

Índice

1. Introducción a la Fotogrametría y principales vuelos fotogramétricos.....	10
1.1. ¿Qué es la Fotogrametría?	10
1.2. Evolución de la Fotogrametría hacia la era digital y el papel de los drones	11
1.3. Aplicaciones de los drones en la Fotogrametría	14
1.3.1. Levantamientos topográficos y Cartografía	14
1.3.2. Modelado 3D de infraestructuras y edificaciones	14
1.3.3. Monitoreo de erosión y movimientos de tierra	14
1.3.4. Inspección y mantenimiento de infraestructuras	15
1.3.5. Análisis y gestión de recursos naturales.....	15
1.3.6. Modelos digitales de elevación y simulación de inundaciones.....	15
1.3.7. Documentación y conservación del patrimonio cultural	15
1.3.8. Control y planificación de proyectos de construcción	16
1.3.9. Agricultura de precisión	16
1.4. Principales proyectos fotogramétricos sobre España.....	16
1.4.1. Vuelo Cuenca del Segura (1929-1930)	16
1.4.2. Vuelo Americano A (1945-1946)	17
1.4.3. Vuelo Americano B (1956-1957)	18
1.4.4. Vuelo Americano C (1967-1968)	19
1.4.5. Vuelo de Referencias (1967-1968)	20
1.4.6. Vuelo Interministerial (1973-1986).....	21
1.4.7. Vuelo Nacional (1980-1986).....	21
1.4.8. Vuelo de Costas (1989-1991)	22
1.4.9. Vuelo Quincenal (1998-2003).....	23
1.4.10. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)	23
1.4.11. Plan Nacional de Teledetección (PNT) (1971-2023).....	27
1.4.12. Proyecto PNOA LiDAR (2009-2025).....	29
1.5. Diferencias conceptuales entre Fotogrametría y Teledetección	31
1.6. Autoevaluación	33
1.7. Soluciones a la autoevaluación	36
2. Principios básicos de la Fotogrametría	38
2.1. Principio de captura de imágenes desde diferentes puntos de vista	38
2.2. Geometría de la fotografía y la cámara.....	40

2.3.	Escala fotogramétrica.....	41
2.4.	Desplazamiento en la imagen debido al relieve	43
2.5.	Relación entre coordenadas de imagen y coordenadas de terreno	46
2.6.	Principio de estereoscopía: paralaje estereoscópica	47
2.7.	Diferencia entre paralaje horizontal y paralaje vertical.....	50
2.8.	Cálculos empleando de la paralaje horizontal	52
2.9.	Orientación interior y exterior	56
2.10.	Condición de colinealidad	58
2.11.	Condición de coplaneidad o coplanareidad.....	60
2.12.	Principio de superposición y cobertura de imágenes (solapes).....	61
2.13.	Generación de modelos digitales de elevación (MDE)	62
2.13.1.	Captura de imágenes aéreas	62
2.13.2.	Corrección y georreferenciación	62
2.13.3.	Generación de la nube de puntos 3D.....	62
2.13.4.	Creación del modelo digital de elevación	63
2.13.5.	Interpolación y suavizado.....	63
2.13.6.	Exportación y uso del MDE.....	63
2.14.	Proceso de generación de la ortofotografía	63
2.14.1.	Puntos, rayos y planos epipolares.....	64
2.15.	Corrección de errores y calidad de datos.....	65
2.15.1.	Tipos de errores en Fotogrametría	65
2.15.2.	Métodos de corrección de errores.....	66
2.15.3.	Evaluación y medición de la calidad de los datos	67
2.15.4.	Herramientas para corrección y evaluación.....	67
2.16.	Autoevaluación	68
2.17.	Soluciones de la autoevaluación	74
3.	Geometría proyectiva y calibración de la cámara.....	78
3.1.	Introducción	78
3.2.	Geometría Proyectiva en Fotogrametría	78
3.2.1.	Concepto de Geometría Proyectiva	78
3.2.2.	Transformaciones proyectivas	79
3.2.3.	Matriz de proyección y matriz de la cámara	81
3.3.	Óptica aplicada en Fotogrametría.....	82
3.3.1.	Principios ópticos de la formación de imágenes.....	82
3.3.2.	Modelado de la cámara.....	84

3.3.3.	Calibración de una cámara	85
3.3.3.1.	Parámetros intrínsecos (propios de la cámara)	85
3.3.3.2.	Parámetros extrínsecos (posición de la cámara en el espacio)	85
3.3.3.3.	Métodos de calibración	86
3.3.4.	Sensores y digitalización de imágenes	88
3.4.	Autoevaluación	90
3.5.	Soluciones de la autoevaluación	96
4.	Sensores	100
4.1.	Introducción a los sensores en drones	100
4.2.	Resolución de los sensores	100
4.2.1.	Resolución espacial	100
4.2.2.	Resolución espectral	104
4.2.3.	Resolución radiométrica	108
4.2.4.	Resolución temporal	110
4.3.	Clasificación de los sensores	110
4.3.1.	Sensores pasivos	110
4.3.1.1.	Cámaras RGB (ópticas convencionales)	111
4.3.1.2.	Cámaras multiespectrales	111
4.3.1.3.	Cámaras hiperespectrales	112
4.3.1.4.	Cámaras Térmicas	112
4.3.2	Sensores activos	113
4.3.2.1.	LiDAR	114
4.3.2.2.	Ecosonda	114
4.4.	Índices de Reflectancia	116
4.5.	Autoevaluación	118
4.6.	Soluciones a la autoevaluación	123
5.	Drones para Fotogrametría	126
5.1.	Origen de los drones	126
5.2.	Tipos de drones utilizados en Fotogrametría	128
5.2.1.	Drones aéreos (UAV)	128
5.2.1.1.	Drones de ala rotatoria (multirrotores)	128
5.2.1.2.	Drones de ala fija	130
5.2.1.3.	Comparativa entre drones multirrotores y de ala fija	131
5.2.2.	Drones Batimétricos o acuáticos (USV)	132

5.3.	Clasificación por nivel de automatización.....	134
5.3.1.	Drones manuales.....	134
5.3.2.	Drones semiautónomos	134
5.3.3.	Drones autónomos.....	135
5.4.	Sistemas de navegación y posicionamiento GPS (RTK).....	135
5.5.	IMU (Inertial Measurement Unit)	137
5.6.	Software y herramientas de control de vuelo para drones	139
5.6.1.	Software de control de vuelo (autopilotos)	139
5.6.2.	Software de planificación y control de misión	139
5.6.3.	Software para Procesamiento de Datos de Vuelo	141
5.7.	Normativas y regulaciones para el uso de drones en Fotogrametría	141
5.7.1.	Tipo de Operación	142
5.7.2.	Categorías de operación.....	142
5.7.3.	Requisitos para Operadores	144
5.7.4.	Limitaciones Operativas	144
5.7.5.	Consideraciones Específicas para Fotogrametría.....	145
5.8.	Autoevaluación	146
5.9.	Soluciones de la autoevaluación	149
6.	Planificación de vuelos fotogramétricos con drones	151
6.1.	Introducción	151
6.2.	Beneficios frente a métodos tradicionales	151
6.2.1.	Mayor eficiencia y reducción de costos	152
6.2.2.	Accesibilidad a zonas de difícil acceso	152
6.2.3.	Mayor precisión y resolución en los datos.....	152
6.2.4.	Flexibilidad y rapidez en la captura de datos	152
6.2.5.	Seguridad mejorada en operaciones de levantamiento	152
6.2.6.	Integración con nuevas tecnologías.....	152
6.2.7.	Impacto ambiental reducido	153
6.3.	Requisitos técnicos y normativos.....	153
6.3.1.	Requisitos técnicos.....	153
6.3.1.1.	Drones adecuados para Fotogrametría	153
6.3.1.2.	Cámara y sensores	153
6.3.1.3.	Software de planificación y procesamiento.....	154
6.3.1.4.	Precisión y georreferenciación	154

6.3.2.	Requisitos normativos.....	154
6.3.2.1.	Regulaciones sobre el uso de drones.....	154
6.3.2.2.	Privacidad y protección de datos.....	155
6.3.2.3.	Permisos y autorizaciones especiales	155
6.4.	Factores a considerar en la planificación de un vuelo	155
6.4.1.	Tipo de sensor	156
6.4.2.	Resolución de la cámara.....	157
6.4.3.	Resolución óptica y tamaño del sensor.....	157
6.4.4.	Selección del sensor adecuado según el proyecto.....	157
6.5.	Altitud y escala del proyecto	158
6.5.1.	Relación entre altitud y resolución espacial (GSD)	158
6.5.2.	Elección de la altitud según el proyecto.....	159
6.5.3.	Impacto de la altitud en la calidad y precisión	159
6.5.4.	Consideraciones operativas y normativas sobre la altitud	160
6.5.4.1.	Límites de altitud según la normativa.....	160
6.5.4.2.	Corrección de altitud en terrenos con desniveles	160
6.5.4.3.	Ajuste de altitud según obstáculos	161
6.6.	Superposición longitudinal y transversal	161
6.6.1.	Importancia de la superposición en Fotogrametría.....	161
6.6.2.	Parámetros óptimos de superposición	161
6.6.3.	Cómo configurar la superposición en un vuelo fotogramétrico	162
6.7.	Condiciones meteorológicas y horarios recomendados	163
6.7.1.	Factores meteorológicos claves en la planificación del vuelo	163
6.7.1.1.	Viento.....	163
6.7.1.2.	Nubosidad y condiciones de iluminación.....	163
6.7.1.3.	Precipitación y humedad	163
6.7.1.4.	Temperatura	164
6.7.2.	Horarios recomendados para la captura de imágenes	164
6.7.3.	Uso de herramientas meteorológicas para la planificación.....	164
6.8.	Software y herramientas para la planificación de vuelos con drones	165
6.8.1.	Software de planificación y control de vuelo	165
6.8.2.	Software para análisis y procesamiento de datos fotogramétricos.....	166
6.8.3.	Cómo elegir el mejor software según el tipo de proyecto.....	166
6.9.	Ejemplo Práctico: Planificación de un Vuelo Fotogramétrico con Dron	167
6.9.1.	Planteamiento del problema.....	167
6.9.2.	Solución del problema.....	167

6.10. Autoevaluación	171
6.11. Soluciones a la autoevaluación	175
7. Puntos de apoyo y control del vuelo fotogramétrico.....	177
7.1. Introducción	177
7.2. Definición de puntos de apoyo y puntos de control.....	177
7.2.1. Puntos de apoyo terrestre (Ground Control Points - GCPs).....	177
7.2.2. Puntos de control	178
7.2.3. Puntos de control aerotransportado (ABGPS y IMU).....	178
7.2.4. Puntos de apoyo terrestre vs puntos de apoyo aerotransportado.....	179
7.3. Planificación y distribución de los puntos de apoyo	179
7.3.1. Criterios para la selección de puntos	179
7.3.2. Densidad.....	180
7.3.3. Distribución óptima.....	181
7.4. Errores comunes en la colocación de puntos de apoyo.....	183
7.4.1. Mala distribución de los puntos de apoyo	183
7.4.2. Ubicación en lugares inestables o poco definidos	184
7.4.3. Falta de visibilidad en las imágenes aéreas.....	184
7.4.4. Uso de marcadores inadecuados	185
7.4.5. Errores en la medición de las coordenadas	185
7.4.6. Cantidad insuficiente de puntos de apoyo.....	185
7.4.7. Falta de registro adecuado de los puntos	186
7.5. Métodos de Adquisición y Posicionamiento	186
7.5.1. Uso de GPS diferencial (DGPS y RTK)	186
7.5.1.1. Funcionamiento del DGPS	186
7.5.2. Funcionamiento del RTK.....	187
7.5.3. Precisión y tolerancias en el levantamiento de puntos	187
7.6. Autoevaluación	190
7.7. Soluciones a la autoevaluación	193
8. Procesado de imágenes capturadas desde drones	195
8.1. Fundamentos	195
8.2. Alineación de imágenes mediante Structure from Motion (SfM).....	197
8.2.1. Detección de puntos característicos	197
8.2.2. Coincidencia de puntos entre imágenes	197
8.2.3. Estimación de la posición de la cámara y matrices de proyección	198
8.2.4. Triangulación de puntos 3D	198

8.2.5.	Refinamiento mediante Bundle Adjustment	198
8.3.	Densificación de la nube de puntos en Fotogrametría 3D.....	199
8.3.1.	Búsqueda de correspondencias densas entre imágenes	199
8.3.2.	Estimación de la profundidad y generación de nuevos puntos	200
8.3.3.	Refinamiento y eliminación de errores	200
8.4.	Malla 3D: construcción de una superficie desde una nube de puntos	201
8.4.1.	Generación de la malla mediante triangulación	201
8.4.2.	Suavizado y refinamiento de la malla	202
8.4.3.	Texturización y renderizado de la malla 3D	202
8.5.	Exportación y análisis	202
8.5.1.	Formatos de exportación	202
8.5.2.	Análisis.....	203
8.5.3.	Generación de curvas de nivel y mediciones volumétricas	204
8.6.	Autoevaluación	205
8.7.	Soluciones a la autoevaluación	208
9.	Glosario de Fotogrametría aplicada a drones.....	210
10.	Bibliografía.....	221