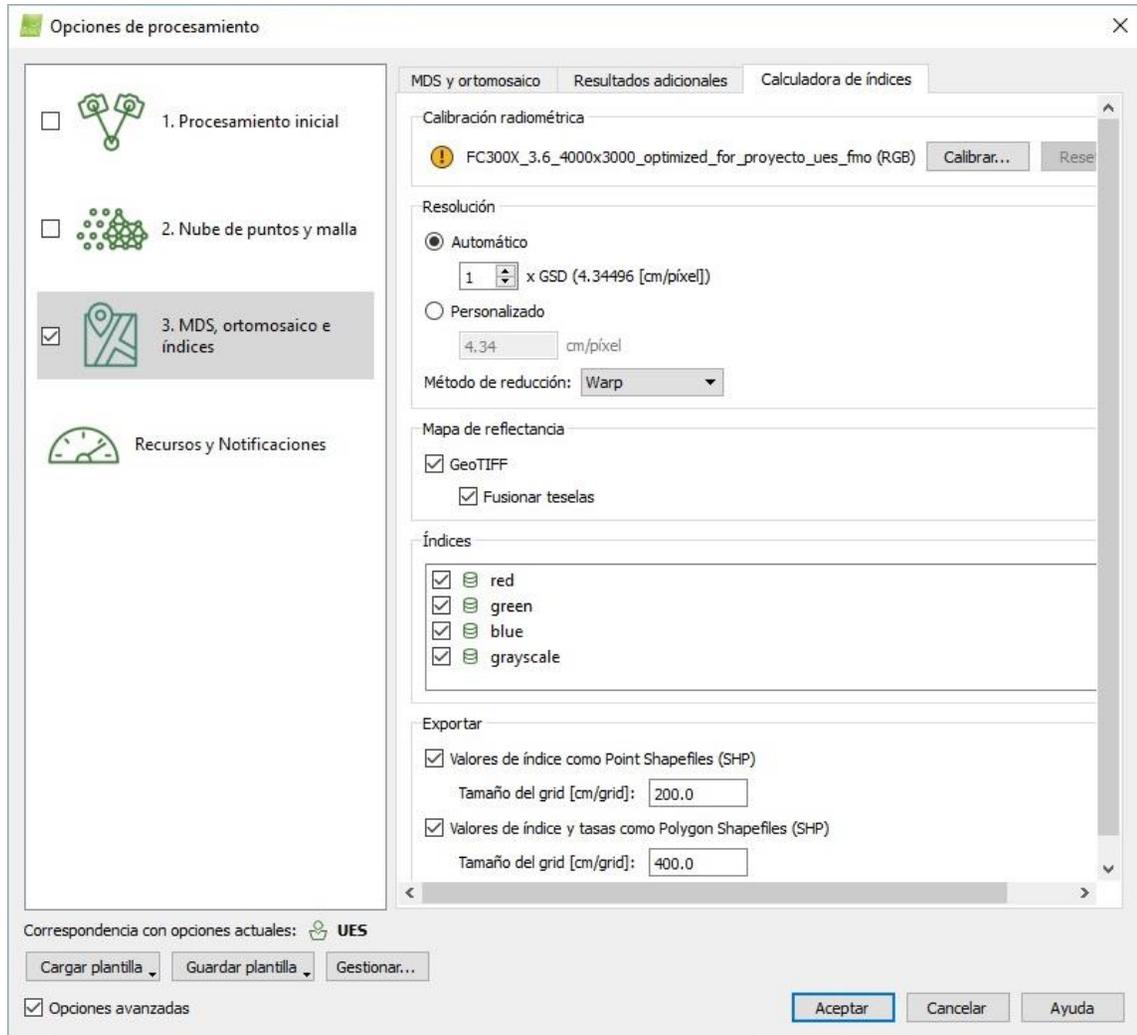


Figura 73. Configuración de la calculadora de índices.

5.1.2.3 PROCESAMIENTO EN PIX4D MAPPER PRO

5.1.2.3.1 PROCESAMIENTO INICIAL

La etapa inicial del procesamiento en Pix4D consiste en la aerotriangulación de las imágenes digitales, usando la información de georreferencia de éstas, obtenida del GPS interno del vehículo aéreo no tripulado y/o de puntos de apoyo terrestre.



Una vez que ha sido seleccionada la plantilla que se utilizará en el proyecto puede procederse a iniciar la etapa de procesamiento, aunque es recomendado el uso de entradas adicionales que ayuden a mejorar la calidad del proyecto.

A. GESTOR GCP/MTP

El *Gestor GCP/MTP* permite agregar al proyecto puntos GCP 2D, GCP 3D, MTPs y Check Points. Los primeros tres tipos de puntos mencionados ayudan a mejorar la precisión del proyecto, mientras que los Check Points ayudan únicamente a evaluar la precisión de este.

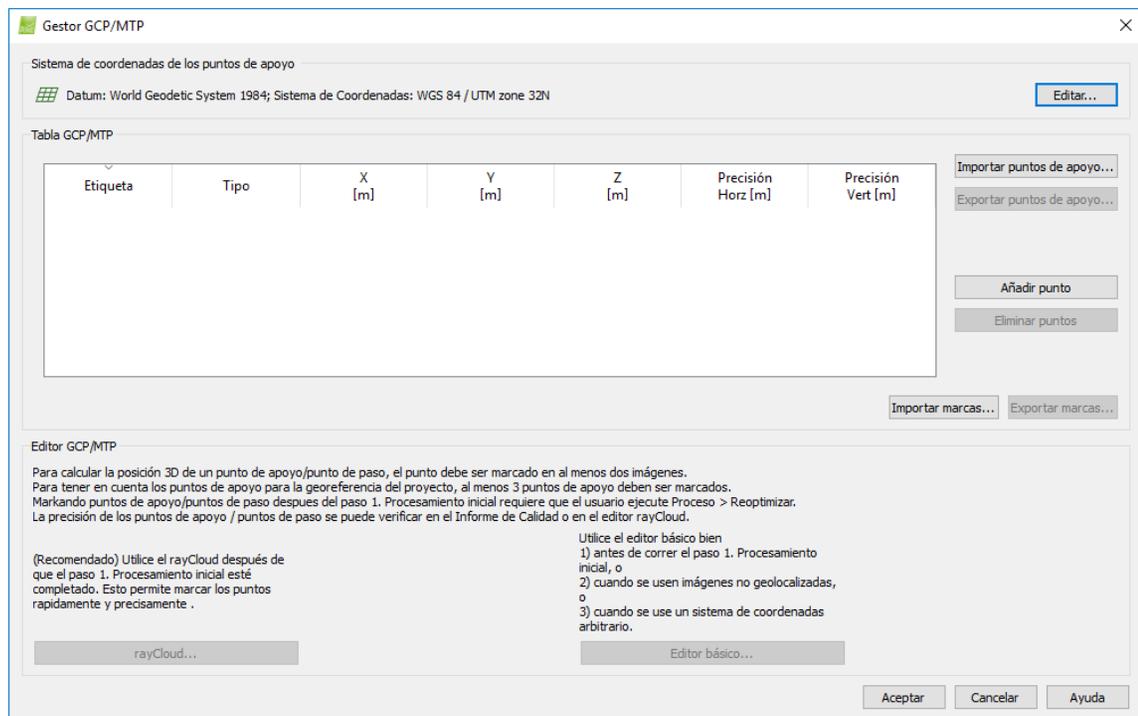


Figura 74. Gestor GCP/MTP.

I. USO DE GCPs

En el capítulo 4 se describió la función de los GCPs en un proyecto de vuelo fotogramétrico y la forma en que se adquirió la información de estos puntos en el proyecto UES FMO.



Pix4Dmapper puede procesar proyectos con o sin puntos de apoyo (GCP), sin embargo el uso de GCP precisos aumenta la precisión global del proyecto.

Los puntos de apoyo terrestres usados en los proyectos pueden ser bidimensionales (si se conocen únicamente coordenadas X,Y o Latitud, Longitud) o tridimensionales (si se conocen coordenadas X,Y,Z o Latitud, Longitud, Altitud).

Para un proyecto con fotografías georreferenciadas y GCPs en sistemas de coordenadas conocidos hay dos métodos para añadir y marcar los puntos de apoyo en las imágenes:

- MÉTODO A

Este método se utiliza cuando la geolocalización de la imagen y los GCP están en un sistema de coordenadas conocido que se pueden seleccionar a partir de base de datos de Pix4Dmapper. No será necesario que los dos sistemas sean el mismo ya que Pix4Dmapper es capaz de hacer la conversión entre dos diferentes sistemas conocidos de coordenadas.

Este es el caso más común. Permite al usuario marcar los GCP en las imágenes con poca intervención manual. Sin embargo, este método no es adecuado para el procesamiento sin supervisión, durante el cual las diferentes etapas de procesamiento se inician automáticamente en una fila y no requieren ningún tipo de intervención por parte del usuario.

INSTRUCCIONES:

1. Obtener mediciones GCP en el campo o a través de otras fuentes.
2. Agregar los GCP con el *Gestor GCP/MTP* sin marcarlos en las fotografías.
3. En la barra de menús, hacer clic en *Ver>Tratamiento*. La barra *Procesamiento* aparece en la parte inferior de la ventana principal.
4. En el menú *Procesamiento* seleccionar únicamente el procesamiento inicial.
5. Dar inicio a esta etapa (Haciendo clic en Inicio).



- Una vez que se ha terminado el procesamiento inicial, marcar los GCPs en el rayCloud.
- Haga clic en *Proceso>Reoptimizar*
- Opcional:** Regenerar el Informe de calidad haciendo clic en *Proceso>Generar Informe de calidad*.

The screenshot shows the 'Gestor GCP/MTP' window. At the top, it displays the coordinate system: 'Datum: World Geodetic System 1984; Sistema de Coordenadas: WGS 84 / UTM zone 16N'. Below this is a table titled 'Tabla GCP/MTP' with the following data:

Etiqueta	Tipo	X [m]	Y [m]	Z [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]
0 FMO1	3D GCP	374612.000	1486257.000	95.700	0.020	0.020
0 FMO4	3D GCP	374598.000	1485805.000	89.772	0.020	0.020
0 GCP04	3D GCP	374794.000	1485278.000	86.200	0.020	0.020
0 GCP06	3D GCP	374468.000	1485336.000	87.192	0.020	0.020
0 GCP09	3D GCP	374315.000	1485557.000	88.280	0.020	0.020

Below the table, it indicates '0/11 Puntos de apoyo con suficiente número de marcas'. The interface also includes buttons for 'Importar puntos de apoyo...', 'Exportar puntos de apoyo...', 'Añadir punto', and 'Eliminar puntos'. At the bottom, there are 'Importar marcas...' and 'Exportar marcas...' buttons. The 'Editor GCP/MTP' section contains instructions on how to use the software and buttons for 'rayCloud...' and 'Editor básico...'. At the very bottom, there are 'Aceptar', 'Cancelar', and 'Ayuda' buttons.

Figura 75. Puntos importados en el Gestor GCP/MTP antes de ser marcados.



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

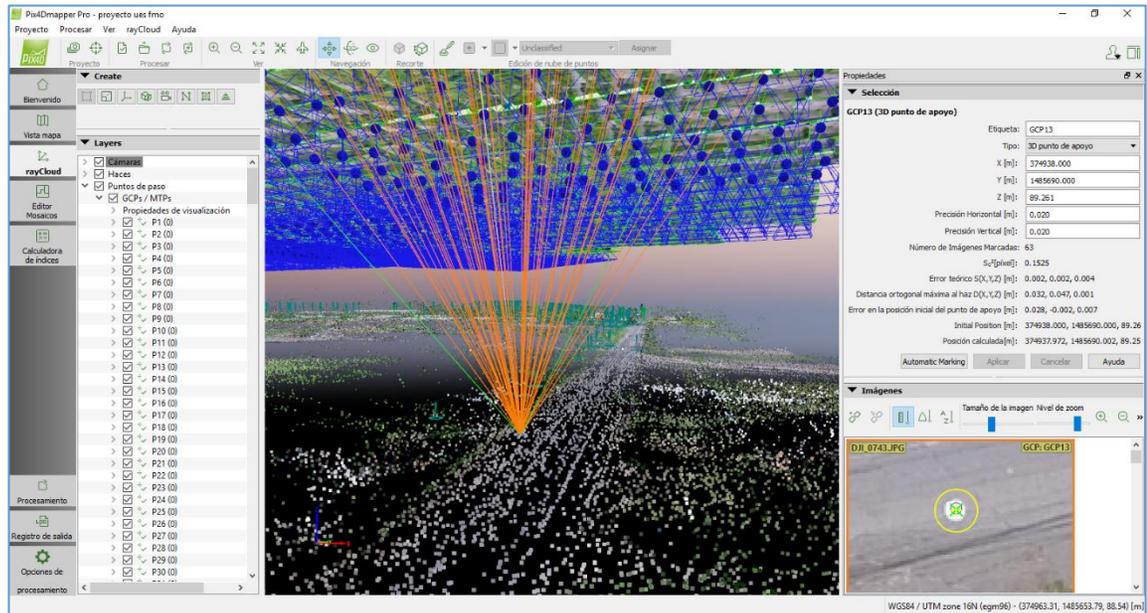


Figura 76. Marcado de GCPs en el rayCloud.

■ MÉTODO B

Este método funciona para cualquier caso, no importa el sistema de coordenadas de las imágenes o GCP coordinar, pero requiere más tiempo para marcar el GCP en las imágenes. La ventaja de este método es que después de importar las imágenes y los GCP, el tratamiento se puede realizar sin ninguna intervención por parte del usuario.

Es la mejor opción cuando se desea hacer el procesamiento sin ningún tipo de supervisión durante gran parte del tiempo. Sin embargo, se requiere más intervención manual para marcar el GCP en las imágenes.

INSTRUCCIONES

1. Obtener GCPs mediante mediciones en el campo o a través de otras fuentes.
2. Añadir (importar) todos los GCP con el *Gestor GCP / MTP*
3. Marcar el GCP en las imágenes con el *Editor GCP / MTP Básico*
4. Procesar las tres etapas de procesamiento.



Editor GCP/MTP Básico

Tabla GCP/MTP (WGS84 / UTM zone 16N (egm96))

	Etiqueta	Tipo	X [m]	Y [m]	Z [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]
43	GCP06	3D GCP	374468.000	1485336.000	87.192	0.020	0.020
50	GCP09	3D GCP	374315.000	1485557.000	88.280	0.020	0.020
39	GCP10	3D GCP	374345.000	1485727.000	88.199	0.020	0.020
42	GCP12	3D GCP	374789.000	1485703.000	91.594	0.020	0.020
63	GCP13	3D GCP	374938.000	1485690.000	89.261	0.020	0.020
73	GCP21	3D GCP	374443.000	1486363.000	95.207	0.020	0.020
38	GCP22	3D GCP	374506.000	1486589.000	96.523	0.020	0.020
41	GCP26	3D GCP	374793.000	1486363.000	94.550	0.020	0.020
8	mtp363	Manual Tie Point	374816.777	1486274.929	94.009		

Imágenes

- DJI_0178.JPG
- DJI_0216.JPG
- DJI_0215.JPG
- DJI_0179.JPG
- DJI_0177.JPG
- DJI_0214.JPG
- DJI_0238.JPG
- DJI_0237.JPG
- DJI_0161.JPG
- DJI_0217.JPG
- DJI_0162.JPG
- DJI_0180.JPG
- DJI_0160.JPG
- DJI_0236.JPG
- DJI_0239.JPG
- DJI_0176.JPG

Previsualización

Gestor GCP/MTP

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura 77. Editor GCP/MTP Básico.

Para el procesamiento del Proyecto UES FMO se hace uso del método A, ya que el marcado de los GCPs en las fotografías se realiza después de la identificación de puntos de paso en el modelo y cada uno de estos puntos posee coordenadas de ubicación calculadas por el software. Esto se convierte en una ventaja, pues al marcar un determinado GCP en las fotografías puede conocerse automáticamente el error estimado en la ubicación del GCP y si uno de ellos tiene un error considerable puede sustituirse por otro. Este es el caso (que puede verificarse en el Anexo del informe) donde se sustituye el GCP02 por la diferencia entre la posición calculada y las reales por el GCP22, que aunque se ubicaba al borde del proyecto tenía un error menor.



NOTAS:

1. El nivel de precisión asignado por defecto en el software para los GCPs es de 0.020m en la precisión horizontal y vertical. Estos valores pueden ser editados en el *Gestor GCP / MTP*, según sea la precisión de los GCPs adquiridos en campo. El software acepta valores de precisión horizontal y vertical entre 0.001 y 10,000 metros.
2. Es importante destacar que para este proyecto se cuenta con más de 10 GCPs distribuidos en el terreno de la facultad y sus alrededores, por lo cual GCPs con error podrían ser sustituidos por otros con ubicación cercana.

II. USO DE MTPs

Un punto de paso manual, o punto de amarre manual (Manual Tie Point) es un punto sin coordenadas 3D común entre varias fotografías, seleccionado de forma manual por el usuario para evaluar y mejorar la precisión de la reconstrucción.

El uso de MTPs es requerido principalmente cuando el software no encuentra de forma automática el número de coincidencias mínimo para la calibración de varias fotografías en el procesamiento inicial y es necesario proceder a la calibración manual de éstas. Si un número grande de fotografías no son calibradas luego del procesamiento inicial la calibración manual no es una opción recomendada.

La cantidad de imágenes calibradas y no calibradas se muestra en el reporte de calidad del proyecto. (Véase *Análisis del reporte de calidad*)

Añadir puntos de amarre manual antes de iniciar el procesamiento inicial permite al usuario indicarle al software la ubicación de las coincidencias entre fotografías cuando se sospeche que éstas no serán calibradas automáticamente durante el procesamiento.

Para añadir un nuevo MTP antes de iniciar la etapa inicial:

1. Hacer clic en *Proyecto >Gestor GCP/MTP*.



2. Hacer clic en *Añadir Punto*, esto añadirá a la lista un nuevo punto con la etiqueta *mtp* seguida del número de punto de amarre manual. Repetir la acción hasta tener el número de puntos deseado.
3. Hacer clic en *Editor Básico*.
4. Seleccionar el MTP que desea añadir al proyecto y marcarlo en una de las fotografías en que sea visible.
5. Hacer clic en *Ordenar las imágenes por distancia a las imágenes marcadas*
6. Marcar el punto en el resto de fotografías donde es visible.
7. Repetir los pasos 4 al 6 hasta tener todos los MTPs marcados en las imágenes.
8. Hacer clic en *Aceptar*

III. USO DE CHECK POINTS

Un Check Point es un punto con coordenadas 3D conocidas que sirve para indicar el nivel de precisión de la reconstrucción del modelo 3D, comparando la posición inicial del punto adquirido con RTK y la posición calculada del punto resultante del procesamiento. Este tipo de puntos es añadido únicamente en el *Gestor GCP / MTP*, sin ser marcados en ninguna fotografía, pues no son tomados en cuenta para la reconstrucción del modelo.

IV. SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS

Pudo observarse, al importar GCPs y Check Points con proyección Lambert y observarlos en la vista satelital mostrada por el software, que la ubicación mostrada en esta vista no coincidía con la ubicación real de los puntos y que la ubicación de las fotografías respecto a los GCPs no era la correcta, sin embargo al finalizar la etapa inicial del procesamiento con los GCPs marcados en las fotografías, la ubicación de las fotografías ha sido corregida según el marcado de los GCPs. Esto permite que el modelo y todos los archivos puedan generarse con la proyección indicada y respetando la ubicación correcta de las fotografías



respecto a los puntos de apoyo terrestre marcados, aun cuando la ubicación de estos no se muestra bien en la vista satelital, siendo el archivo KML para Google Earth o Google Maps el único en presentar problemas al no coincidir el ortomosaico con la vista mostrada en el software.

Si los puntos de apoyo y de control terrestre adquiridos se encuentran en sistema de coordenadas Lambert, como es el caso del Proyecto UES FMO, es conveniente convertir las coordenadas Lambert al sistema **WGS84/ UTM zone 16N**, además de usarlo para la salida de datos, si se desea generar archivos KML con buena ubicación.

La conversión de coordenadas Lambert a UTM puede realizarse añadiendo la tabla con los puntos a un dibujo en ArcMap, haciendo uso de la opción *Add Data*  mostrada en la barra de herramientas y seleccionando el archivo donde se encuentren los puntos (en formato CSV).

Para poder convertir los puntos de coordenadas Lambert es necesario mostrar estos en el dibujo, utilizando la opción *Display XY Data*, mostrada al hacer clic derecho sobre la tabla que hemos añadido, mostrada en la Tabla de Contenido de ArcMap.



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

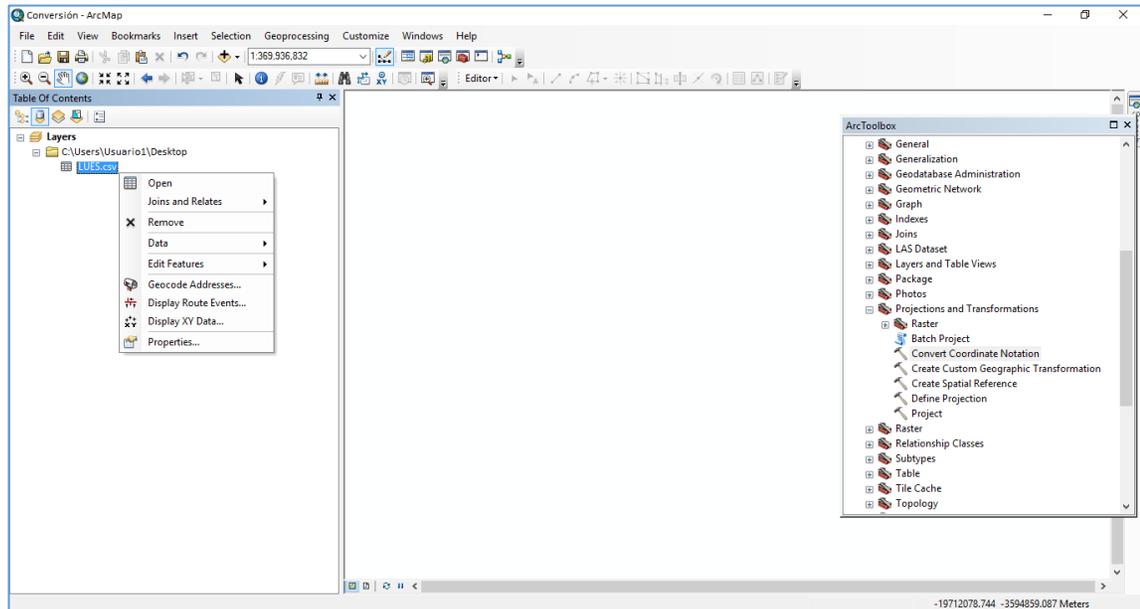


Figura 78. Procesamiento de datos de tablas en ArcMap 10.3.

Fuente: Grupo de tesis

Para añadir los puntos al dibujo es necesario definir qué columnas de valores corresponden a las coordenadas X, Y y Z en la tabla cargada. Si no se conoce el orden en que se presentan estos valores puede abrirse la tabla para ver sus atributos (Figura 79a), dando clic en la opción *Open*, mostrada al dar clic derecho sobre la tabla.

Una vez definidas las columnas correspondientes a cada coordenada, se elige la proyección cartográfica en que se encuentran los puntos (Cónica Conformal Lambert), finalizando así la configuración de los puntos a añadir (Figura 79b) y mostrando los puntos en el dibujo luego de dar clic en *Ok* (Figura 80).

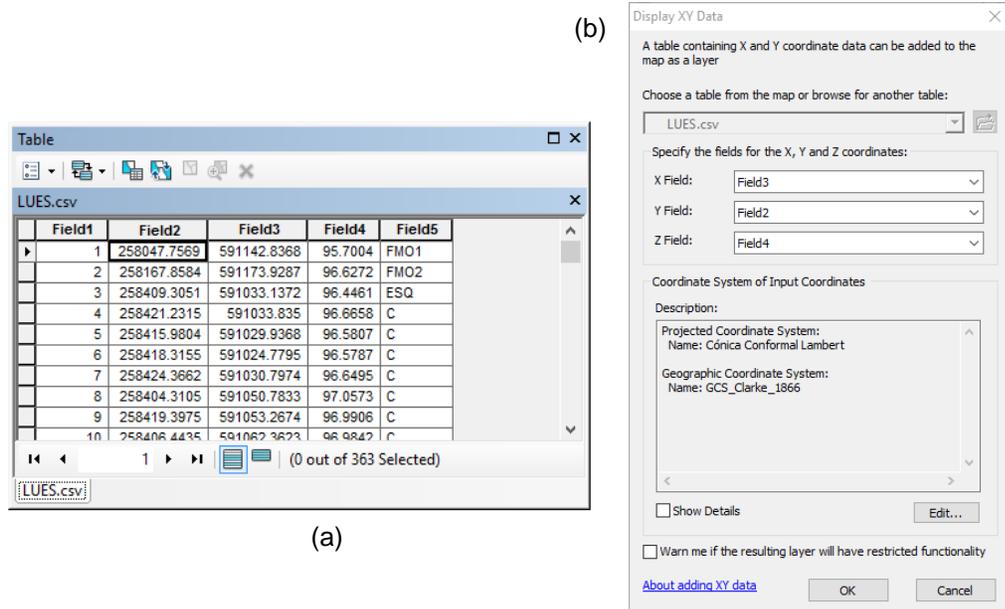


Figura 79. Inserción de puntos en dibujo de ArcMap.
(a) Datos de tabla añadida (b) Definición de valores a representar

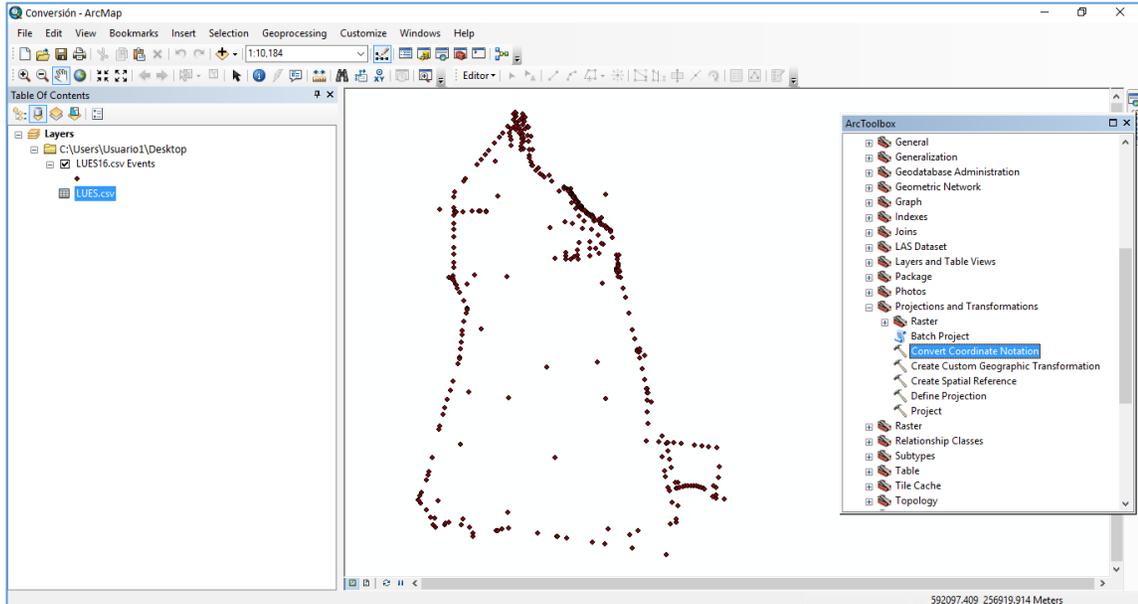


Figura 80. Visualización de puntos añadidos en ArcMap.

Fuente: Grupo de tesis.

Luego de cargar la visualización de los puntos, puede procederse a la transformación de coordenadas, seleccionando en *Arc Toolbox* la herramienta



para convertir notación de coordenadas, a través de la secuencia *Data Management Tools > Projections and Transformations > Convert Coordinate Notation*. Luego de seleccionar esta herramienta se configuran las opciones de la ventana como se muestra en la siguiente figura.

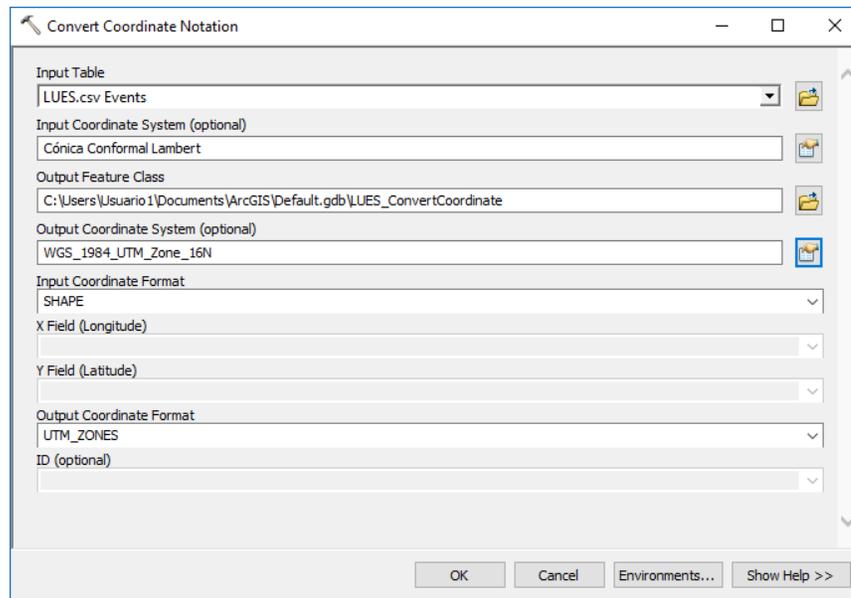


Figura 81. Uso de la herramienta de conversión de coordenadas de ArcMap.
Fuente: Grupo de tesis.

Al dar clic en *Ok* se realizará la conversión de coordenadas, cargando una nueva capa con los puntos convertidos a nuestro dibujo. Al dar clic derecho sobre la capa en la tabla de contenidos se selecciona la opción *Open Attribute Table*, que mostrará la tabla con coordenadas originales y convertidas. Abrimos las opciones de tabla dando clic en el ícono *Table Options*  y seleccionamos la opción *Export*, para exportar nuestros puntos a una tabla en formato .dbf en el destino de nuestra preferencia.

Al abrir en Microsoft Office Excel el archivo .dbf generado podrán verse en las primeras columnas las coordenadas originales de cargamos en ArcMap y al final una columna llamada UTM_ZONES, que mostrará las coordenadas de cada



punto en la siguiente notación: 16N3747791486288, donde los primeros tres caracteres indican la zona UTM en que se encuentran los puntos, los siguientes 6 dígitos indican la coordenada este del punto y los 7 últimos dígitos la coordenada norte del punto, pudiéndose notar que éstas cifras no poseen valores decimales.

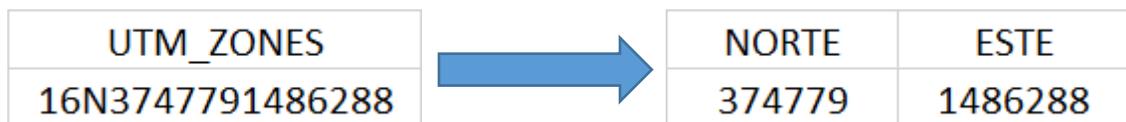


Figura 82. Notación de coordenadas UTM resultantes.

Fuente: Grupo de tesis.

Los caracteres de la columna UTM_ZONES pueden distribuirse en columnas diferentes usando la opción *Texto en columnas* en el menú *Datos* y posteriormente separando en tres columnas de ancho fijo con 3,6 y 7 caracteres cada una. Finalizando esta acción puede modificarse la tabla para incluir únicamente los valores X,Y,Z y el descriptor de cada punto para importarse en Pix4D Mapper con el sistema de coordenadas deseado (**WGS84/ UTM zone 16N**, para el proyecto UES FMO) usando el *Gestor GCP/MTP*.

Es importante señalar que el proceso de conversión de coordenadas UTM a Lambert en ArcMap genera puntos con diferencias considerables respecto a su ubicación real (véase Anexo D). Éste problema es similar al presentado al cargar en una vista satelital puntos con coordenadas Lambert, donde éstos puntos no muestran su ubicación real aun cuando se han configurado correctamente los parámetros de definición de las coordenadas y de transformación entre diferentes datum.



B. ANÁLISIS DEL REPORTE DE CALIDAD

El reporte de calidad del proyecto muestra un resumen de las características del proyecto, vistas preliminares del ortomosaico y el DSM, y detalles de la calibración y geolocalización de las imágenes, entre otros.

Es importante revisar los resultados mostrados en este reporte, prestando atención a los parámetros del apartado *Control de Calidad*, que son los siguientes:

- ✓ **Imágenes:** Una marca de verificación verde indica que las imágenes tienen suficiente contenido visual para ser procesadas. Una advertencia amarilla o roja indica que no hay mucho contenido visual que podría ser extraído de las imágenes. Esto puede conducir a un bajo número de coincidencias en las imágenes y una reconstrucción incompleta o resultados de baja calidad.
- ✓ **Conjunto de datos:** Una marca de verificación verde indica que más del 95% de las imágenes habilitadas fueron calibradas en un bloque. Una advertencia amarilla indica que entre el 60% y el 95% de las imágenes habilitadas fueron calibradas o que más del 95% de las imágenes habilitadas fueron calibradas en varios bloques. Una advertencia roja indica que menos del 60% de las imágenes habilitadas fueron calibradas.
- ✓ **Optimización de la cámara:** Una marca de verificación verde indica en lentes con control de perspectiva que el porcentaje de la diferencia entre la longitud focal inicial y la optimizada es menor que 5%, mientras que en lentes de ojo de pez indica que el porcentaje de diferencia entre los parámetros iniciales y optimizados de transformación afines a C y F es menor que 5%. Una advertencia en color amarillo indica que el porcentaje de diferencia entre los parámetros mencionados anteriormente se encuentra entre 5% y 20%, mientras que una advertencia en color rojo indica que este valor es mayor que el 20%, lo que produce un error en el procesamiento.



- ✓ **Pareo:** Una marca de verificación en color verde indica que los resultados son susceptibles a ser de alta calidad en las áreas calibradas. Una señal de advertencia en color amarillo o rojo indica un bajo número de pareos entre las imágenes calibradas, lo que indica que los resultados podrían no ser muy fiables.
- ✓ **Georreferenciación:** Una marca de verificación en color verde indica que han sido usados GCPs y el error de estos es menor que el GSD promedio. Una advertencia en color amarillo indica que se han usado GCPs con un error menor a dos veces el GSD promedio o que no han sido usados GCPs en el proyecto. Una advertencia en color rojo indica que han sido usados GCPs, pero su error es mayor que dos veces el GSD promedio.

Quality Report

Generated with Pro version 2.1.58

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	proyecto ues fmo
Processed	2016-07-05 07:47:25
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.34 cm / 1.71 in
Area Covered	1.6013 km ² / 160.129 ha / 0.6186 sq. mi. / 395.891 acres

Quality Check

Images	median of 11166 keypoints per image	
Dataset	3242 out of 3242 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	1.69% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 4011.05 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 11 GCPs (11 3D), mean RMS error = 0.048 m	

Figura 83. Vista parcial del reporte de calidad.
(Reporte completo en Anexo C).



C. SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DETECTADOS EN EL REPORTE DE CALIDAD

- ✓ Para corregir errores cuando el parámetro *Imágenes* no da resultados óptimos se recomienda repetir la etapa de adquisición de imágenes y cambiar la altura de vuelo, incrementar el traslape o mejorar la calidad de la imagen.
- ✓ Si en la sección *Conjunto de datos* el porcentaje de imágenes no calibradas es menor al 95% se recomienda revisar si el traslape entre imágenes es bajo e incrementarlo, aumentar la altitud en caso de conjuntos de datos con muchos árboles o en campos, eliminar imágenes que hayan sido tomadas desde la misma posición o durante el despegue o aterrizaje y ajustar los parámetros de la cámara para mejorar su calidad. Si se han calibrado las imágenes en más de un bloque se recomienda *Reoptimizar*, añadir MTPs entre bloques y *Reemparejar*, o incrementar el traslape entre imágenes.
- ✓ Si se presenta una advertencia amarilla o roja en la sección *Optimización de la cámara* es necesario revisar si en la sección *Conjunto de datos* el porcentaje de imágenes calibradas es mayor al 50%, si es así será necesario repetir el procesamiento inicial con los parámetros optimizados de la cámara cargados; si el valor es menor al 50% puede haber un problema en el proyecto: el modelo inicial de la cámara no se ha introducido correctamente, el traslape entre fotografías es muy bajo o las fotografías tienen mala geolocalización.

Para cargar los parámetros optimizados de la cámara:

1. Haga clic en *Proyecto > Editor de Propiedades de la imagen*
2. En la sección *Modelo de cámara seleccionado* haga clic en *Editar*
3. En la sección *Modelo de la cámara*, haga clic en *Nuevo*.



4. En la sección *Modelo de la cámara*, cambie el nombre del modelo, añadiendo un sufijo que indique que los parámetros son optimizados para ese proyecto.
 5. En los parámetros del modelo de cámara, haga clic en *Cargar parámetros optimizados*
 6. Haga clic en *Aceptar* y en **NO** cuando se muestren dos ventanas emergentes luego de eso. Se recomienda seleccionar la opción **NO** ante esas dos ventanas pues los parámetros cargados son optimizados para un proyecto en particular y no deberían ser utilizados en proyectos diferentes.
 7. Haga clic en *Aceptar* y repita la etapa inicial del procesamiento
- ✓ Cuando los resultados del pareo de puntos entre imágenes no sean los deseados puede ser necesario repetir la etapa inicial un par de veces con diferentes configuraciones (modelo de cámara, MTPs) para obtener más coincidencias. Para evitar esta situación, se recomienda para adquirir imágenes con un traslape más sistemático.
 - ✓ Si hay una señal de advertencia amarilla en la sección *Georreferenciación* y han sido usados GCPs se recomienda verificar que las marcas han sido bien colocadas en al menos tres imágenes. Si no fueron usados GCPs hay que estar conscientes de que el modelo será menos preciso y podría estar desplazado varios metros debido a la imprecisión de algunos GPS.
 - ✓ Si la señal de advertencia en la sección *Geolocalización* es de color rojo, el conjunto de puntos de apoyo terrestre podrían tener un grave error, aunque es más probable que se hayan marcado los GCPs de forma errónea.
 - ✓ Si se requiere calibrar manualmente una cámara:
 1. En la barra de menús, hacer clic en *Ver > rayCloud*.
 2. Seleccionar una cámara no calibrada en la vista 3D.



3. En la barra lateral derecha, en la sección Selección, los puntos correspondientes a la cámara seleccionada se muestran en las imágenes con:

- **Cruz roja:** puntos clave automáticos que no se corresponden con ningún keypoint de otras imágenes.
- **Cruz naranja:** keypoints automáticos que son muy propensos a ser emparejados con precisión con keypoints de otras imágenes.
- **Cruz amarilla:** GCPs, Check Points o MTPs marcados en la imagen seleccionada considerado como inliers.
- **Cruz rosada:** GCPs, Check Points o MTPs marcados en la imagen seleccionada, pero que se consideran como outliers (no son inliers).

La sección Tie Points muestra todos los puntos de amarre que han sido marcados en la cámara seleccionada.

4. Hacer doble clic en una cruz roja o naranja, la cruz seleccionada pasará a ser de color púrpura. Se recomienda seleccionar puntos bien distribuidos en la imagen, en lugar de seleccionarlos en la misma zona.

5. Cada keypoint rojo y naranja se asocia a un punto en 3D con el que hay una alta probabilidad de que el KeyPoint coincida. La sección *Imágenes* muestra una lista de imágenes en las que este punto podría ser visibles utilizando el punto 3D asociado. Este punto clave es marcado usando una cruz de color naranja con un círculo naranja. La proyección del punto 3D en esas imágenes aparece con una cruz verde.

Si los puntos propuestos en las imágenes son buenos, es decir, si corresponden con el punto clave en la cámara sin calibrar, este punto clave se pueden combinar con las imágenes pulsando el botón Conectar a Tie Point. Esto crea un nuevo punto de amarre manual utilizando las imágenes marcadas.



6. Cada vez que se añade una coincidencia, la posición de la cámara se reestima. Esta nueva posición se utiliza para proyectar puntos 3D existentes en la imagen seleccionada. Si el error de reproyección entre los puntos 3D proyectados y los puntos clave existentes es bajo, un keypoint es etiquetado como preciso y se le conoce como Inlier. Estos inliers se muestran como cruces de color naranja.
7. Conectar otros puntos existentes (al menos 3) y/o definir nuevos puntos de amarre manual (al menos 3). Es importante que los puntos de amarre manuales estén marcados en la imagen sin calibrar y al menos 2 imágenes calibradas. No debe ser marcado solamente en imágenes no calibradas.
8. Presionar *Calibrar* para realizar la calibración de la cámara. La opción *Calibrar* se activa únicamente cuando la imagen tiene al menos 20 inliers y todos los puntos marcados manualmente (MTPS) son inliers.
9. Si la nueva posición de la cámara y la orientación son buenas, haga clic en *Proceso*> *Reemparejar y optimizar*.

5.1.2.3.2 NUBE DE PUNTOS Y MALLA

Luego del análisis del reporte de calidad del proyecto y de la corrección de errores (si se presentan) se procede a la ejecución de la segunda etapa del procesamiento del software, donde se realiza la densificación de la nube de puntos y la creación de la malla 3D texturizada. En la barra de procesamiento se inicia el trabajo seleccionando únicamente la opción 2. *Nube de puntos y malla*.



Figura 84 . Visualización de la nube de puntos densificada.



Figura 85. Malla 3D texturizada con baja resolución.

Al finalizar la ejecución de ésta etapa se procede a revisar la calidad de la nube de puntos, haciendo una inspección visual de ésta. Como se requiere obtener un modelo digital del terreno que no incluya objetos en la superficie, se configuró la plantilla para hacer una clasificación automática de los puntos como terreno u objetos. Esta opción se encuentra en fase beta al momento de la ejecución de éste proyecto y puede observarse que la clasificación no es completamente precisa, por lo que es requerido hacer una selección manual de los puntos mal clasificados para asignarlos al grupo de puntos correcto.

Para mover puntos manualmente se selecciona la opción *Editar nube de puntos densificada* en las opciones de *Edición de nube de puntos*, una vez hecho esto se procede a dibujar polígonos alrededor de los puntos que desean ser movidos,



siendo seleccionados todos los puntos al interior de éstos polígonos. Una vez que los puntos han sido seleccionados se elige el grupo al que desean ser movidos y se da clic en *Asignar*.

Tener una correcta clasificación de los puntos en la superficie permite la ejecución de otros comandos, como la creación del MDT o la creación de una nueva malla 3D texturizada.

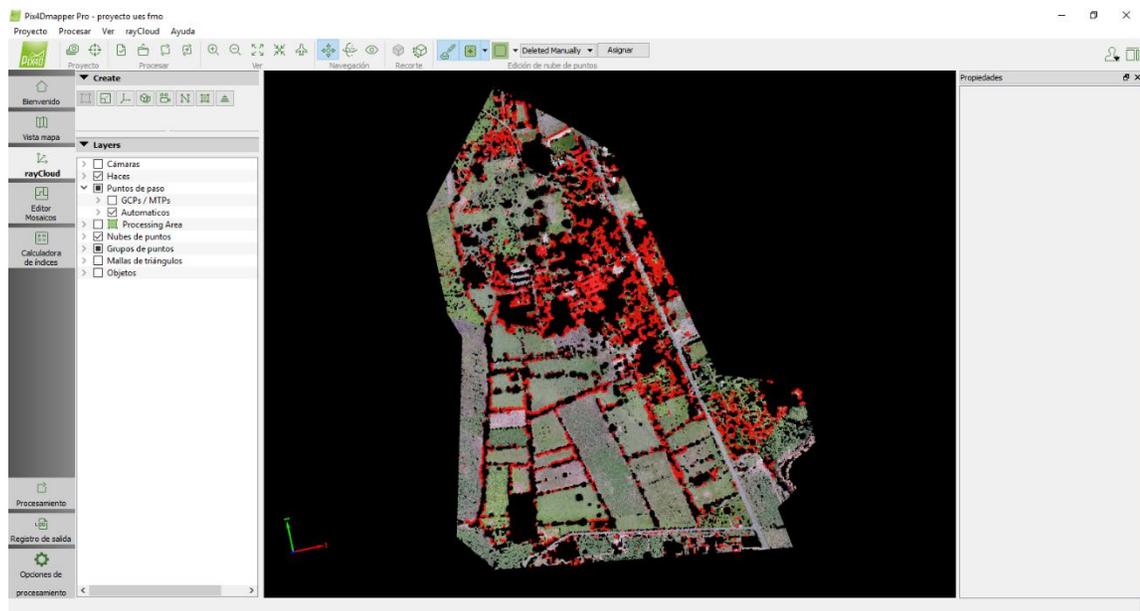


Figura 86. Puntos de objetos seleccionados manualmente (color rojo).

La creación de una malla 3D que incluya únicamente puntos del terreno puede realizarse moviendo los puntos del grupo *Objetos* al grupo *Eliminados* y seleccionando la opción *Generar malla 3D texturizada* en el menú *Proceso*.

5.1.2.3.3 DSM, ORTOMOSAICO E ÍNDICES

Ésta etapa del procesamiento comprende la creación del modelo digital del terreno, el ortomosaico y los índices de mapa (útiles principalmente en el área de agricultura), a partir de las imágenes rectificadas y de los puntos generados en el procesamiento inicial y en la densificación de la nube. Es posible ejecutar la etapa



3 del procesamiento sin haber ejecutado la etapa 2, pero los resultados obtenidos serán de menor calidad, pues la cantidad de puntos a utilizar será menor al no haber generado la densificación.

Los archivos de salida al finalizar el procesamiento de la etapa 3 serán el ráster DSM y el ortomosaico, además de la rejilla del DSM y las curvas de nivel de la superficie, generadas a partir de todos los puntos que no se encuentren dentro del grupo *Eliminados*.

Para obtener curvas de nivel del modelo a partir del DTM es necesario mover los puntos clasificados como objetos al grupo *Eliminados* y volver a procesar la etapa 3. El ortomosaico generado cuando los objetos han sido eliminados de la nube de puntos densificada puede tener una pérdida en el nivel de precisión, por tanto es recomendable usar la imagen generada inicialmente, cuando se procesó la tercera etapa usando todos los puntos de la nube.

5.1.2.4 ARCHIVOS DE SALIDA

5.1.2.4.1 FORMATO LAS (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM)

El formato LAS que es el formato estándar que define la ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) para acceder a datos LiDAR.

Exportar la nube de puntos densificada de Pix4D a un formato LAS genera un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional. El formato LAS es un archivo binario que mantiene para cada punto información de sus coordenadas X,Y,Z y su color, permitiendo visualizarlos en otros softwares como Quick Terrain Reader, ArcGIS, VRMesh, Global Mapper o LAStools, que también permite la creación de modelos digitales del terreno a partir de la nube de puntos.



5.1.2.4.2 FORMATO LAZ (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM)

LAZ es el formato de compresión de ficheros LAS, estándar definido por la ASPRS. Los puntos almacenados en archivos con este formato pueden ser visualizados en software como Quick Terrain Reader, Global Mapper y LAStools.

5.1.2.4.3 FORMATO PLY (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, MALLA 3D TEXTURIZADA)

PLY es un formato de archivo informático conocido como el formato de archivo de polígono o el Formato Triángulo de Stanford. Fue diseñado principalmente para almacenar datos tridimensionales a partir de escáneres 3D. El formato de almacenamiento de datos soporta una descripción relativamente simple de un solo objeto como una lista de polígonos nominalmente planas. Una variedad de propiedades se puede almacenar, incluyendo: los valores de confianza de datos de color y transparencia, normales a la superficie, y las coordenadas de textura. Exportar en este formato permite guardar el color y ubicación X,Y,Z de cada punto para ser visualizado en programas como Meshlab, VRMesh o Sketchfab.

5.1.2.4.4 FORMATO XYZ (NUBE DE PUNTOS DENSIFICADA, GRID DSM)

Los archivos XYZ son uno de los tipos más comunes de archivos para almacenar coordenadas puntos. Ellos son archivos de texto plano en formato ASCII, sin números binarios o cualquier otro tipo de datos que tengan que ser interpretados. Éste formato almacena únicamente la posición de las coordenadas X,Y,Z de cada punto, pudiendo visualizar la nube en programas como AutoCAD o Global Mapper. Este tipo de archivo es difícil de manejar debido a su gran tamaño.

5.1.2.4.5 GEOTIFF (RÁSTER DSM, ORTOMOSAICO)

GeoTIFF es un estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF (Tagged Image File Format «formato de archivo de imágenes con



etiquetas»). La información adicional incluye el tipo de proyección, sistema de coordenadas, elipsoide, datum y todo lo necesario para que la imagen pueda ser automáticamente posicionada en un sistema de referencia espacial.

Éste tipo de archivos puede ser abierto en Global Mapper, ArcGIS, Quantum GIS y AutoCAD (solamente el ortomosaico), siendo posible medir sobre ellos, generar curvas de nivel y digitalizar en 3D.

5.1.2.4.6 TESELAS DE GOOGLE MAPS Y KML (ORTOMOSAICO)

Se llama tesela a cada pieza que compone el ortomosaico. Las teselas de Google Maps son exportadas en formato PNG con su respectivo archivo KML.

Un archivo KML es un fichero que contiene datos geográficos. Mediante los archivos KML se pueden situar en un mapa distintos lugares que estén relacionados. Los archivos KML han sido desarrollados para ser manejados con el programa Google Earth, pero también se pueden utilizar con la aplicación de Google Maps.

5.1.2.4.7 TESELAS DE MAPBOX (ORTOMOSAICO)

Las teselas de Mapbox son exportadas en un archivo mbtiles que permiten ver y compartir las piezas del ortomosaico en Mapbox, además de crear mapas.

5.1.2.4.8 FORMATO SHP (CURVAS DE NIVEL)

El formato ESRI Shapefile (SHP) es un formato de archivo informático propietario de datos espaciales desarrollado por la compañía ESRI, quien crea y comercializa software para Sistemas de Información Geográfica como Arc/Info o ArcGIS. Originalmente se creó para la utilización con su producto ArcView GIS, pero actualmente se ha convertido en formato estándar de facto para el intercambio de información geográfica entre Sistemas de Información Geográfica por la importancia que los productos ESRI tienen en el mercado SIG y por estar muy bien documentado.



Un shapefile es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. No obstante carece de capacidad para almacenar información topológica. Es un formato multiarchivo, es decir está generado por varios ficheros informáticos

5.1.2.4.9 FORMATO PDF (CURVAS DE NIVEL)

PDF (Portable Document Format, «formato de documento portátil») es un formato de almacenamiento para documentos digitales independiente de plataformas de software o hardware. Este formato es de tipo compuesto (imagen vectorial, mapa de bits y texto).

Al exportar las curvas de nivel en este formato, pueden ser visualizadas en cualquier lector de archivos PDF como Adobe Acrobat Reader.

5.1.2.4.10 FORMATO PDF 3D (MALLA 3D TEXTURIZADA)

Un PDF 3D permite la visualización de modelos 3D generados con diversas técnicas (escáneres, fotogrametría, diseño, etc).

Al exportar la malla en este formato puede ser visualizada en software como Adobe Acrobat Reader u otros lectores comunes de archivos PDF.

5.1.2.4.11 FORMATO FBX (MALLA 3D TEXTURIZADA)

FBX es un formato de archivos de dibujo 2D o 3D que permite interoperabilidad entre aplicaciones de Autodesk y otros programas de diseño. La malla 3D con textura almacenada en este formato puede ser visualizada en Rhino, 3DS Max, Blender y Sketchfab.

5.1.2.4.12 FORMATO DXF (MALLA 3D TEXTURIZADA)

DXF es el formato de intercambio de dibujos de AutoCAD. El formato de archivo DXF fue diseñado originalmente por Autodesk para representar modelos en 3D construidos con AutoCAD.



Exportar la malla 3D en este formato permite visualizar únicamente la malla, sin mostrar su textura. Los archivos pueden ser visualizados en software como AutoCAD, Global Mapper, ArcGIS o Quantum GIS.

5.2 POST PROCESAMIENTO

Una vez se ha concluido la etapa de procesamiento digital de imágenes en Pix4D Mapper y se han obtenido los productos fotogramétricos, es posible realizar la edición gráfica de estos productos, con el fin de obtener archivos adicionales que complementen la información fotogramétrica o faciliten su comprensión.

5.2.1 VECTORIZACIÓN

En fotogrametría la vectorización se refiere al proceso de digitalización del contenido visual resultante del procesamiento de las fotografías aéreas. Para llevar a cabo la vectorización es necesario contar con una imagen que contenga información en la cual se pueda trabajar sin rastros de la “perspectiva” propia de las imágenes fotográficas (producto del alejamiento de los puntos capturados en el terreno con el centro de la fotografía), es decir, una imagen con características espaciales proporcionadas y representativa del terreno. Este elemento, conocido como ortomosaico, será una proyección ortogonal del terreno formado como un “mosaico” a partir de la combinación de las diferentes fotografías.

Dicha proyección ortogonal se obtuvo en el procesamiento de las imágenes en el programa Pix4D Mapper y es compatible con sistemas GIS y CAD. Del ortomosaico, por sus características, se puede extraer información topográfica, y conocer a detalle los componentes del terreno.

5.2.1.1 DEFINICIÓN DE ORTOMOSAICO

El ortomosaico está compuesto de imágenes georreferenciadas y corregidas de deformaciones (ortoimágenes) generadas a partir de las fotografías aéreas. Conservan toda la información fotográfica y permiten la medición a escala de



superficies y áreas, lo que se convierte en una herramienta muy útil para la medición de las construcciones, y las divisiones de los terrenos.

5.2.1.2 METODOLOGÍA

El ortomosaico puede ser abierto, como se mencionó, en múltiples plataformas CAD y GIS; para vectorizar las edificaciones de la Facultad Multidisciplinaria Oriental se utiliza el programa de CAD AutoCAD Civil 3D de Autodesk utilizando la extensión, también de Autodesk, AutoCAD Raster Design para cargar y editar el ortomosaico debido a la facilidad que presenta.

El formato del ortomosaico en el que se cargara al programa es TIFF, que contiene la información necesaria para poder obtener poder vectorizar correctamente los elementos de interés como edificaciones, caminos, accesos, etc.

5.2.1.3 VECTORIZACIÓN PROYECTO UES FMO

La vectorización del ortomosaico de la Facultad Multidisciplinaria Oriental consiste en representar cada uno de los componentes de lo que se encuentra en el terreno. Debido a la gran cantidad de detalles e información que presenta la imagen, se convierte en una herramienta fundamental y fácil para la medición de edificaciones y terrenos así como otros elementos dentro del terreno que son visibles. La vectorización facilita el trabajo porque se cuenta con una representación digital del terreno, donde es posible observar lo que contiene y trazar sobre el ortomosaico los límites de lo que se desea medir.

Los elementos a vectorizar son los siguientes:

- Linderos de la Facultad Multidisciplinaria Oriental
- Edificios y estructuras
- Carreteras y caminos
- Divisiones de terrenos



- Aceras y parqueos

5.2.1.3.1 LINDEROS

Se podrá realizar el trazado de elementos que requieran un alto nivel de precisión (como la definición de los límites de una propiedad) si dichos elementos son visibles o están en zonas descubiertas y si la resolución (GSD) y el nivel de precisión requerido por el proyecto lo permite. De lo contrario esta actividad deberá apoyarse en el reconocimiento y recolección, de los vértices que permitan el trazado de estos, a través de apoyo topográfico terrestre.

Para el proyecto, la delimitación de los linderos se hizo a partir del levantamiento terrestre, para tener mayor precisión por la casi nula visibilidad y el valor del GSD. Se puede observar que coincide con los linderos que son visibles.

5.2.1.3.2. EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS

El trazado de los edificios y las estructuras existentes a partir del ortomosaico se realiza trazando líneas a partir de los límites visibles de las edificaciones, teniendo en consideración las limitantes que la técnica presenta.

Para el proyecto se realiza una integración para el trazado, entre datos recolectados con equipo terrestre e interpretación visual del ortomosaico. En casos que las estructuras no sean completamente visibles por la vegetación se proyectan las líneas. Esta etapa requiere el reconocimiento previo de las estructuras, que permita tener un criterio para realizar esta actividad.

Surgen algunos inconvenientes de esta metodología para definir los límites en la vectorización de edificios y estructuras como son:

- Cuando las edificaciones a trazar están cubiertas por vegetación u otro obstáculo que impida la visión no se pueden ver los límites ni se puede proyectar para tener un resultado aceptable.



- En los casos de casas las mediciones que se realizan son de los techos, ya que es imposible tener las medidas de las bases del edificio por la proyección orto que se tiene.
- No se puede tener directamente las medidas de las bases sin realizar otra maniobra.



Figura 87. Vectorización de un edificio.

5.2.1.3.3 CARRETERAS Y CAMINOS

Se vectorizaron las vías, carreteras y los caminos más transitados dentro y fuera de la Facultad. Esto se facilita por la perspectiva que se tiene de estos elementos en el ortomosaico. En algunas zonas es difícil definir los tramos que están cubiertos por vegetación, lo que requiere una revisión más minuciosa para definir dónde pasan los límites.

Esta vista nos permite tener una visión de las características actuales, lo que nos brinda mayor precisión, ya que se traza a partir de los límites exactos de la construcción de las carreteras.



Figura 88. Vectorización de carreteras.

5.2.1.3.4 DIVISIONES DE TERRENOS

Similar a la definición de los límites de una propiedad, para la definición de los límites internos de un terreno se debe evaluar la técnica para marcarlos, según el objetivo de la delimitación y la precisión requerida por el proyecto (en metros o centímetros).

Se trazaron los cercos existentes en la facultad, con el objetivo de sectorizar y definir como se encuentran distribuidas las porciones del terreno. De ser posible se marcarán en las zonas con puntos despejados de vegetación, para mejorar la precisión de la medida en puntos donde se pueda observar que las divisiones (cerco, vallas o árboles) que no sean demasiado grandes. De no ser posible lo anterior, el marcar sobre la vegetación no es muy conveniente ya que puede no coincidir con las divisiones.

Si la vegetación no permite visualizar los límites, ni se cuenta con una base de datos topográficos que permitan definir los límites con puntos en el terreno, se deberá trazar sobre la vegetación en base al conocimiento que se tenga de la



zona. Esto solo si los requerimientos de precisión o el uso del producto final lo permiten.



Figura 89. Vectorización de cercos.

5.2.1.3.5 ACERAS Y ESTACIONAMIENTOS

El GSD del proyecto permite el trazado a detalle de elementos con dimensiones superiores a 4.34 cm. Para el trazado de estacionamientos y aceras fue necesario apoyarse de la base de datos actual de la Facultad, facilitada por la Unidad de Desarrollo Físico de la misma, para completar los “vacíos” del trazo. Ya que hay elementos como marcas y señales que no se podían observar debido a cobertura vegetal que presenta.



Figura 90. Vectorizado de estacionamientos.

5.2.2 CREACIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS

A partir de la técnica de vectorizado del ortomosaico pueden crearse mapas temáticos en software de CAD y SIG.

Los mapas temáticos están hechos para reflejar un aspecto particular de la zona geográfica sobre la que se definen. Pueden centrarse en variables físicas, sociales, políticas, culturales, económicas, sociológicas y cualquier otra relacionada con un territorio concreto. Los mapas temáticos están diseñados con un propósito específico o para ilustrar un tema determinado, en contraste con los mapas generales, en los que conviven una amplia variedad de elementos como la orografía del terreno, las construcciones y las vías de comunicación entre otros.

Uno de los componentes que determinan la clasificación de los mapas como temáticos, es el uso de las implantaciones (objetos gráficos o esquemáticos que representan una información específica en el modelo cartográfico). Dicha información puede ser cualitativa (expresa sólo su posición en el espacio y un elemento diferenciador), o cuantitativa (cuando se le añade información numérica



del atributo que se quiere mostrar). En los mapas cualitativos entran en juego algunas variables de representación como son: el tamaño, el valor (porcentaje de gris), el color, la orientación, la forma, las series graduadas, la condición (estática o dinámica).

La información suministrada en un mapa temático puede tener los siguientes niveles de medida:

- Nominal.
- Ordinal.
- Intervalo.
- Relación.

En todo caso debe procurarse por lograr un diseño que represente los elementos de manera clara, ordenada, contrastada, con unidad, y estética.

Se debe cuidar que tanto la información del mapa base como la que fundamenta los temáticos tenga un control de calidad en cuanto su validez en el tiempo, la escala apropiada, la precisión de las posiciones, la toponimia correspondiente. Todo mapa temático emplea como fondo una base topográfica que le sirve de localización de los fenómenos. Existen mapas temáticos de muchos tipos: geología, geomorfología, suelos, vegetación, climatología, densidades de población, localización industrial, ecosistemas naturales e intervenidos, cobertura y usos del suelo, conflicto del uso.

Estos mapas también llamados de propósitos especiales, se concentran en la distribución de un simple atributo o de la relación entre varios de ellos.

CAPÍTULO 6.



*CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES*



6.1 CONCLUSIONES

Referente a la técnica planteada como “Fotogrametría aérea a baja altura mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados”:

- ❖ Al procesar la información adquirida con esta técnica en programas especializados, se puede obtener información topográfica del terreno, facilitando realizar diversas actividades en la planeación de proyectos; debido a que sus resultados están en formato digital y a la posibilidad de vectorización del contenido reconocible durante la fotointerpretación. Esta técnica nos permite manipular una cantidad considerable de información con mayor facilidad, convirtiendo a la fotogrametría aérea en una herramienta útil en la elaboración de cartografía, desarrollo de sistemas de información geográfica (SIG o GIS) y la descripción de la topografía de la zona de interés de un proyecto.
- ❖ La fotogrametría constituye una técnica que permite obtener datos de la superficie del terreno en un corto lapso de tiempo, mediante la toma de fotografías aéreas con aeronaves de gran envergadura. El uso de las aeronaves no tripuladas (UAV o drones) constituyen una herramienta adecuada para la obtención de estas fotografías, reduciendo el tiempo del trabajo de campo y permitiendo obtener resultados confiables y comparables con otros instrumentos topográficos y fotogramétricos convencionales, presentando muchas ventajas al campo fotogramétrico y dentro del área de la ingeniería civil.
- ❖ La técnica planteada establece una metodología accesible, económica y eficaz para instituciones gubernamentales y no gubernamentales, con todos los beneficios posibles del uso de la fotogrametría, sabiendo que las mencionadas aeronaves son equipos fáciles de adquirir por la variedad de modelos y marcas presentes en el mercado.



Referente a su aplicación y ejecución se concluye que:

- ❖ Para la obtención de productos cartográficos mediante esta metodología, el punto de partida está en una buena planificación del proyecto de vuelo fotogramétrico, considerando la orografía del terreno y el contenido visual presente (vegetación densa, cuerpos de agua, campos de agricultura, etc.), corrigiendo la precisión del modelo y los posibles errores que se puedan producir, propios de la técnica digital y del uso software fotogramétrico.
- ❖ La elección adecuada del número de puntos de apoyo (GCP) a utilizarse en el proyecto y la correcta ubicación de los mismos, permite obtener un modelo digital del terreno (MDT) más preciso y mejores resultados en la georreferenciación del proyecto, permitiendo escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio reduciendo el error de la geolocalización de las imágenes.

Referente a los resultados:

- ❖ En el levantamiento fotogramétrico de la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador se obtuvo un GSD o resolución espacial por pixel de 4.34 cm (1.71 pulgadas), curvas de nivel de la superficie en las zonas descubiertas de vegetación y un ortomosaico actualizado del terreno de la Facultad, cubriendo aproximadamente 100 metros alrededor del perímetro de la misma, cumpliendo los objetivos propuestos en el estudio.
- ❖ El nivel de precisión de los resultados obtenidos está relacionado con el GSD del proyecto. Para los resultados se estima como dos veces el GSD (8.68 cm para este proyecto) debido a que no se puede asegurar que la representación de la superficie en un pixel sea exacta, y debe considerarse que un punto representado en el interior del área de un pixel podría encontrarse realmente dentro de la zona cubierta por uno de los pixeles consecutivos.



- ❖ Siendo que, en el flujo de trabajo fotogramétrico se necesita del apoyo terrestre para mejorar los resultados, el uso de aparatos topográficos para la etapa de apoyo terrestre como GPS, estación total, teodolitos u otros utilizados tradicionalmente en el país, se convierte en un complemento de la técnica. Por lo que la metodología estudiada no constituye una solución definitiva a la necesidad de información topográfica ni excluye el uso de las técnicas topográficas tradicionales, sino que se apoya en ellas para compensar sus propias deficiencias.
- ❖ A diferencia de los levantamientos topográficos convencionales, cuando hay edificaciones presentes en el área de levantamiento, no es posible obtener información de la localización exacta de las esquinas de éstas edificaciones cuando están techadas, pues éstas no son visibles en el ortomosaico y en algunos casos tampoco son visibles en el modelo tridimensional generado.

6.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Durante la etapa de procesamiento el software puede presentar problemas para encontrar coincidencia entre fotografías por diversas razones, por lo cual, se recomienda replantear el plan de adquisición de imágenes tomando en consideración las situaciones planteadas en el capítulo 4.
- ❖ Se recomienda replantear el plan de adquisición de imágenes aumentando la elevación relativa de la aeronave sobre el terreno para aumentar el contenido visual de cada fotografía y reducir la distancia entre capturas fotográficas para aumentar el número de posibles coincidencias e incluir puntos de coincidencia de forma manual para mejorar los resultados de esta etapa.
- ❖ Para todo levantamiento fotogramétrico mediante UAVs será necesario apoyarse de los levantamientos terrestres para mejorar su precisión. Para



proyectos pequeños se deben poner como mínimo tres puntos de apoyo y para grandes proyectos un mínimo de cinco GCPs.

- ❖ La toma de fotografías aéreas se debe realizar en lo posible bajo las condiciones ideales descritas en el capítulo 4, cuando la altitud del sol sea óptima, es decir en aquel espacio de tiempo en el cual los rayos solares presenten una inclinación tal que las sombras arrojadas por los accidentes sea mínima. Ya que no existe un criterio fijo para considerar la altitud solar mínima aceptable en el transcurso del año, se puede adoptar una altura mínima de 30° del sol sobre el horizonte y en regiones poco accidentadas puede llegarse a los 20° (10:00 AM a 2:00 PM).
- ❖ Por las variables presentes en el uso de la técnica planteada frente a proyectos a gran escala, se recomienda realizar un estudio comparativo entre levantamientos fotogramétricos aéreos mediante aeronaves no tripuladas y aeronaves tripuladas bajo los mismos criterios de precisión, para evaluar las ventajas y los alcances de este equipo en la aplicación de la metodología, frente a aeronaves tripuladas de mayor tamaño, así como la variable económica.

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- Torres Nieto, Álvaro (2000). Topografía 4^{ta} Edición. Colombia: Prentice Hall
- García Márquez, Fernando (1994). Curso básico de topografía. México: Árbol Editorial, S.A. de C.V.
- Jiménez Cleves, Gonzalo (2007). Topografía para ingenieros. Colombia: Universidad del Quindío
- Alcántara García, Dante A. (2014). Topografía y sus aplicaciones. México: Grupo Patria Cultural S.A. de C.V.
- Quirós Rosado, Elia (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. España: Universidad de Extremadura
- García de León, Armando et al (2013). Atlas de geografía del mundo. México: Secretaría de Educación Pública
- FranquetBernis, Josep María; Querol Gómez, Antonio (2010). Nivelación de terrenos por regresión tridimensional. España: UNED-Tortosa
- Santamaría Peña, Jacinto (2011). La cartografía y las proyecciones cartográficas. España: Universidad de La Rioja
- Paul R. Wolf y Russell C. Brinker (2006), topografía novena edición. Mexico: ALFAOMEGA grupo editor, S,A. de C.V.
- James M. Anderson, Edward M. Mikhail. (1988), introducción a la topografía. Mexico: Mc Graw Hill
- Centro Nacional de Registro. Fotogrametría: Centro Nacional de Registro [En línea]. Actualizada: 2014. [Fecha de consulta: 20 noviembre 2015]. El Salvador. Recuperado de: <http://www.cnr.gob.sv/fotogrametria/>.



- Centro de Geo-ciencias aplicadas. Cátedra: Fotointerpretación. Apuntes de teoría: Principios de Fotogrametría (2011). Argentina: Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Facultad de Ingeniería.

ANEXOS



ANEXO A.

GLOSARIO



Términos más utilizados

AAT (Automatic Aerial Triangulation)	Se refiere al proceso de Triangulación Aérea Automática. En la trigonometría y la geometría, la triangulación es el proceso de determinar la ubicación de un punto mediante la formación de triángulos a partir de puntos conocidos. Específicamente en la topografía, la triangulación de por sí implica sólo mediciones de ángulos, en lugar de medir distancias al punto directamente como en la trilateración.
ATP (Automatic Tie Point)	Se refiere a los puntos de Amarre Automático que genera el procesamiento de un software especializado. Es un punto 3D y sus correspondientes puntos clave en 2D que se detectaron de forma automática en las imágenes y se utilizan para calcular su posición en 3D.
Check Point	Es un punto con coordenadas conocidas; es útil para evaluar la exactitud del proyecto. Contrariamente a un GCP, las coordenadas del Check Point no se utilizan para el procedimiento de optimización.
Cuatrirotor	Aeronave que tiene cuatro rotores para su propulsión.
DEM (Digital Elevation Model)	Es un modelo digital o representación 3D de la superficie de un terreno creado a partir de los datos de elevación del mismo, que representa la información de altura sin ninguna definición adicional sobre la superficie.
DSM (Digital Surface Model)	En la mayoría de los casos, el término Modelo Digital de Superficie se refiere a la superficie del terreno e incluye todos los objetos que esta contiene



DTM (Digital Terrain Model)	Representa la superficie de suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios.
GCP (en inglés Ground Control Point)	Es un punto de apoyo o punto de referencia con coordenadas medidas. Se utiliza para referenciar geográficamente con el proyecto y mejorar la orientación absoluta del modelo.
GSD (Ground Sampling Distance)	Es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Cuanto mayor es el valor del GSD de la imagen, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles serán menos visibles. El GSD está relacionado con la altura de vuelo, cuanto mayor sea la altitud de vuelo, es más grande el valor del GSD.
IMU (Inertial Measurement Units)	Representa una Unidad de Medición Inercial. Este es un dispositivo electrónico que mide y reporta la fuerza específica, velocidad angular, y algunas veces el campo magnético que rodea un cuerpo, utilizando una combinación de acelerómetros y giroscopios, a veces también magnetómetros. Un IMU permite a un receptor GPS trabajar cuando las señales GPS no están disponibles, como en túneles, al interior de edificios, o cuando hay presencia de interferencia electrónica.
Keypoint o Punto Clave	Rasgo característico identificado por el software de una imagen.
Modelo 2.5D	Es un modelo 2D (mapa), donde la altitud es codificada en el valor del píxel. Un color corresponde a un determinado rango de elevaciones.



MTP (Manual Tie Point)	Es un punto sin coordenadas 3D que está marcado en el software de fotogrametría, por el usuario, en las imágenes donde es visible. Se puede utilizar para evaluar y mejorar la precisión de la reconstrucción.
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	El Índice de vegetación de diferencia normalizada es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.
RTK GPS (Real Time Kinematic GPS)	Es una técnica utilizada para mejorar la precisión de los datos de posición derivados de los sistemas de posicionamiento por satélite (sistemas de navegación por satélite, GNSS), como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. Utiliza las mediciones de la fase de la señal de onda portadora, en lugar del contenido de información de la señal, y se basa en una estación de referencia individual o estación virtual interpolada para proporcionar correcciones en tiempo real, proporcionando una precisión a nivel centimétrica.
Sistema de Coordenadas de Referencia	Es un sistema de coordenadas local, regional o global que se utiliza para localizar entidades geográficas. Un sistema de referencia espacial define una específica proyección del mapa, así como transformaciones entre diferentes sistemas de referencia espaciales.



Sustentación Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido. Con dirección perpendicular a la velocidad de la corriente incidente.

Términos Fotográficos

Balanceo (Roll) Ángulo de balanceo de un avión con respecto a su eje longitudinal. Es el movimiento normal que utilizan los aviones para realizar giros grandes, y que en fotogrametría ha de mantenerse lo más pequeño posible para dotar al vuelo fotogramétrico de la calidad requerida.

Calibración Término utilizado para describir los procedimientos necesarios para determinar con alta precisión los valores de ciertos parámetros y características de las cámaras métricas. Entre estos parámetros se encuentran aquellos relacionados con el objetivo (p.e. la distancia focal, la ubicación de los puntos principales de autocolimación y de simetría, la resolución del objetivo, la distorsión radial, el descentrado y las coordenadas de las marcas fiduciales y del centro fiducial), con el magazín (perpendicularidad de la platina con respecto al eje óptico y la desviación del plano de los modelos estereoscópicos), con la eficiencia del obturador, entre otros.

Cámara RGB Es un dispositivo que captura imágenes convirtiéndolas en señales eléctricas, siendo un transductor óptico. Este tipo de cámaras tiene incorporados 3 sensores que detectan los colores rojo, verde y azul (RGB, por sus siglas en inglés).



CCD (Charge-Coupled Device)	Es un dispositivo de carga acoplada. Es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso.
Contraste	En el contexto analógico, corresponde a la diferencia de densidad que existe entre las áreas más claras y las más oscuras de un negativo.
Distancia Focal	Distancia existente entre el punto nodal trasero del objetivo con respecto al plano en que convergen los rayos luminosos para formar la imagen.
Distorsión Radial	Distorsión ocasionada por un cambio de dirección de los rayos luminosos al pasar por el objetivo.
Espectro Electromagnético	Es el conjunto de todas las longitudes de onda de la radiación electromagnética.
Fijación	Acción y efecto de tornar permanente por reacción química una fotografía o un dibujo. Logra que la imagen fotográfica impresionada en una emulsión fotosensible quede inalterable a la acción de la luz.
Filtro	Dispositivo óptico que se coloca delante del objetivo de una cámara con el propósito de modificar de alguna manera los rayos luminosos que inciden.
Filtro Anti-viñetado	Filtro óptico que evita la desigual exposición del centro del fotograma con respecto a sus márgenes.



Filtro de Bayer	El filtro, máscara o mosaico de Bayer es un tipo de matriz de filtros, rojos verdes y azules, que se sitúa sobre un sensor digital de imagen (CCD o APS) para hacer llegar a cada fotodiodo la información de luminosidad correspondiente a una sección de los distintos colores primarios.
Fotografía	Es el arte y la técnica de obtener imágenes duraderas debido a la acción de la luz. Es el proceso de proyectar imágenes y capturarlas, bien por medio del fijado en un medio sensible a la luz o por la conversión en señales electrónicas.
Fotografía Aérea Oblicua	Aquella en que la dirección del eje óptico de la cámara no es vertical.
Fotografía Aérea Vertical o Nadir	Aquella en que la dirección del eje óptico es vertical o muy aproximado a la vertical, para fines fotogramétricos.
Fotografía Aéreas	Instantánea de la superficie terrestre tomada verticalmente o con un ángulo determinado, desde un avión, aeronave no tripulada, globo o planeador.
Fotografía Multiespectral	Fotografía tomada con una cámara multispectral o con un ensamblaje de varias cámaras con distintos filtros para cubrir distintas porciones del espectro visible y de la región infrarroja cercana.
Fotograma	Imagen captada por una cámara métrica, se les llama comúnmente fotografías o fotos, pero pueden ser también imágenes en formato digital.



Obturador	Dispositivo electromecánico o sólo mecánico, que realiza la apertura y cierre del lente de la cámara permitiendo la incidencia de la luz en la emulsión fotosensible de la película durante el tiempo necesario para su exposición.
Orientación Interior	A partir del haz de los rayos definidos por el plano de la imagen y el centro de perspectiva del conjunto óptico, reconstituye el rayo incidente a la cámara al momento de la toma de las fotografías. Los parámetros de orientación interior se obtienen del proceso de calibración de la cámara.
Resolución Espacial	Es una medida del nivel de detalle que puede verse en una imagen. Es el tamaño en terreno del mínimo objeto reconocible que puede detectar el sensor. Define el tamaño del píxel, que es la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información en la imagen.
Resolución a nivel de Sub-Pixel	Es un término del procesamiento digital de la imagen que se refiere al nivel de resolución que puede obtenerse de imágenes construidas a partir de fuentes con información superior a la resolución nominal de píxeles de dichas imágenes.
Sensor CMOS	Es un sensor de píxeles activos (del inglés active pixel sensor cuyo acrónimo es APS) que detecta la luz basado en tecnología CMOS. Debido a la tecnología CMOS es posible integrar más funciones en un chip sensor, como el control de luminosidad, corrector de contraste, o un conversor analógico-digital.



Glosario de Términos Fotogramétricos

Actualización Cartográfica	Proceso de revisión y modificación de la información gráfica y temática, con el fin de que la cartografía recoja los cambios habidos en el tiempo en el territorio que representa.
Aero-triangulación	Es una técnica de interpolación que tiene por propósito extender fotogramétricamente el control horizontal y vertical (apoyo terrestre) proporcionado por un número reducido de puntos de control, a todos los modelos estereoscópicos. La aerotriangulación consiste en la triangulación e intersección espacial simultánea de los haces de rayos registrados en las imágenes. Los haces proyectados a partir de dos o más imágenes que se traslapan e intersectan en los puntos de control fotográfico comunes, para definir coordenadas tridimensionales para cada punto. La totalidad de los haces de rayos se ajusta matemáticamente a los puntos de control fotográfico conocidos. Lo que permite conocer las coordenadas del terreno de puntos desconocidos (puntos de paso) a partir de la intersección de los haces de rayos ajustados y realizar la orientación exterior de los modelos estereoscópicos.
Análisis Métrico	Contraste y validación de una cartografía a partir de puntos tomados por topografía clásica en el terreno. Los puntos muestreados en el terreno se comparan con los que existen en la cartografía, si las diferencias están dentro de la tolerancia establecida por la escala del mapa, se admite



esta como válida, en caso contrario se debe realizar una nueva cartografía.

Apoyo Terrestre

Son puntos de control horizontal y vertical a través de los cuales es posible referir las imágenes al territorio. El apoyo terrestre para control fotogramétrico se compone de puntos de control y puntos de apoyo.

Bandas

Los sensores remotos cuentan con la capacidad de capturar información de la superficie terrestre simultáneamente en diferentes longitudes de onda, rangos espectrales, canales o bandas del espectro electromagnético, generalmente se captura información en longitudes de onda del espectro visible y el infrarrojo para aplicaciones de uso y cobertura de la tierra.

Base de Datos Geográficos

Contiene datos sobre posición, atributos descriptivos, relaciones espaciales y tiempo de las entidades geográficas, las cuales son representadas mediante el uso de puntos, líneas, polígonos, volúmenes o también por medio de celdas. Es una representación o modelo de la realidad territorial.

Digitalización o Escaneo de Fotografías Aéreas

Transformación de fotografías aéreas a imágenes digitales en formato ráster sin sacrificar la exactitud métrica.

Edición Gráfica

Preparación de un documento gráfico mapa, plano u otro, disponiendo sus elementos visuales de manera armónica, agradable, práctica y fácilmente legible.



Eje Longitudinal	Es el eje imaginario que va desde el morro hasta la cola del avión. El movimiento alrededor de este eje (levantar un ala bajando la otra) se denomina alabeo o balanceo (en inglés "roll"). También se le denomina eje de alabeo, nombre que parece más lógico pues cuando se hace referencia a la estabilidad sobre este eje, es menos confuso hablar de estabilidad de alabeo que de estabilidad "transversal".
Eje Transversal o Lateral	Eje imaginario que va desde el extremo de un ala al extremo de la otra. El movimiento alrededor de este eje (morro arriba o morro abajo) se denomina cabeceo ("pitch" en inglés). También denominado eje de cabeceo.
Ejes del Avión	Se trata de rectas imaginarias e ideales trazadas sobre el avión.
Escala Cartográfica	Es la relación numérica que existe entre la realidad y el mapa o plano. $\text{Escala} = \text{medida del terreno} / \text{medida del plano o mapa}$. Un producto a mayor escala presenta los objetos geográficos con mayor detalle, por el contrario un producto a menor escala los presenta con menor detalle. Así, los productos a menor escala cubren una parte mayor del territorio, mientras que los productos a gran escala, cubren una porción menor del terreno.
Escala de Fotografía	Relación numérica que existe entre la realidad y lo fotografiado, medido directamente en el negativo o en fotos de contacto.



Estereoscopia	Técnica que permite la visión en 3D, aprovechando la visión binocular.
Estereoscopio	Aparato óptico en el que mirando con ambos ojos, se ven dos imágenes de un objeto que al fundirse en una, producen una sensación de relieve por estar tomadas con un ángulo diferente para cada ojo.
Fotogrametría	Arte, ciencia y tecnología para obtener información acerca de los objetos físicos y el medioambiente a través de procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.
Fotogrametría Analítica	Procedimiento Fotogramétrico que en comparación a la metodología analógica el modelo espacial se reconstruye mediante programas informáticos que simulan dicha geometría.
Fotogrametría Analógica	Determinación precisa de un objeto en el espacio, a partir de la utilización de fotografías aéreas formando modelos estereoscópicos, reconstruyendo el modelo espacial con sistemas ópticos y mecánicos.
Fotogrametría Digital	Tipo de fotogrametría que aprovecha como datos de entrada fotografías aéreas previamente transformadas a formato digital o directamente captadas en digital, reconstruyendo el modelo espacial de forma numérica y digital.
Foto Índice	Imagen que combina las fotografías de un vuelo fotogramétrico incluyendo sus márgenes, con el objeto de



permitir la ubicación de puntos de interés en las imágenes individuales, también permite observar el cubrimiento del vuelo.

Foto-interpretación

Procedimiento que consiste en identificar los rasgos que aparecen en la fotografía e interpretar su significado, con apoyo en la visión estereoscópica (3D).

Fotomapa

Mapa realizado mediante la adición de información marginal, datos descriptivos y un sistema de referencia a una fotografía o conjunto de fotografías.

Fotomosaico

Imagen rectificadas que combina las fotografías de un vuelo fotogramétrico, de manera que simula ser una sola foto de la totalidad del área.

Geomática

Conocida también como ingeniería geomática, es la ciencia que se ocupa de la gestión de información geográfica mediante la utilización de Tecnologías de la Información y la Comunicación. La gestión incluye la adquisición, modelado, tratamiento, almacenamiento, recuperación, análisis, explotación, representación y difusión de la Geodesia, Fotogrametría y Teledetección, Sistemas de Información Geográfica e Infraestructura de Datos Espaciales y está relacionada con cualquier ciencia que suponga el procesamiento de información geográfica.

Georreferenciación

Significa que el sistema de coordenadas interno de una imagen de mapa o foto aérea puede estar relacionado con un sistema de tierra de las coordenadas geográficas. Las coordenadas transformadas normalmente se almacenan en el archivo de imagen (GeoPDF y GeoTIFF son



ejemplos), aunque hay muchos mecanismos posibles para la implementación de la georreferenciación.

GPS (Global Positioning System)

Sistema de Posicionamiento Global. Es un sistema pasivo diseñado por el Departamento de la Defensa de los Estados Unidos con el propósito de obtener la posición tridimensional y la velocidad en tiempo real a través de señales emitidas por satélites.

GPS Aerotransportador

Se refiere al uso de la técnica de posicionamiento satelital para proporcionar las coordenadas del centro de cada fotograma. Esta técnica permite reducir la cantidad de puntos de control convencionales.

Imagen Digital

Es una interpretación pictorial compatible con un equipo de cómputo en la cual la imagen está dividida en un teselado muy fino o píxeles, estructurado en renglones y columnas a los que se les asigna un valor.

Información Geográfica

Conjunto de datos, símbolos y representaciones organizados para conocer las condiciones ambientales y físicas del territorio, la integración de este en infraestructura, los recursos naturales y la zona económica exclusiva.

INS (Inertial Navigation System)

Un sistema de navegación inercial es un sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación giroscópicos para calcular continuamente mediante estima, la posición, orientación, y velocidad (dirección y



rapidez de movimiento) de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

Mapa Catastral	Mapa que representa la distribución de parcelas en un área geográfica determinada.
Mapa temático	Mapa compuesto por dos elementos fundamentales: Una base geográfica (mapa base), y una capa de contenido temático. El usuario de un mapa temático habrá de ser, por tanto capaz de integrarlas, visual e intelectualmente, durante la lectura del mapa.
Mosaico	Conjunto de fotografías aéreas que se recortan y se unen con la finalidad de formar una representación gráfica continua de una parte de la superficie terrestre, incluso aprovechando la parte menos deformada de cada fotograma.
Nadir	Es la línea ortogonal al geoide con sentido opuesto al de la fuerza de gravedad.
Orientación	Permite generar un modelo 3D a partir de imágenes con proyección perspectiva central.
Orientación Absoluta	Utiliza las coordenadas conocidas en el terreno para puntos que se puedan identificar en el modelo estereoscópico, con el fin de escalar y nivelar el modelo, con el fin de poder medirse y/o graficarse en un mapa cualquiera de las coordenadas de terreno “X”, “Y” y “Z”.



Orientación Relativa	Involucra la reconstrucción en el restituidor o software de restitución digital, de la relación angular relativa existente entre las orientaciones espaciales de la cámara al momento de la captación de fotografías sucesivas. Esto es un proceso iterativo que debe resultar en un modelo estereoscópico fácil de observar en todas sus partes tras eliminar el paralaje en Y (la separación de ambas imágenes que impide que se fusionen en un modelo estereoscópico).
Radar Doppler	Es aquel radar que usa el efecto Doppler en los ecos de retorno de blancos para medir su velocidad radial. La señal de microonda enviada por el haz direccional en la antena de radar se refleja hacia el radar y se comparan las frecuencias, arriba o abajo desde la señal original, permitiendo mediciones directas y altamente seguras de componentes de velocidades de blancos, en la dirección del haz.
Representación Vectorial	Es la manera de representar a los Objetos Espaciales utilizando vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.
SIG	Un sistema de información geográfica (también conocido con los acrónimos SIG en español o GIS en inglés) es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos que están vinculados a una referencia



espacial. Es decir, es un sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada.

Velocidad Radial Es la velocidad de un objeto a lo largo de la línea visual del observador. Esto es la componente de la velocidad con la que el objeto se acerca (Corrimiento al azul) o aleja (Corrimiento al rojo) del observador, aunque no se mueva exactamente en dirección de colisión con el observador. Es perpendicular a la velocidad transversal del objeto.

Waypoints Son coordenadas para ubicar puntos de referencia tridimensionales utilizados en la navegación basada en GPS. La palabra viene compuesta del inglés way (camino) y point (punto). Los waypoints se emplean para trazar rutas mediante agregación secuencial de puntos.

Glosario de Términos Topográficos

3D Posicionamiento de un punto en tres dimensiones: latitud, longitud y altura.

Altimetría Determinación de las cotas de los diferentes puntos del terreno, con respecto al plano horizontal de comparación, el cual, aunque puede ser tomado a una altura arbitraria, en general se relaciona con el plano horizontal teórico formado por el nivel medio del mar (NMM).

Antena Es el componente de un sistema GPS que, centrado sobre el punto, colecta las señales provenientes de los satélites



y las envía al receptor para el procesamiento. Pueden estar incorporadas o no al cuerpo del mismo.

Azimut	Ángulo que forma una línea con la dirección Norte-Sur, medida de 0° a 360° en el sentido de las manecillas del reloj.
Azimut Geodésico	Ángulo determinado por la tangente a la línea geodésica en el punto de observación y el meridiano elipsoidal que pasa por el mismo, medido en el plano perpendicular a la normal del elipsoide del observador en el sentido de las manecillas del reloj a partir del norte.
Banco de Marca	Es un punto de referencia de carácter permanente, del cual se conoce su localización y ELEVACION, y sirve de base para un trabajo de Nivelación precisa.
Base de Datos Topográficos	Queda definida espacialmente por las coordenada planimétricas de sus puntos (georreferencia) y en cuanto a sus características topográficas por los códigos alfanuméricos que llevan agregados. La coordenada altimétrica suele tener la consideración de un atributo y en tal caso constituye uno de los elementos de la base de datos.
Cartografía	Representación en cartas de la información geográfica. La disciplina que estudia las técnicas para la elaboración de mapas
Catastro	Inventario de inmuebles que permite la correcta localización de los mismos, el establecimiento de sus



Coordenadas	Cada una de las magnitudes que determinan la posición de un punto en un sistema de referencia.
Coordenadas Cartesianas Rectangulares	<ul style="list-style-type: none">o Números reales X, Y, Z representativos de la posición de un punto P de la Tierra en relación a tres ejes mutuamente perpendiculares que se intersecan en un punto común u origen. También se las reconoce como las componentes rectangulares del vector que identifica a P.
Cota	Cifra que representa la altitud de un punto con respecto a la superficie de nivel de referencia.
Croquis	Representación gráfica de cualquier objeto sin considerar escala (Boceto).
Cuadrícula	Sistema de coordenadas cartesianas rectangulares que se sobreponen con precisión y de manera consistente en los mapas, cartas y otras representaciones semejantes de la superficie de la tierra que permite la identificación de la posición del terreno con respecto a otros sitios y el cálculo de la dirección y distancia a otros puntos.
Curva de Nivel	Línea curva en la cartografía y que representa igual cota de elevación del terreno.
Datum Geodésico	En Geodesia un Datum es un conjunto de punto de referencia en la superficie terrestre en bases a los cuales las medidas de posición son tomadas y un modelo asociado de la forma de la tierra (Elipsoide de referencia) para definir el sistema de Coordinada Geográfica. El Datum horizontal es utilizado para describir un punto sobre la superficie terrestre. El Datum vertical referencia a partir



de la cual se miden elevaciones o profundidades. El Datum Horizontal oficial de El Salvador es el North American Datum de 1927, conocido como NAD 27, el Datum vertical es La Unión 1960.

DXF, DGN, DWG

Formatos de Archivos de diseño utilizados para la creación de cartas topográficas y de entidades para ser utilizadas en distintos Sistemas de Información Geográfica y CAD.

Escala

Es la relación numérica que existe entre la dimensión de un objeto en la realidad y la dimensión del mismo en una representación analógica (mapa, foto, etc.). Concepto fundamental en las representaciones gráficas, bien sean cartas, mapas, planos, croquis u otras gráficas.

Escala

Cartográfica

Es la relación numérica que existe entre la realidad y el mapa o plano. $\text{Escala} = \text{medida del terreno} / \text{medida del plano o mapa}$. Un producto a mayor escala presenta los objetos geográficos con mayor detalle, por el contrario un producto a menor escala los presenta con menor detalle. Así, los productos a menor escala cubren una parte mayor del territorio, mientras que los productos a gran escala, cubren una porción menor del terreno.

Estación

Punto materializado en el terreno y a menudo indicado por una señal, donde se coloca el instrumento de observación para efectuar medidas topográficas o geodésicas.

Estación Total

Instrumento de medición topográfica, de precisión que funciona de manera electrónica.



Geoide	Superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre (perpendicular a la dirección de la gravedad en todos sus puntos), que coincide con el nivel medio del mar (NMM) sin perturbaciones y que se extiende de manera continua, por debajo de los continentes. Es una aproximación a la forma real de la Tierra.
Huso Horario	Porción de la superficie terrestre limitada por dos meridianos separados por 15 grados de longitud. La Tierra está dividida en 24 husos horarios.
Levantamiento Geodésico	Conjunto de procedimientos y operaciones de campo destinados a determinar las coordenadas geográficas y elevaciones sobre el nivel de referencia elegido de puntos convenientemente seleccionados y demarcados sobre el terreno.
Mapa	Representación plana y con posiciones relativas, de una porción de superficie terrestre de fenómenos concretos localizables en el espacio y que se elabora a una determinada escala y proyección, conservando los valores de la curvatura de la Tierra.
Meridiano de Greenwich	Meridiano origen que pasa por el Observatorio Real de Greenwich, e indica los cero grados de longitud a partir de los cuales se mide la longitud de todos los meridianos hacia el este y al oeste.
Modelo Geoidal	Representación matemática del geoide para una zona particular, o para toda la Tierra.



Planimetría	Proyección de los rasgos del terreno sobre un plano horizontal.
Plano	Representación gráfica a escala de una pequeña parte de la superficie terrestre (sin considerar su curvatura), o de objetos, existentes o imaginarios, y que puede ser tan detallado como sea necesario. Es una representación considerada menor, y no puede competir con un mapa.
Topografía	Del griego "topo" = lugar, y "grafos" = dibujo. Es la ciencia que con el auxilio de las matemáticas nos ayuda a representar la superficie de un terreno o lugar limitado.
Triangulación	Creación de una red articulada de líneas que forman triángulos y que luego permiten adoptarlas como base para fijar la posición de los puntos claves (vértices).
Vértice	Punto materializado del terreno al que se le han calculado las coordenadas geodésicas con exactitud, donde convergen dos líneas.
Geodésico	



ANEXO B.

ESPECIFICACIONES DEL PHANTOM 3 PROFESSIONAL



ESPECIFICACIONES DEL PHANTOM 3 PROFESSIONAL

		
AERONAVE	Peso (incluyendo batería y hélices)	1.280 g
	Tamaño Diagonal (incluyendo hélices)	590 mm
	Max Ascenso velocidad	5 m / s
	Max Descenso velocidad	3 m / s
	Pase el ratón Precisión	Vertical: +/- 0,1 m (cuando la visión de posicionamiento está activo) o +/- 0,5 m Horizontal: +/- 1,5 m
	Maxima velocidad	16 m / s (modo ATT, sin viento)
	Servicio Max techo por encima del nivel del mar	6000 m (límite de altitud del programa: 120 m por encima del punto de despegue)
	Temperatura de funcionamiento	0 ° C a 40 ° C
	Modo GPS	GPS / GLONASS



GIMBAL	Rango controlable	Pitch -90 ° a + 30 °
	Estabilización	3 ejes (cabeceo, balanceo, guiñada)
CONTROL REMOTO	Frecuencia de operación	2.400 GHz-2.483 GHz
	Distancia máxima	Hasta 5 km o 3.1 millas (sin obstáculos, sin interferencia) cuando FCC obediente hasta 3,5 kilómetros o 2.1 millas (despejadas y libres de la interferencia) cuando CE compatible
	Salida de vídeo Puerto	USB
	Temperatura de funcionamiento	0 ° C-40 ° C
	Batería	6000 mAhLiPo 2S
	Titular de dispositivos móviles	Para tableta o teléfono
	Sensibilidad del receptor (1% PER)	-101 DBm ± 2 dBm
	Transmisor de potencia (PIRE)	FCC: 20 dBm CE: 16 dBm
	Tensión de trabajo	1.2 A @ 7,4 V



BATERÍA VUELO INTELIGENTE

Capacidad	4480 mAh
Voltaje	15,2 V
Tipo de Batería	LiPo 4S
Energía	68 Wh
Peso neto	365 g
Max Duración del vuelo	Aproximadamente 23 minutos
Temperatura de funcionamiento	-10 ° C a 40 ° C
Potencia máxima de carga	100 W





CAMARA FOTOGRAFICA	Sensor	Sony Exmor 1 / 2.3 "Píxeles efectivos: 12.4 M (total de píxeles: 12.76 M)
	Lente	FOV 94 ° 20 mm (35 mm formato equivalente) f / 2.8, el enfoque en ∞
	Rango ISO	100-3200 (video) 100-1600 (foto)
	Velocidad de obturación	8s -1 / 8000s
	Imagen Tamaño máximo	4000 x 3000
	Todavía Modos de Fotografía	Un solo tiro Disparo Burst: 3/5/7 tiros Exposición automática (AEB): 3/5 Marcos entre corchetes en 0,7EV Bias Time-lapse
	Modos de grabación de vídeo	Phantom 3 Profesional <ul style="list-style-type: none">• UHD: 4096x2160p 24/25, 3840x2160p 24/25/30• FHD: 1920x1080p 24/25/30/48/50/60• HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60
	Tipos de Tarjetas SD compatibles Max Bitrate de video Almacenamiento Formatos de archivo admitidos	Micro SD Capacidad máxima: 64 GB. Clase 10 o UHS-1 nota requerida Phantom 3 Profesional 60 Mbps FAT32 / exFAT Foto: JPEG, DNG Vídeo: MP4, MOV (MPEG-4 AVC / H.264)



	Temperatura de funcionamiento	0 ° C a 40 ° C
POSICIONAMIENTO VISIÓN	Max Velocity	Menos de 8 m / s (cuando 2 m por encima del suelo)
	Rango de Altitud	50 cm 300 cm
	Rango de operación	50 cm 300 cm
	Entorno operativo	Superficie con patrón claro y una iluminación adecuada (Lux> 15)
CARGADOR DE BATERÍA	Voltaje	17,4 V
	Potencia nominal	Phantom 3 Profesional 100 W Phantom 3 Avanzada 57 W
APLICACIÓN / LIVE VIEW	Aplicación móvil	DJI GO
	PIRE	100mW
	Densidad espectral de potencia	6.9mW / MHz
	Vive Frecuencia Trabajo Ver	2.4GHz ISM
	Live View Calidad	720p @ 30fps (dependiendo de las condiciones y dispositivo móvil)
	Estado latente	220ms (dependiendo de las condiciones y dispositivos móviles)
	Sistemas operativos necesarios	iOS 8.0 o posterior Android 4.1.2 o posterior
	Dispositivos recomendados	iOS: 5s iPhone, iPhone 6, iPhone 6 Plus, iPad Air, iPad Aire Wi-Fi + Celular, las mini iPad 2, mini iPad 2 Wi-Fi + celular, iPad Air 2, iPad Air 2 Wi-Fi + celular, iPad



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

		<p>Mini 3, y el mini iPad 3 Wi-Fi + celular. Esta aplicación está optimizada para iPhone 5s, iPhone 6 y iPhone 6 Plus</p> <p>Android: Samsung 705c pestañas, Samsung S6, Samsung S5, Samsung NOTA 4, Samsung NOTA3, Google Nexus 9, Google Nexus 7 II, Ascend Mate7, Nubia Z7 mini, SONY Z3 EXPERIA, MI 3, MI PAD</p> <p>* Soporte para dispositivos Android adicionales disponibles como las pruebas y el desarrollo continúa.</p>
--	--	---



ANEXO C.

REPORTE DE CALIDAD



Quality Report



Generated with Pro version 2.1.58

! Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	proyecto ues fmo
Processed	2016-07-05 07:47:25
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.34 cm / 1.71 in
Area Covered	1.6013 km ² / 160.129 ha / 0.6186 sq. mi. / 395.891 acres

Quality Check



? Images	median of 11166 keypoints per image	✓
? Dataset	3242 out of 3242 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	1.69% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 4011.05 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 11 GCPs (11 3D), mean RMS error = 0.048 m	✓

Preview

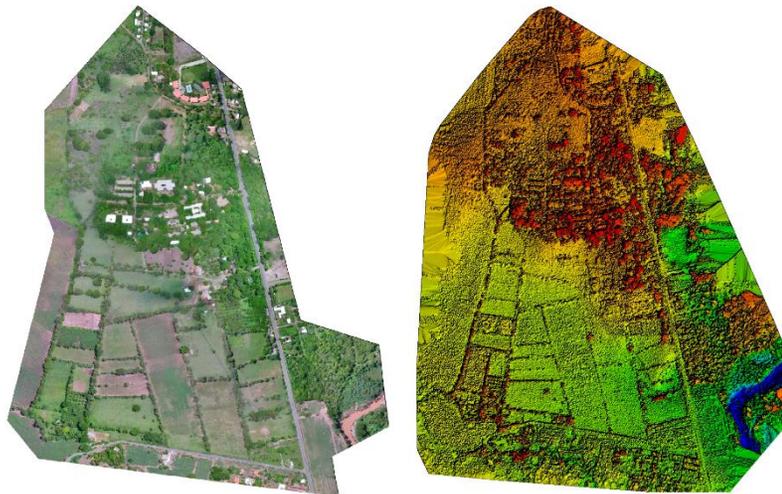


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.



Calibration Details



Number of Calibrated Images	3242 out of 3242
Number of Geolocated Images	3242 out of 3242

Initial Image Positions

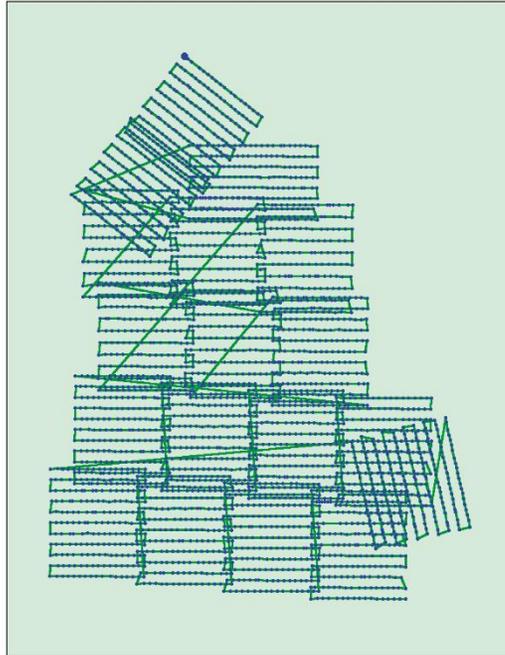


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.



Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

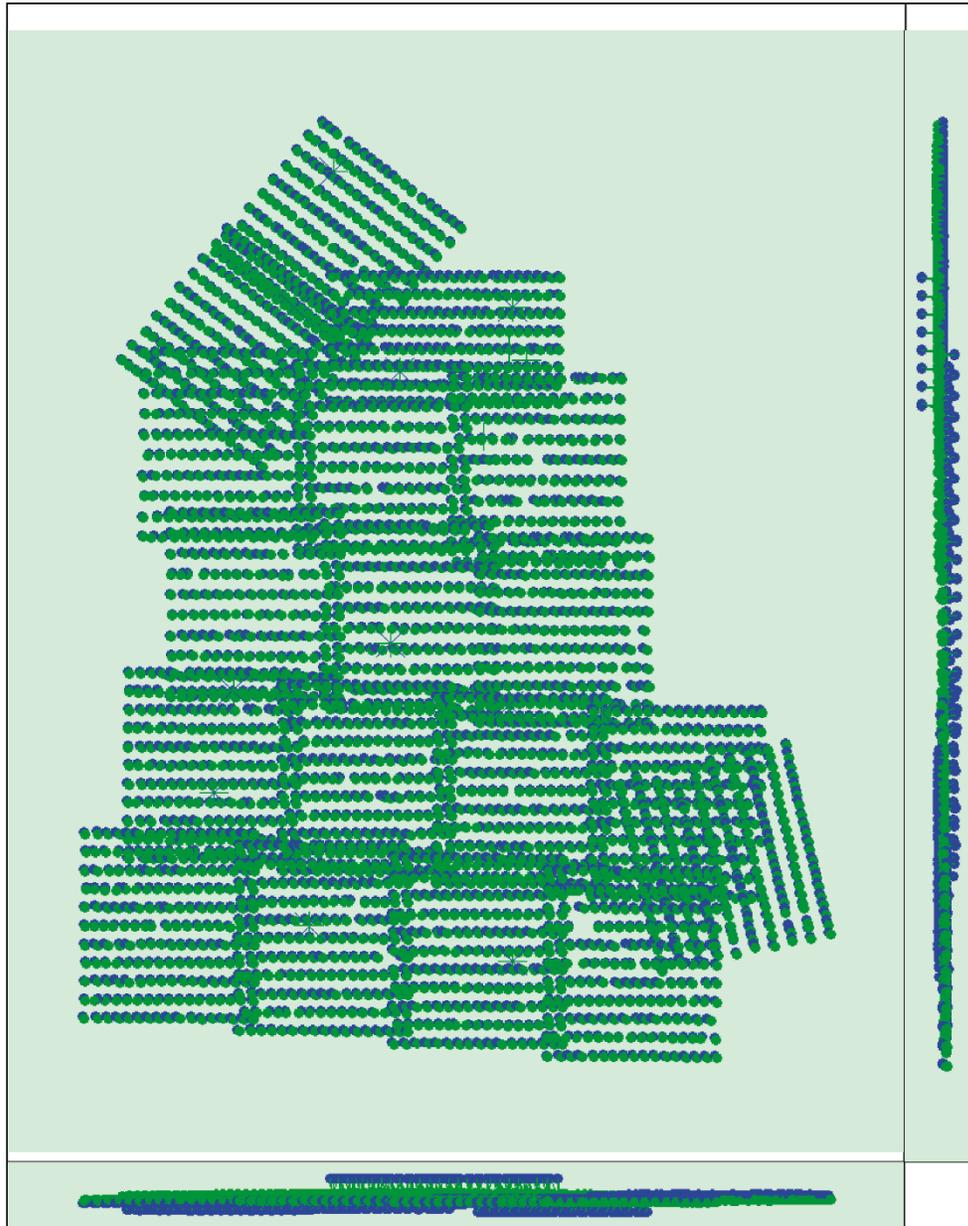


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).



Overlap

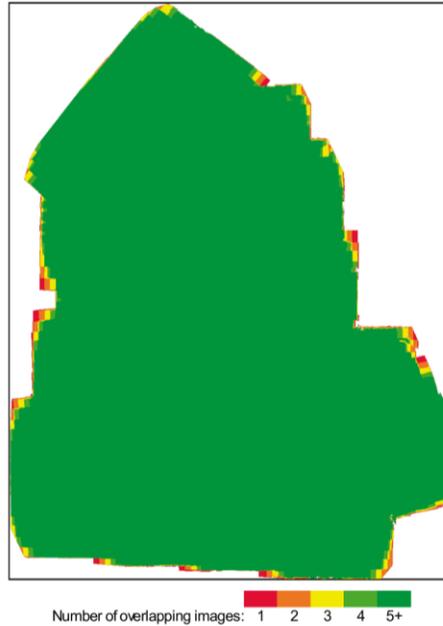


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	12586843
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3396007
Mean Reprojection Error [pixels]	0.193069

Internal Camera Parameters

FC300X_3.6_4000x3000_optimized_for_proyecto_ues_fmo (RGB). Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]



EXIF ID: FC300X_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2542.792 [pixel] 4.016 [mm]	2012.055 [pixel] 3.178 [mm]	1471.884 [pixel] 2.325 [mm]	-0.013	0.016	0.004	0.000	-0.001
Optimized Values	2499.727 [pixel] 3.948 [mm]	2012.032 [pixel] 3.178 [mm]	1474.823 [pixel] 2.329 [mm]	-0.011	0.016	0.004	0.000	-0.000



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	11166	4011
Mn	3648	468
Max	15772	10374
Mean	10994	3882

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2040609
In 3 Images	528347
In 4 Images	247186
In 5 Images	143931
In 6 Images	92990
In 7 Images	64527
In 8 Images	47176
In 9 Images	35128
In 10 Images	27770
In 11 Images	22238
In 12 Images	18540
In 13 Images	15266
In 14 Images	13169
In 15 Images	10958
In 16 Images	9538
In 17 Images	7902
In 18 Images	7113
In 19 Images	6227
In 20 Images	5690
In 21 Images	4860
In 22 Images	4567
In 23 Images	3975
In 24 Images	3593
In 25 Images	3159
In 26 Images	2910
In 27 Images	2668
In 28 Images	2359
In 29 Images	2187
In 30 Images	2110
In 31 Images	1845
In 32 Images	1669
In 33 Images	1472
In 34 Images	1446
In 35 Images	1306
In 36 Images	1180
In 37 Images	1001
In 38 Images	928
In 39 Images	826
In 40 Images	799
In 41 Images	681
In 42 Images	622
In 43 Images	585
In 44 Images	506
In 45 Images	536
In 46 Images	394
In 47 Images	377
In 48 Images	330

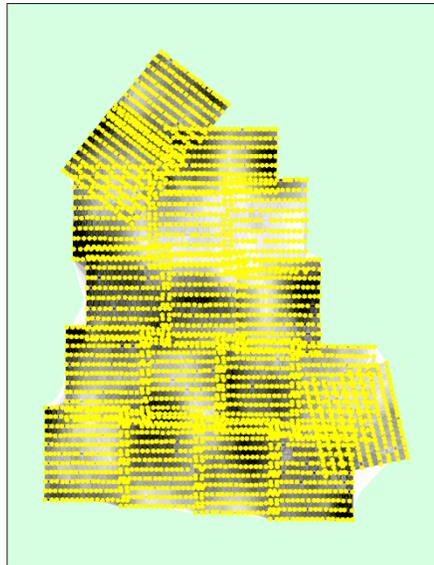


APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

In 49 Images	304
In 50 Images	268
In 51 Images	246
In 52 Images	195
In 53 Images	193
In 54 Images	170
In 55 Images	171
In 56 Images	132
In 57 Images	130
In 58 Images	105
In 59 Images	101
In 60 Images	96
In 61 Images	85
In 62 Images	88
In 63 Images	66
In 64 Images	69
In 65 Images	46
In 66 Images	50
In 67 Images	27
In 68 Images	32
In 69 Images	29
In 70 Images	20
In 71 Images	21
In 72 Images	19
In 73 Images	18
In 74 Images	16
In 75 Images	20
In 76 Images	13
In 77 Images	11
In 78 Images	8
In 79 Images	7
In 80 Images	3
In 81 Images	2
In 82 Images	9
In 83 Images	2
In 84 Images	5
In 85 Images	6
In 86 Images	5
In 87 Images	4
In 89 Images	2
In 90 Images	2
In 91 Images	1
In 92 Images	1
In 93 Images	2
In 94 Images	2
In 95 Images	1
In 97 Images	1
In 99 Images	2
In 100 Images	1
In 101 Images	1
In 105 Images	2
In 106 Images	1

2D Keypoint Matches

1



Number of matches 25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Manual Tie Points

MTP Name	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
mtp363	0.293	8 / 8
mtp364	0.284	16 / 16
mtp365	0.570	5 / 5

Projection errors for manual tie points. The last column counts the number of images where the manual tie point has been automatically verified vs. manually marked.

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
FMD1 (3D)	0.020/ 0.020	0.060	-0.031	-0.004	0.920	65 / 66
FMD4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.053	0.004	-0.004	0.491	43 / 43
GCP06 (3D)	0.020/ 0.020	0.119	-0.119	-0.010	0.626	43 / 43
GCP09 (3D)	0.020/ 0.020	0.059	0.202	0.014	0.657	50 / 50
GCP10 (3D)	0.020/ 0.020	-0.096	-0.088	0.011	0.743	39 / 39
GCP12 (3D)	0.020/ 0.020	-0.020	0.023	-0.008	0.487	42 / 42
GCP13 (3D)	0.020/ 0.020	0.028	-0.002	0.007	0.478	63 / 63
GCP21 (3D)	0.020/ 0.020	-0.025	0.050	-0.007	0.793	73 / 73
GCP22 (3D)	0.020/ 0.020	-0.005	-0.027	0.001	0.390	38 / 38
GCP26 (3D)	0.020/ 0.020	-0.010	0.002	0.003	0.491	41 / 41



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

GCP04 (3D)	0.020/ 0.020	-0.062	-0.019	0.001	0.809	45 / 45
Mean [m]		-0.000405	-0.000481	0.000433		
Sigma [m]		0.059564	0.078595	0.007554		
RMS Error [m]		0.059565	0.078596	0.007566		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

? Absolute Geolocation Variance



0 out of 3242 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	6.38
-15.00	-12.00	0.00	0.00	7.62
-12.00	-9.00	0.00	0.00	12.49
-9.00	-6.00	3.92	0.00	8.20
-6.00	-3.00	14.96	2.31	4.44
-3.00	0.00	31.46	45.43	16.29
0.00	3.00	29.18	49.51	7.96
3.00	6.00	17.67	2.22	10.92
6.00	9.00	2.81	0.52	5.64
9.00	12.00	0.00	0.00	7.65
12.00	15.00	0.00	0.00	6.51
15.00	-	0.00	0.00	5.89
Mean [m]		-2.624854	3.435156	-5.117791
Sigma [m]		3.301537	1.300425	11.853616
RMS Error [m]		4.217820	3.673065	12.911235

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-2.624854	3.435156	-5.117791

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

? Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	83.00	99.07	59.44
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	93.89
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	94.54
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.015995
Phi	1.369266
Kappa	1.720422

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

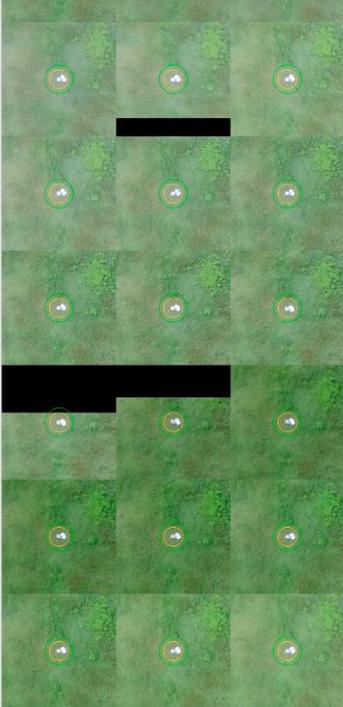
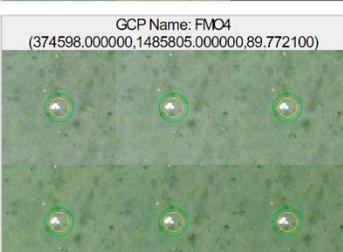


Georeference Verification



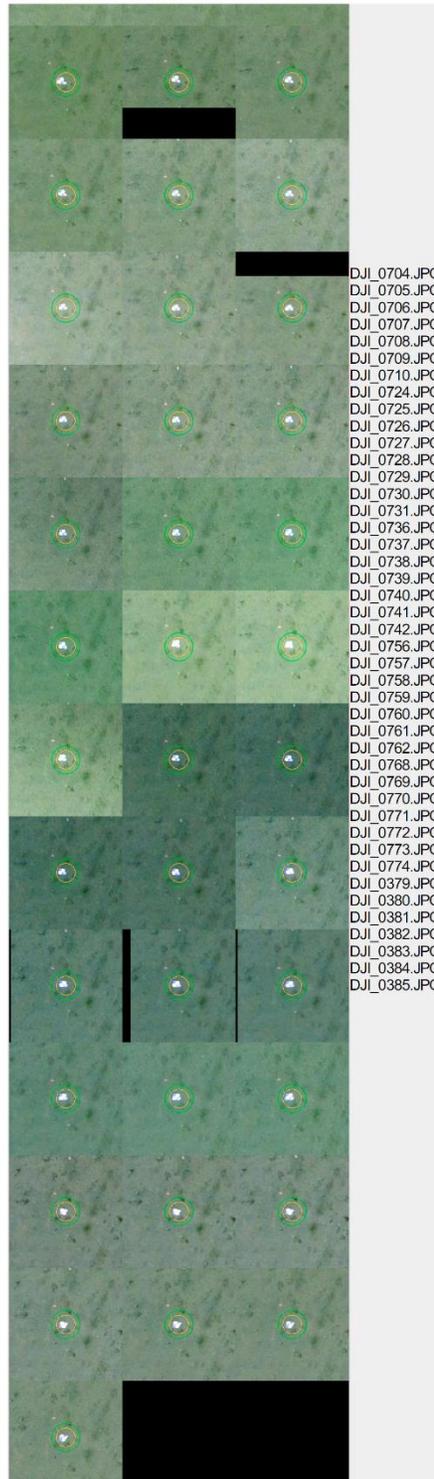


APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

	DJI_0169.JPG DJI_0170.JPG DJI_0171.JPG DJI_0172.JPG DJI_0179.JPG DJI_0180.JPG DJI_0181.JPG DJI_0182.JPG DJI_0183.JPG DJI_0184.JPG DJI_0185.JPG DJI_0186.JPG DJI_0197.JPG DJI_0198.JPG DJI_0199.JPG DJI_0200.JPG DJI_0201.JPG DJI_0202.JPG DJI_0203.JPG DJI_0204.JPG
	
<p>GCP FMD1 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.</p>	
	DJI_0133.JPG DJI_0169.JPG
<p>GCP Name: FMD4 (374598.000000,1485805.000000,89.772100)</p>	
	



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS





APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

GCP FMO4 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.

DJI_0378.JPG

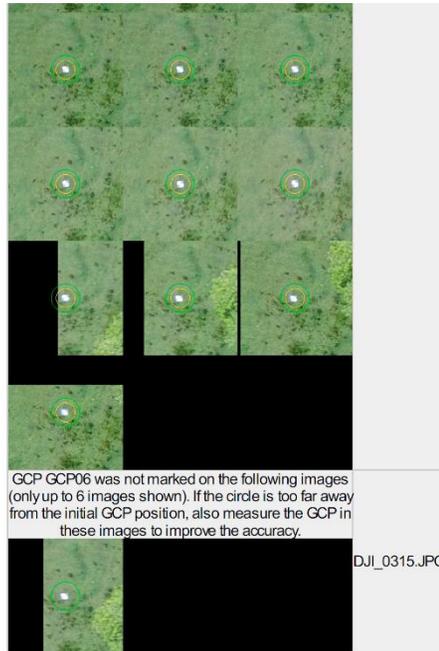
GCP Name: GCP06
(374468.000000,1485336.000000,87.191600)

DJI_0224.JPG
DJI_0225.JPG
DJI_0226.JPG
DJI_0227.JPG
DJI_0228.JPG
DJI_0229.JPG
DJI_0230.JPG
DJI_0231.JPG
DJI_0245.JPG
DJI_0246.JPG
DJI_0247.JPG
DJI_0248.JPG
DJI_0249.JPG
DJI_0250.JPG
DJI_0251.JPG
DJI_0252.JPG
DJI_0259.JPG
DJI_0260.JPG
DJI_0261.JPG
DJI_0262.JPG
DJI_0263.JPG
DJI_0264.JPG
DJI_0265.JPG
DJI_0266.JPG
DJI_0278.JPG
DJI_0279.JPG
DJI_0280.JPG
DJI_0281.JPG
DJI_0282.JPG
DJI_0283.JPG
DJI_0284.JPG
DJI_0285.JPG
DJI_0292.JPG
DJI_0293.JPG
DJI_0294.JPG
DJI_0295.JPG
DJI_0296.JPG
DJI_0297.JPG
DJI_0298.JPG
DJI_0314.JPG
DJI_0316.JPG
DJI_0317.JPG
DJI_0318.JPG

The image displays a grid of aerial photographs used for photogrammetry. Each photo has a green circle with a white center, representing a Ground Control Point (GCP). The grid is composed of 12 rows and 3 columns of images. The first row shows a single image with a GCP marker. The second row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The third row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The fourth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The fifth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The sixth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The seventh row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The eighth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The ninth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The tenth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The eleventh row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The twelfth row shows a 3x3 grid of images with GCP markers. The images are labeled with file names such as DJI_0224.JPG, DJI_0225.JPG, DJI_0226.JPG, DJI_0227.JPG, DJI_0228.JPG, DJI_0229.JPG, DJI_0230.JPG, DJI_0231.JPG, DJI_0245.JPG, DJI_0246.JPG, DJI_0247.JPG, DJI_0248.JPG, DJI_0249.JPG, DJI_0250.JPG, DJI_0251.JPG, DJI_0252.JPG, DJI_0259.JPG, DJI_0260.JPG, DJI_0261.JPG, DJI_0262.JPG, DJI_0263.JPG, DJI_0264.JPG, DJI_0265.JPG, DJI_0266.JPG, DJI_0278.JPG, DJI_0279.JPG, DJI_0280.JPG, DJI_0281.JPG, DJI_0282.JPG, DJI_0283.JPG, DJI_0284.JPG, DJI_0285.JPG, DJI_0292.JPG, DJI_0293.JPG, DJI_0294.JPG, DJI_0295.JPG, DJI_0296.JPG, DJI_0297.JPG, DJI_0298.JPG, DJI_0314.JPG, DJI_0316.JPG, DJI_0317.JPG, and DJI_0318.JPG. A black bar is present in the top right corner of the grid, and another black bar is present in the bottom right corner of the grid.



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS





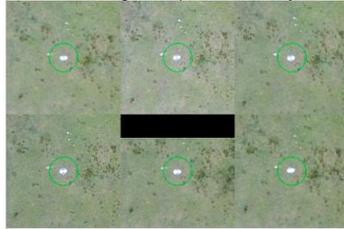
APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS





APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

GCP GCP10 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.



DJI_0602.JPG
DJI_0609.JPG
DJI_0612.JPG
DJI_0631.JPG
DJI_0635.JPG
DJI_0192.JPG

GCP Name: GCP12
(374789.000000,1485703.000000,91.593800)



DJI_0779.JPG
DJI_0780.JPG
DJI_0781.JPG
DJI_0782.JPG
DJI_0783.JPG
DJI_0784.JPG
DJI_0128.JPG
DJI_0129.JPG
DJI_0131.JPG
DJI_0132.JPG
DJI_0136.JPG
DJI_0137.JPG
DJI_0138.JPG
DJI_0139.JPG
DJI_0140.JPG
DJI_0162.JPG
DJI_0163.JPG
DJI_0164.JPG
DJI_0165.JPG
DJI_0166.JPG
DJI_0167.JPG
DJI_0168.JPG
DJI_0170.JPG
DJI_0171.JPG
DJI_0172.JPG
DJI_0173.JPG
DJI_0174.JPG
DJI_0562.JPG
DJI_0563.JPG
DJI_0564.JPG
DJI_0565.JPG
DJI_0566.JPG
DJI_0567.JPG
DJI_0581.JPG
DJI_0582.JPG
DJI_0583.JPG
DJI_0584.JPG
DJI_0585.JPG
DJI_0586.JPG
DJI_0587.JPG



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

	DJI_0598.JPG DJI_0599.JPG
<p>GCP GCP12 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.</p>	
	DJI_0750.JPG DJI_0751.JPG DJI_0752.JPG DJI_0102.JPG DJI_0130.JPG DJI_0133.JPG
<p>GCP Name: GCP13 (374938.000000,1485690.000000,89.261300)</p>	



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS





APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS



DJI_0612.JPG
DJI_0747.JPG





APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS



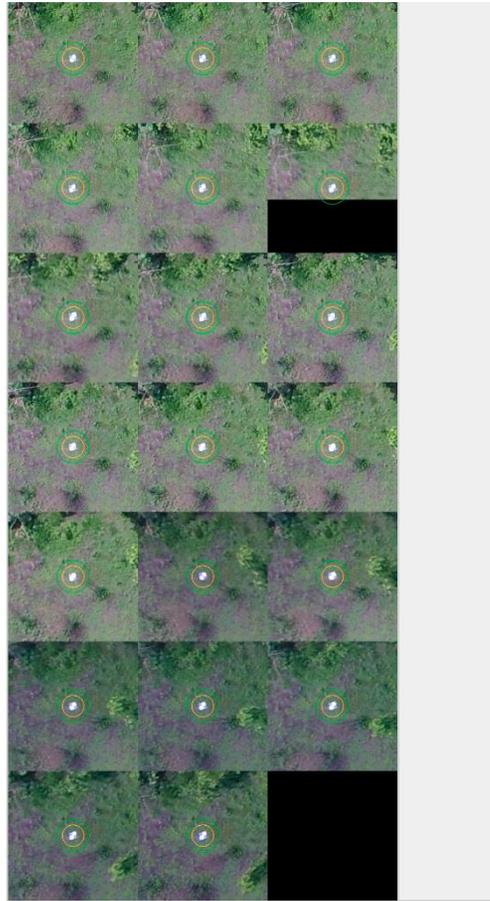


APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

<p>GCP GCP21 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.</p>	
	DJI_0119.JPG DJI_0127.JPG DJI_0128.JPG DJI_0220.JPG DJI_0273.JPG
<p>GCP Name: GCP22 (374506.000000,1486589.000000,96.522600)</p>	
	DJI_0001.JPG DJI_0002.JPG DJI_0003.JPG DJI_0004.JPG DJI_0005.JPG DJI_0006.JPG DJI_0007.JPG DJI_0008.JPG DJI_0029.JPG DJI_0030.JPG DJI_0031.JPG DJI_0032.JPG DJI_0033.JPG DJI_0034.JPG DJI_0035.JPG DJI_0036.JPG DJI_0039.JPG DJI_0040.JPG DJI_0041.JPG DJI_0042.JPG DJI_0043.JPG DJI_0044.JPG DJI_0045.JPG DJI_0046.JPG DJI_0068.JPG DJI_0069.JPG DJI_0070.JPG DJI_0071.JPG DJI_0072.JPG DJI_0073.JPG DJI_0074.JPG DJI_0077.JPG DJI_0078.JPG DJI_0079.JPG DJI_0080.JPG DJI_0081.JPG DJI_0082.JPG DJI_0083.JPG



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS



GCP GCP22 was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.



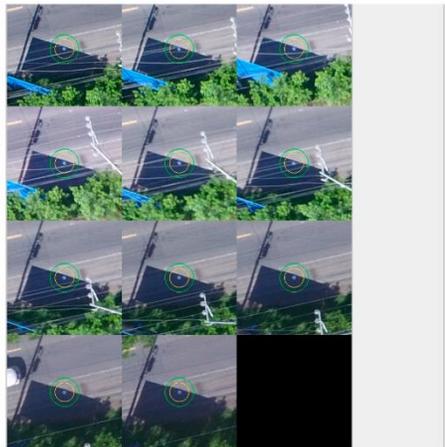


APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS





APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS



GCP Name: GCP04
(374794.000000,1485278.000000,86.199600)

DJI_0425.JPG
DJI_0426.JPG
DJI_0427.JPG
DJI_0428.JPG
DJI_0429.JPG
DJI_0430.JPG
DJI_0431.JPG
DJI_0447.JPG
DJI_0448.JPG
DJI_0449.JPG
DJI_0450.JPG
DJI_0451.JPG
DJI_0452.JPG
DJI_0453.JPG
DJI_0454.JPG
DJI_0459.JPG
DJI_0460.JPG
DJI_0461.JPG
DJI_0462.JPG
DJI_0463.JPG
DJI_0464.JPG
DJI_0465.JPG
DJI_0481.JPG
DJI_0482.JPG
DJI_0483.JPG
DJI_0484.JPG
DJI_0485.JPG
DJI_0486.JPG
DJI_0487.JPG
DJI_0488.JPG
DJI_0493.JPG
DJI_0494.JPG



Figure 7: Images in which GCPs have been marked (yellow circle) and in which their computed 3D points have been projected (green circle). A green circle outside of the yellow circle indicates either an accuracy issue or a GCP issue.

Processing Options



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce GT 740 (Driver: 10.18.13.5382)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit
Camera Model Name	FC300X_3.6_4000x3000_optimized_for_proyecto_ues_fmo (RGB)
Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTMzone 16N (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 16N (egm96)
Detected template:	UES*
Keypoints Image Scale	Custom, Image Scale: 0.5
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Alternative, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: Custom yes



Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	no
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Advanced: Point Cloud Classification (Beta)	yes, Minimum Object Length [m]: 0.1, Maximum Object Length [m]: 400, Minimum Object Height [m]: 0.1
Time for Point Cloud Densification	21h:37m:10s
Time for Point Cloud Classification	03h:18m:07s
Time for 3D Textured Mesh Generation	NA

Results



Number of Processed Clusters	6
Number of Generated Tiles	10
Number of 3D Densified Points	222314882
Average Density (per m ³)	67.3

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (4.34 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Medium
DSM Generation	yes, Method: Triangulation, Merge Tiles: yes
Grid DSM	yes, Spacing [cm]: 50
Time for DSM Generation	02h:47m:06s
Time for Orthomosaic Generation	03h:32m:05s



ANEXO D.

DETALLE DE PUNTOS UTILIZADOS



PUNTOS UTILIZADOS EN EL PROCESAMIENTO

PUNTOS RECOLECTADOS CON RTK (PROYECCIÓN CÓNICA CONFORMAL DE LAMBERT 3 PARÁMETROS EL SALVADOR)					CONVERSIÓN A PROYECCIÓN UTM DE COORDENADAS NORTE Y ESTE	
PUNTO	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	DESCRIPTOR	NORTE	ESTE
1	258047.7569	591142.8368	95.7004	FMO1	1486257	374612
2	258167.8584	591173.9287	96.6272	FMO2	1486377	374644
3	258409.3051	591033.1372	96.4461	ESQ	1486620	374505
4	258421.2315	591033.8350	96.6658	C	1486632	374506
5	258415.9804	591029.9368	96.5807	C	1486626	374502
6	258418.3155	591024.7795	96.5787	C	1486629	374497
7	258424.3662	591030.7974	96.6495	C	1486635	374503
8	258404.3105	591050.7833	97.0573	C	1486614	374523
9	258419.3975	591053.2674	96.9906	C	1486630	374525
10	258406.4435	591062.3623	96.9842	C	1486616	374534
11	258393.1452	591060.4372	96.5823	C	1486603	374532
12	258396.6045	591044.2456	96.7320	L	1486607	374516
13	258384.2703	591055.1977	97.0150	L	1486594	374527
14	258370.7430	591062.8465	97.0178	L	1486581	374534
15	258349.1362	591070.2013	97.0424	L	1486559	374542
16	258378.9480	591071.0898	96.9676	L	1486589	374543
17	258376.2582	591074.4154	97.0194	L	1486586	374546
18	258344.7049	591080.7680	97.2209	L	1486555	374552
19	258328.9618	591073.6812	97.3598	L	1486539	374545
20	258302.5349	591075.5654	97.1951	L	1486512	374547
21	258301.8219	591086.0674	97.7472	C	1486512	374557
22	258283.1198	591076.7017	96.9139	F	1486493	374548
23	258274.8188	591077.4290	96.9200	F	1486485	374548
24	258389.3591	591032.0237	96.4475	N	1486600	374504
25	258381.0537	591037.3317	96.5038	N	1486591	374509
26	258371.1657	591043.3860	96.5818	N	1486581	374515
27	258363.4859	591050.3854	96.6256	N	1486574	374522
28	258352.9215	591054.1955	96.6749	N	1486563	374526
29	258340.9614	591056.4667	96.7351	N	1486551	374528
30	258328.2191	591058.0789	96.7798	N	1486538	374529
31	258303.9244	591058.6026	96.7165	N	1486514	374530



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

32	258302.9068	591048.9649	96.6669	N	1486513	374520
33	258313.8684	591048.3908	96.6100	N	1486524	374519
34	258324.0565	591052.0306	96.6587	N	1486534	374523
35	258336.0082	591051.7625	96.6678	N	1486546	374523
36	258346.6238	591050.9923	96.6025	N	1486557	374522
37	258355.5450	591042.6863	96.5274	N	1486566	374514
38	258365.8952	591032.7594	96.4076	N	1486576	374504
39	258374.8566	591025.7177	96.3600	N	1486585	374497
40	258368.6450	591016.9034	96.2551	N	1486579	374488
41	258354.8829	591010.6963	96.2000	N	1486565	374482
42	258346.0300	591015.2487	96.2701	N	1486556	374487
43	258335.6607	591016.1052	96.3590	N	1486546	374487
44	258316.7563	591017.7477	96.4308	N	1486527	374489
45	258262.3764	591080.3677	96.8639	L	1486472	374551
46	258250.7445	591085.5659	96.8820	L	1486461	374556
47	258250.7693	591085.7827	96.8594	L	1486461	374556
48	258235.6449	591097.6116	96.8280	L	1486445	374568
49	258241.6742	591104.7066	96.7579	C	1486451	374575
50	258223.2964	591111.8661	96.8215	L	1486433	374582
51	258217.5652	591119.6500	96.7934	F	1486427	374590
52	258214.3005	591125.0164	96.6452	F	1486424	374595
53	258217.8062	591140.0592	96.3085	C	1486427	374610
54	258200.9863	591148.3089	96.5848	L	1486410	374618
55	258180.3914	591189.7309	95.7252	L	1486389	374660
56	258178.6344	591193.1870	95.4896	ESQ	1486388	374663
57	258175.6531	591210.5953	95.7107	L	1486385	374680
58	258175.0767	591190.5069	96.1744	N	1486384	374660
59	258174.6147	591196.6251	95.7315	L	1486384	374667
60	258173.9803	591200.7401	95.3720	N	1486383	374671
61	258172.3683	591203.4807	95.7414	N	1486381	374673
62	258170.8342	591202.6825	95.2495	N	1486380	374673
63	258168.8986	591202.1003	95.8268	L	1486378	374672
64	258168.5907	591206.9348	95.7297	N	1486377	374677
65	258165.6493	591209.8100	95.7984	N	1486375	374680
66	258163.9543	591208.4987	95.0855	N	1486373	374678
67	258162.0319	591207.6529	95.4664	L	1486371	374677
68	258167.1081	591203.6486	95.6160	L	1486376	374673



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

69	258163.0480	591213.9963	95.7759	N	1486372	374684
70	258160.1607	591213.9815	95.7194	N	1486369	374684
71	258157.1207	591213.5682	94.9625	N	1486366	374683
72	258156.4021	591211.7224	95.3941	L	1486365	374681
73	258153.1071	591216.2988	94.8892	N	1486362	374686
74	258153.5043	591218.7455	95.8146	N	1486362	374688
75	258150.1002	591220.8996	95.7277	N	1486359	374691
76	258147.0608	591223.5489	95.6140	N	1486356	374693
77	258146.3547	591221.3159	94.6227	N	1486355	374691
78	258145.1251	591219.5848	95.0834	L	1486354	374689
79	258141.2248	591225.0253	94.4956	N	1486350	374695
80	258139.8168	591223.4983	94.9001	L	1486349	374693
81	258138.1033	591227.3117	94.4197	N	1486347	374697
82	258137.8031	591229.9365	95.4423	N	1486347	374700
83	258134.1705	591232.4269	95.3618	N	1486343	374702
84	258133.1028	591234.2966	95.3131	N	1486342	374704
85	258129.9993	591234.5010	95.2580	N	1486339	374704
86	258128.9581	591232.6746	94.2186	N	1486338	374702
87	258132.4373	591228.2131	94.8348	N	1486341	374698
88	258125.0944	591238.2149	95.1679	N	1486334	374708
89	258123.6315	591235.9570	94.0908	N	1486332	374705
90	258121.8058	591234.8408	94.8280	L	1486330	374704
91	258120.4591	591241.2762	95.0303	N	1486329	374711
92	258118.5229	591246.7061	94.9136	N	1486327	374716
93	258116.3256	591244.5901	94.9440	N	1486325	374714
94	258114.8991	591243.3127	93.9288	N	1486324	374713
95	258112.0633	591242.6673	94.5703	L	1486321	374712
96	258110.3180	591247.6389	93.7763	N	1486319	374717
97	258108.2064	591247.1085	94.5094	L	1486317	374716
98	258108.6672	591250.1241	93.8103	N	1486317	374719
99	258108.9143	591252.6137	94.4742	N	1486317	374722
100	258106.3734	591252.5744	93.8015	N	1486315	374722
101	258105.5589	591257.9320	94.1238	N	1486314	374727
102	258096.8281	591263.8632	93.7392	N	1486305	374733
103	258094.9968	591262.4086	94.0451	L	1486303	374732
104	258094.5226	591267.3157	93.8350	N	1486303	374737
105	258092.2365	591269.6377	93.7323	N	1486301	374739



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

106	258091.1602	591270.0510	93.3586	N	1486300	374739
107	258091.7548	591272.1540	93.7525	N	1486300	374741
108	258090.6423	591272.1602	93.6348	N	1486299	374741
109	258089.9948	591271.4858	93.3044	N	1486298	374741
110	258090.9859	591268.0120	94.1724	L	1486299	374737
111	258089.4354	591271.2922	93.8832	N	1486298	374740
112	258088.0522	591271.1697	94.2841	L	1486296	374740
113	258088.7784	591278.4283	93.2522	N	1486297	374748
114	258089.9859	591280.3371	93.5971	N	1486298	374750
115	258084.4851	591282.7752	93.0465	N	1486293	374752
116	258080.2858	591282.0469	93.7417	L	1486289	374751
117	258070.4929	591287.3101	93.7114	N	1486279	374756
118	258073.3499	591291.0403	93.5244	L	1486282	374760
119	258074.7061	591301.4781	93.6734	N	1486283	374771
120	258080.0155	591310.0666	93.8582	ANTENA	1486288	374779
121	258067.5220	591305.2260	93.5082	N	1486276	374774
122	258063.0459	591309.1435	93.2967	N	1486271	374778
123	258061.6887	591307.6880	92.8113	N	1486270	374777
124	258060.5012	591306.8256	92.9206	N	1486269	374776
125	258057.9172	591317.2600	93.7020	N	1486266	374786
126	258054.4674	591324.0223	93.6745	N	1486262	374793
127	258048.6926	591330.3520	93.8687	N	1486257	374799
128	258041.4489	591339.1368	92.2813	ESQ	1486249	374808
129	258046.9411	591326.6117	92.2155	L	1486255	374795
130	258034.9273	591340.8125	92.1081	L	1486243	374810
131	258015.3335	591345.8470	91.4340	L	1486223	374814
132	257960.7449	591358.7031	91.6600	L	1486168	374827
133	257946.6531	591362.3229	91.8829	L	1486154	374830
134	257933.6405	591365.4019	92.1021	L	1486141	374833
135	257927.5317	591364.2007	92.1201	L	1486135	374832
136	257922.5198	591365.4175	92.1268	L	1486130	374833
137	257916.0126	591358.0020	92.4651	L	1486124	374826
138	257910.9873	591359.0537	92.6485	AP	1486119	374827
139	257909.8066	591359.3472	92.3967	V	1486118	374827
140	257903.9857	591360.6659	92.3883	AP	1486112	374828
141	257906.0001	591369.2425	92.2555	V	1486114	374837
142	257911.8905	591368.2384	92.3127	V	1486120	374836



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

143	257969.0841	591194.8492	94.4756	N	1486178	374663
144	257956.8908	591193.8089	94.9617	N	1486166	374662
145	257945.3794	591194.0827	94.8812	N	1486154	374662
146	257945.6859	591209.6602	94.9185	N	1486155	374678
147	257953.7211	591220.5966	94.3925	N	1486163	374689
148	257960.3966	591232.9673	94.3689	N	1486169	374701
149	257946.3872	591234.3197	94.1543	N	1486155	374702
150	257957.1076	591273.5761	94.0463	N	1486166	374742
151	257965.2303	591303.6012	92.3865	N	1486173	374772
152	257994.8958	591315.4427	91.6936	N	1486203	374784
153	257982.8591	591292.1226	92.2753	N	1486191	374760
154	257981.5992	591272.0966	92.8259	N	1486190	374740
155	257977.4453	591232.5408	93.9181	N	1486186	374701
156	258001.6653	591237.0242	93.7739	N	1486210	374705
157	258003.1981	591272.7518	92.8463	N	1486212	374741
158	257998.4063	591310.8991	91.7572	N	1486206	374779
159	258026.0234	591299.4671	92.8064	N	1486234	374768
160	258043.4964	591277.5873	93.2564	N	1486252	374746
161	258047.2714	591249.9045	93.7073	N	1486256	374719
162	258061.9933	591215.4966	94.5125	N	1486271	374684
163	258087.5324	591236.7105	94.6327	N	1486296	374706
164	258070.6267	591252.9639	93.9237	N	1486279	374722
165	258111.5444	591226.2761	95.0809	N	1486320	374696
166	258130.4878	591213.5612	95.5109	N	1486339	374683
167	258067.6626	591192.3235	94.7684	N	1486277	374661
168	257890.4958	591002.7745	92.8423	PC	1486101	374470
169	257865.9544	590873.1952	91.6786	FMO6	1486078	374341
170	257719.0069	590920.9495	89.7338	FMO5	1485930	374387
171	258265.7942	590965.6761	95.8531	PC	1486477	374436
172	258398.2164	591024.3935	96.5429	L	1486609	374496
173	258377.3938	591007.3997	96.3424	L	1486588	374479
174	258355.1381	590989.2026	96.1362	L	1486566	374461
175	258343.1924	590979.2698	96.0383	L	1486554	374451
176	258324.3314	590963.6210	95.7935	L	1486535	374435
177	258299.9052	590944.1898	95.6834	L	1486511	374415
178	258287.2720	590933.4006	95.5875	L	1486498	374404
179	258269.5392	590918.8987	95.2463	L	1486481	374390



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

180	258252.5642	590905.3742	95.1130	L	1486464	374376
181	258207.5784	590869.8544	94.6035	L	1486419	374340
182	258200.5366	590864.3357	94.5989	L	1486412	374335
183	258163.8739	590833.5352	94.5100	L	1486376	374303
184	258149.6212	590832.1237	94.8276	L	1486362	374302
185	258114.7707	590832.0715	95.3631	L	1486327	374302
186	258103.8799	590832.2895	95.6169	L	1486316	374302
187	258088.0765	590831.9095	95.8765	L	1486300	374301
188	258063.4717	590830.1710	95.9059	L	1486275	374299
189	258043.9847	590830.5387	95.8206	L	1486256	374299
190	258020.0053	590830.1938	95.6389	L	1486232	374299
191	257985.1753	590831.1967	95.0453	L	1486197	374300
192	257961.4862	590831.2141	94.9250	L	1486174	374299
193	257934.7222	590830.9879	94.1985	L	1486147	374299
194	257918.3156	590830.1738	94.0025	L	1486130	374298
195	257892.0387	590829.0129	93.4361	L	1486104	374297
196	257884.4169	590828.8217	93.1289	ESQ	1486096	374296
197	257885.1685	590823.0439	92.8434	L	1486097	374291
198	257886.6133	590814.2320	93.0381	L	1486099	374282
199	258100.6860	590832.3829	95.6481	L	1486313	374302
200	258101.0672	590838.1008	95.3679	C	1486313	374307
201	258101.4188	590859.5051	95.5063	C	1486313	374329
202	258101.7518	590891.0284	95.4149	C	1486313	374360
203	258102.0471	590912.0372	95.2272	C	1486313	374381
204	258101.6495	590918.4476	95.1979	C	1486313	374388
205	258101.8692	590935.1360	94.9771	C	1486313	374404
206	258099.3395	590935.4694	94.9079	C	1486310	374405
207	257877.5477	590830.5052	92.5996	L	1486090	374298
208	257865.2907	590836.2036	92.2618	L	1486077	374304
209	257861.7815	590838.5188	92.2700	L	1486074	374306
210	257852.7587	590842.7067	91.9159	L	1486065	374310
211	257837.5251	590850.1734	91.6397	L	1486049	374317
212	257811.5108	590862.9066	90.8377	L	1486023	374330
213	257787.3763	590873.5987	90.2085	L	1485999	374340
214	257784.9838	590874.3402	90.0946	L	1485997	374341
215	257783.1046	590874.2679	90.3026	L	1485995	374341
216	257771.4760	590871.2353	89.7807	L	1485983	374338



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

217	257745.5786	590863.5549	89.5191	L	1485957	374330
218	257714.8059	590858.3495	89.3754	L	1485927	374325
219	257700.7137	590856.9545	89.3660	L	1485913	374323
220	257675.7869	590854.4612	88.9991	L	1485888	374320
221	257654.3836	590852.7427	88.9226	L	1485866	374318
222	257628.9634	590849.7971	88.9285	L	1485841	374315
223	257624.3636	590848.7898	88.6589	L	1485836	374314
224	257607.9958	590844.0142	88.5948	L	1485820	374309
225	257551.6855	590828.8399	88.8007	L	1485764	374294
226	257521.7375	590820.1494	88.7241	L	1485734	374285
227	257491.5645	590810.2745	88.6327	L	1485704	374275
228	257463.0935	590801.3519	88.3446	L	1485675	374265
229	257442.2529	590795.3346	88.4365	L	1485655	374259
230	257403.7039	590784.8129	88.5014	L	1485616	374248
231	257394.9401	590782.9443	88.4578	L	1485607	374247
232	257301.2958	590761.3072	88.2414	L	1485514	374224
233	257255.7003	590750.5432	88.5107	L	1485469	374213
234	257246.8809	590747.8494	88.4371	L	1485460	374210
235	257229.7220	590742.9630	88.4413	L	1485443	374205
236	257188.7945	590725.3735	88.5784	L	1485402	374187
237	257178.6195	590720.5609	88.6116	L	1485392	374182
238	257166.1723	590714.9724	83.1363	L	1485379	374177
239	257178.6317	590720.5904	88.7025	L	1485392	374182
240	257065.9971	590969.3332	87.3449	ESQ	1485277	374430
241	257064.4189	590973.1297	87.3890	V	1485275	374434
242	257070.5035	590985.9409	87.4605	L	1485281	374447
243	257073.2524	591009.7729	86.6139	L	1485284	374471
244	257047.1576	591165.6266	86.8552	L	1485257	374626
245	257042.1558	591196.7130	86.8011	L	1485251	374657
246	257028.3146	591282.2116	87.2108	L	1485237	374743
247	257021.4354	591322.4778	87.0439	L	1485230	374783
248	257007.6058	591411.4272	86.6986	ESQ	1485215	374872
249	257091.9788	591553.9736	86.5183	ESQ	1485298	375015
250	257087.3292	591533.4222	86.3546	L	1485294	374994
251	257101.9069	591552.0916	86.3406	L	1485308	375013
252	257157.2977	591539.4070	86.2295	L	1485364	375001
253	257525.4965	591457.6914	89.7527	L	1485732	374922



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

254	257557.0223	591450.5442	89.8821	L	1485764	374915
255	257591.0056	591443.1125	90.1393	L	1485798	374908
256	257625.7380	591435.3771	90.3316	L	1485833	374901
257	257644.3210	591431.3304	90.8250	L	1485851	374897
258	257646.7754	591427.1645	90.6198	AP	1485854	374893
259	257652.7751	591425.6151	90.6011	AP	1485860	374891
260	257651.5027	591425.3426	90.3806	V	1485859	374891
261	257647.1049	591427.0823	90.4200	V	1485854	374893
262	257648.1549	591435.5885	90.6958	V	1485855	374901
263	257655.9617	591433.8709	90.7382	V	1485863	374899
264	257686.7438	591418.1949	90.9493	L	1485894	374884
265	257716.8084	591411.5067	90.9437	L	1485924	374878
266	257772.0942	591398.7633	91.4576	L	1485980	374865
267	257821.8171	591387.9725	91.7840	L	1486029	374855
268	257850.9287	591381.2682	92.1499	L	1486058	374848
269	257887.6262	591372.9560	92.3291	ESQ	1486095	374840
270	257888.9650	591364.1896	92.2675	ESQ	1486097	374832
271	257595.4402	591132.9865	89.7721	FMO4	1485805	374598
272	257526.0669	591457.3648	89.7501	L	1485733	374922
273	257513.7240	591457.6623	89.6991	ESQ	1485721	374922
274	257513.7915	591460.2870	89.5340	ESQ	1485721	374925
275	257487.6874	591458.8679	89.5607	L	1485695	374923
276	257451.7121	591459.6415	89.4486	L	1485659	374924
277	257412.8652	591460.6359	89.6420	L	1485620	374924
278	257356.1788	591455.6048	88.8151	ESQ	1485563	374919
279	257353.9407	591496.0785	89.3236	ESQ	1485561	374959
280	257305.3128	591506.6107	88.1453	L	1485512	374969
281	257260.0864	591514.1499	86.2008	L	1485467	374976
282	257240.3728	591518.2295	85.3737	L	1485447	374980
283	257193.4541	591530.4540	85.8844	L	1485400	374992
284	257205.2160	591525.4449	85.1565	L	1485412	374987
285	257050.9231	591402.0100	86.5163	L	1485258	374863
286	257064.4254	591429.6890	86.3952	L	1485272	374890
287	257046.7774	591167.1106	86.9487	L	1485256	374628
288	257057.9722	591102.6049	87.1558	L	1485268	374563
289	257058.3420	590893.9599	87.6520	L	1485270	374355
290	257047.6498	590891.7541	90.1242	ESQ	1485259	374352



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

291	257077.5014	590881.1056	86.4070	R	1485289	374342
292	257084.9201	590854.0881	86.5676	R	1485297	374315
293	257093.1290	590813.5339	85.6108	R	1485305	374275
294	257083.4258	590801.0038	85.7867	R	1485296	374262
295	257088.7118	590803.8126	85.6986	R	1485301	374265
296	257076.9892	590770.5617	86.6161	R	1485290	374232
297	257084.8596	590762.5262	86.5458	R	1485298	374224
298	257109.4184	590755.6438	88.0358	R	1485322	374217
299	257132.2258	590741.2226	86.7316	R	1485345	374203
300	257155.1071	590724.1966	86.2995	R	1485368	374186
301	257162.8157	590717.4478	88.4541	ESQ	1485376	374179
302	257202.5340	591554.0034	85.2576	L	1485409	375016
303	257203.0379	591555.9616	84.6386	L	1485409	375018
304	257206.2260	591562.9225	83.7319	L	1485412	375025
305	257208.8827	591574.3980	83.1381	L	1485415	375036
306	257209.5953	591581.9579	82.9765	L	1485416	375044
307	257209.9292	591590.9190	83.6908	L	1485416	375053
308	257210.0519	591600.8249	82.0927	L	1485416	375063
309	257210.7483	591610.3318	83.6035	L	1485417	375072
310	257210.3841	591618.4122	83.4558	L	1485416	375080
311	257208.3073	591625.3874	84.1219	L	1485414	375087
312	257205.9035	591632.8442	83.4458	L	1485412	375095
313	257203.5605	591641.0975	83.6352	L	1485409	375103
314	257199.2863	591644.3297	83.6852	L	1485405	375106
315	257170.6986	591682.5182	82.1457	L	1485376	375144
316	257182.3737	591681.2213	82.6280	L	1485388	375143
317	257179.9446	591682.1660	82.1440	L	1485385	375144
318	257176.5106	591670.3598	79.1817	N	1485382	375132
319	257204.4301	591682.0098	83.6877	L	1485410	375144
320	257211.6656	591675.5666	83.9927	N	1485417	375137
321	257236.8271	591690.3222	84.1122	L	1485442	375152
322	257271.7028	591694.3119	84.3429	N	1485477	375157
323	257220.7866	591559.4269	83.6088	N	1485427	375021
324	257221.4940	591550.8062	85.7377	L	1485428	375013
325	257271.5547	591538.2394	86.5105	L	1485478	375001
326	257297.8970	591531.8831	87.5425	L	1485504	374995
327	257323.6625	591525.9262	88.3708	L	1485530	374989



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

328	257347.2279	591520.8225	89.2864	L	1485554	374984
329	257351.2254	591522.6303	89.3057	L	1485558	374986
330	257351.8102	591527.3888	89.0140	L	1485558	374990
331	257350.4800	591543.8246	88.4512	L	1485557	375007
332	257348.3597	591569.5741	87.3554	L	1485554	375033
333	257344.2225	591612.3762	86.0559	L	1485550	375075
334	257340.5941	591637.6582	85.3240	L	1485546	375101
335	257337.3757	591659.5108	84.3140	L	1485543	375122
336	257334.8417	591684.3136	80.6221	L	1485540	375147
337	257334.7968	591685.4575	80.0966	L	1485540	375148
338	257103.8242	590859.6434	87.9729	GCP23	1485316	374321
339	257105.9436	590770.1671	88.2140	GCP24	1485319	374231
340	257163.4749	590779.2460	88.1855	GCP25	1485376	374241
341	257344.9578	590851.7036	88.2800	GCP09	1485557	374315
342	257125.4396	591006.4610	87.1916	GCP06	1485336	374468
343	257301.2445	591160.9003	87.3765	GCP07	1485511	374624
344	257069.5938	591333.3014	86.1996	GCP04	1485278	374794
345	256986.4217	591519.5117	86.6147	GCP03	1485193	374980
346	257145.7062	591559.3248	86.8122	GCP02	1485352	375021
347	257168.2273	591709.4841	74.8228	GCP01	1485373	375171
348	257373.6807	591508.1776	88.4260	GCP05	1485580	374971
349	257635.2548	591449.9429	90.4189	GCP14	1485842	374915
350	257482.9155	591473.5412	89.2613	GCP13	1485690	374938
351	257612.8772	591296.9674	93.4114	GCP15	1485821	374762
352	257494.6474	591324.6546	91.5938	GCP12	1485703	374789
353	257515.7435	590880.6134	88.1990	GCP10	1485727	374345
354	257495.4062	591008.4893	87.8917	GCP11	1485706	374473
355	257895.0632	590899.0562	91.6265	GCP17	1486107	374367
356	258109.1310	590786.4573	95.1904	GCP20	1486321	374256
357	258151.9826	590973.2911	95.2072	GCP21	1486363	374443
358	258378.9103	591034.2217	96.5226	GCP22	1486589	374506
359	258155.4896	591323.5762	94.5505	GCP26	1486363	374793
360	257959.3611	591366.6891	93.1012	GCP27	1486167	374835
361	257868.8461	591313.4849	93.7243	GCP16	1486077	374781
362	257948.7709	591158.6730	95.9691	GCP18	1486158	374627



COMPARACIÓN ENTRE COORDENADAS UTM DE PUNTOS REPROYECTADOS A
LAMBERT EN ARCMAP Y COORDENADAS LAMBERT DE PUNTOS
RECOLECTADOS CON RTK – PUNTOS DE APOYO TERRESTRE ÚNICAMENTE

PUNTO	REPROYECCIÓN A LAMBERT		COORDENADAS ORIGINALES		ERROR DE REPROYECCIÓN	
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
FMO1	591148.6551	258154.8771	591142.8368	258047.7569	5.8183	107.1202
FMO2	591179.6763	258275.1514	591173.9287	258167.8584	5.7476	107.2930
FMO4	591138.3594	257702.7175	591132.9865	257595.4402	5.3729	107.2773
FMO5	590926.2986	257825.9997	590920.9495	257719.0069	5.3491	106.9928
FMO6	590879.0772	257973.6370	590873.1952	257865.9544	5.8820	107.6826
GCP01	591714.9996	257275.3725	591709.4841	257168.2273	5.5155	107.1452
GCP02	591565.1460	257253.1405	591559.3248	257145.7062	5.8212	107.4343
GCP03	591525.4425	257093.7883	591519.5117	256986.4217	5.9308	107.3666
GCP04	591338.7138	257177.2720	591333.3014	257069.5938	5.4124	107.6782
GCP05	591513.2680	257480.7535	591508.1776	257373.6807	5.0904	107.0728
GCP06	591012.1827	257232.6051	591006.4610	257125.4396	5.7217	107.1655
GCP07	591166.7744	257408.9015	591160.9003	257301.2445	5.8741	107.6570
GCP09	590857.3448	257452.3726	590851.7036	257344.9578	5.6412	107.4148
GCP10	590885.9560	257622.6353	590880.6134	257515.7435	5.3426	106.8918
GCP11	591014.1499	257602.6828	591008.4893	257495.4062	5.6606	107.2766
GCP12	591330.2283	257602.2735	591324.6546	257494.6474	5.5737	107.6261
GCP13	591479.3603	257590.4940	591473.5412	257482.9155	5.8191	107.5785
GCP14	591455.1100	257742.3206	591449.9429	257635.2548	5.1671	107.0658
GCP15	591302.2561	257720.0639	591296.9674	257612.8772	5.2887	107.1867
GCP16	591319.1600	257976.2452	591313.4849	257868.8461	5.6751	107.3991
GCP17	590904.8438	258002.8531	590899.0562	257895.0632	5.7876	107.7899
GCP18	591164.4695	258055.9903	591158.6730	257948.7709	5.7965	107.2194
GCP20	590792.0701	258215.9638	590786.4573	258109.1310	5.6128	106.8328
GCP21	590978.7571	258259.5015	590973.2911	258151.9826	5.4660	107.5189



APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS
MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

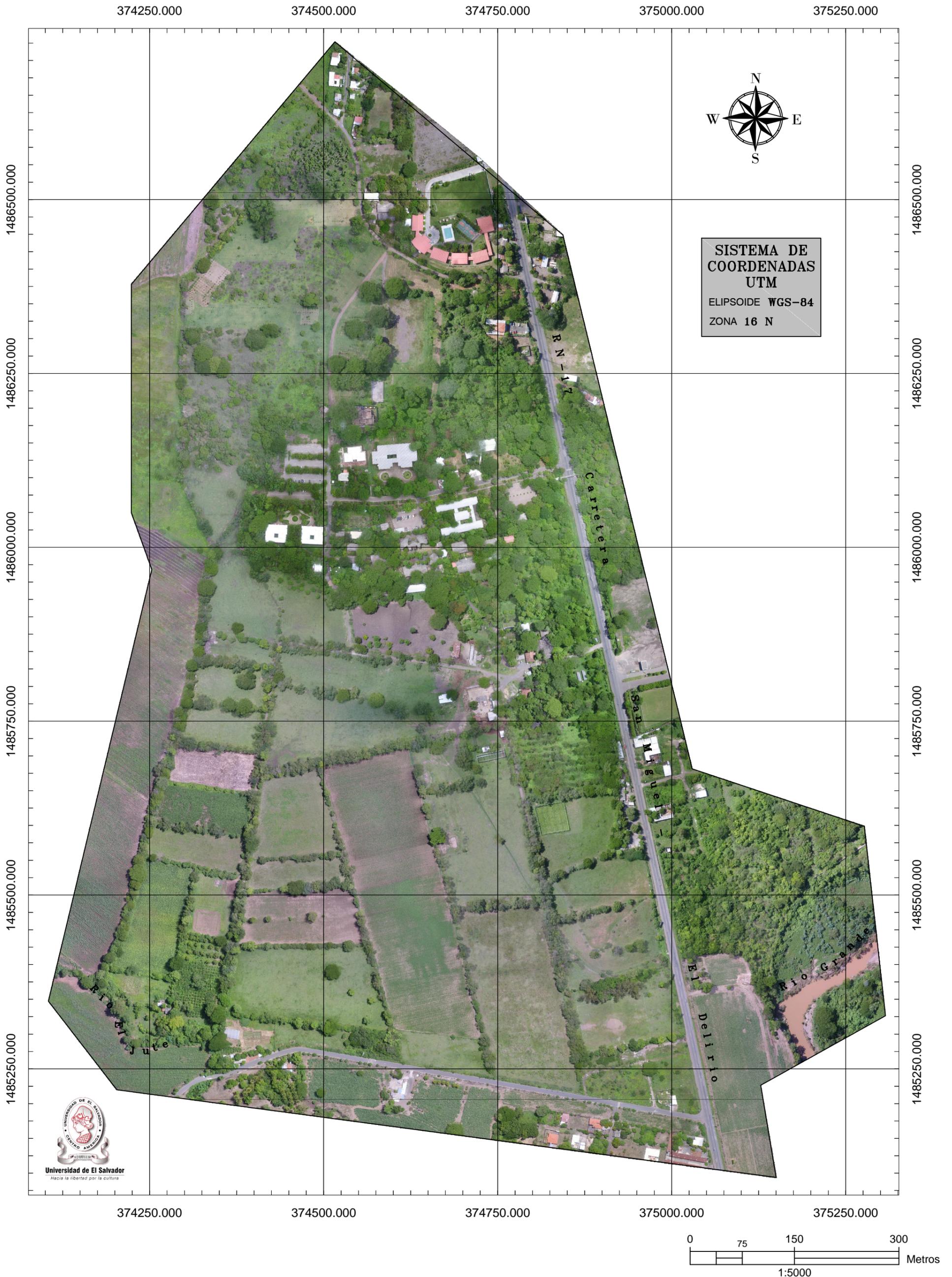
GCP22	591039.9142	258486.0404	591034.2217	258378.9103	5.6925	107.1301
GCP25	590784.8162	257270.7481	590779.2460	257163.4749	5.5702	107.2732
GCP26	591328.8165	258262.3720	591323.5762	258155.4896	5.2403	106.8824
GCP27	591372.4311	258066.6970	591366.6891	257959.3611	5.7420	107.3359
GSP23	590865.3217	257211.3980	590859.6434	257103.8242	5.6783	107.5738
GSP24	590775.2818	257213.6605	590770.1671	257105.9436	5.1147	107.7169
PROMEDIO ERROR					5.5802	107.3199



ANEXO E.

PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS

ORTOMOSAICO DE LA FALCULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL



CURVAS DE NIVEL (INTERVALO 1 METRO)

374250.000

374500.000

374750.000

375000.000

375250.000

1486500.000

1486250.000

1486000.000

1485750.000

1485500.000

1485250.000

1486500.000

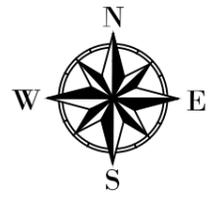
1486250.000

1486000.000

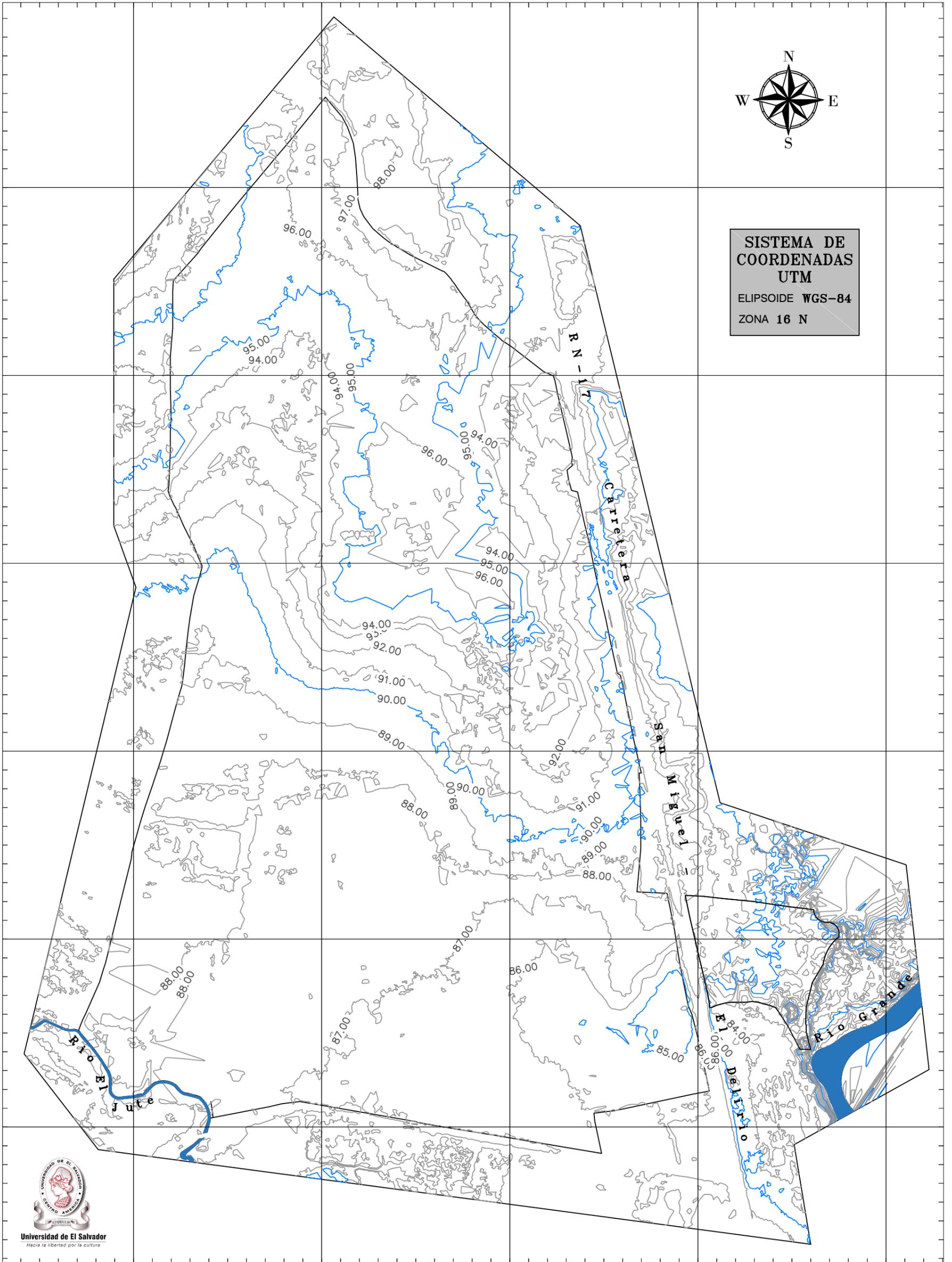
1485750.000

1485500.000

1485250.000



SISTEMA DE
COORDENADAS
UTM
ELIPSOIDE WGS-84
ZONA 16 N



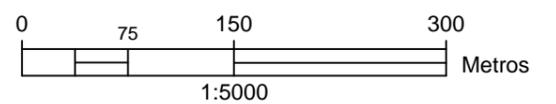
374250.000

374500.000

374750.000

375000.000

375250.000





PROYECCIÓN DE LA VECTORIZACIÓN EN EL ORTOMOSAICO TOPOGRAFÍA DE LA ZONA

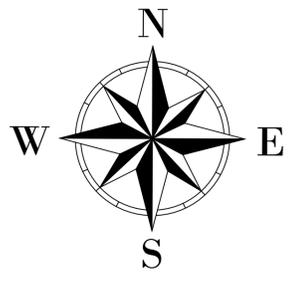
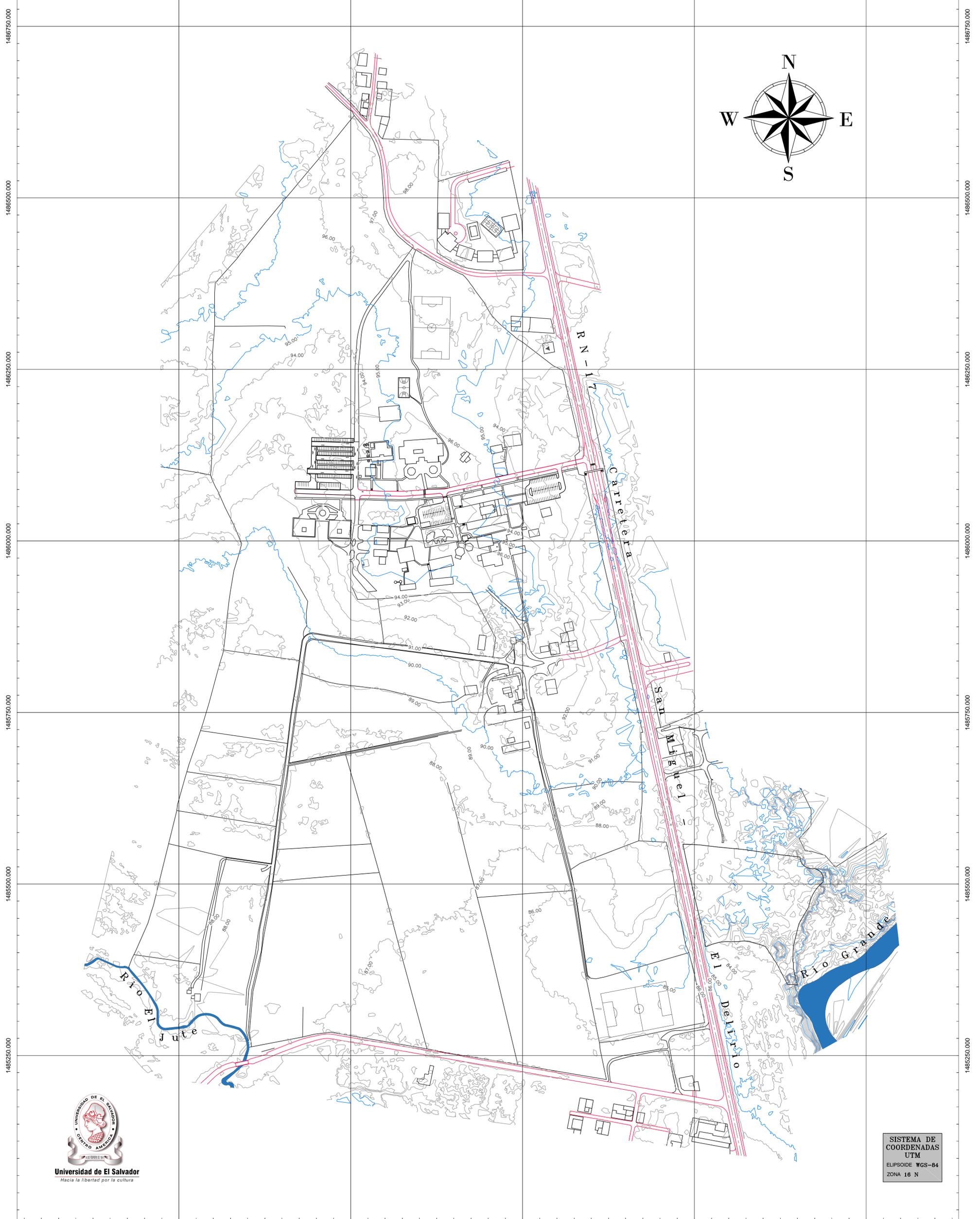


SISTEMA DE
COORDENADAS
UTM
ELIPSOIDE WGS-84
ZONA 16 N

0 25 50 100
Metros
1:1000

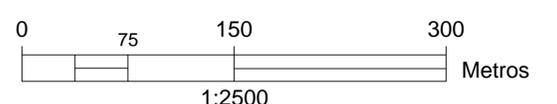
TOPOGRAFÍA DE LA FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

374250.000 374500.000 374750.000 375000.000 375250.000



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura

SISTEMA DE COORDENADAS UTM
ELIPSOIDE WGS-84
ZONA 16 N



374250.000 374500.000 374750.000 375000.000 375250.000



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura

DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO DE LA FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

374400.000

374700.000

375000.000

375300.000

1486500.000

1486200.000

1485900.000

1485600.000

1485300.000

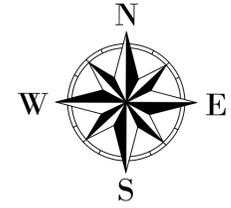
1486500.000

1486200.000

1485900.000

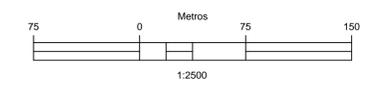
1485600.000

1485300.000



LEYENDA	
ELEMENTO	SIMBOLO
COBERTURA VEGETAL DENSA	
ESPACIOS DEPORTIVOS	
CANCHA DE FUTBOL	
CANCHA DE BALONCESTO	
CULTIVOS	
GANADO, PASTEO	
EDIFICIOS	
ADMINISTRATIVOS	
LIBRERIAS	
AULAS	
CAFETINES	
CONSTRUCCIONES FORANEAS	
PARQUEOS	
DOCENTES	
PUBLICOS	
SIN USO DEFINIDO	
RIOS	
CARRETERA, CALLES Y VIAS	
PUENTES, BAHÍAS	
PERIMETRO	
DIVISIONES INTERNAS	

NOTA: VALORACIONES REALIZADAS A
FINALES DEL 2016



SISTEMA DE
COORDENADAS
UTM
ELIPSOIDE WGS-84
ZONA 16 N

374400.000

374700.000

375000.000

375300.000