

ELIA QUIRÓS ROSADO

Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA



Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

Elia Quirós Rosado

Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD  DE EXTREMADURA



Cáceres 2014



© La autora

© Universidad de Extremadura para esta 1ª edición

Edita:

Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones
C/ Caldereros, 2 - Planta 2ª. 10071 Cáceres (España)
Tel. 927 257 041 ; Fax 927 257 046
E-mail: publicac@unex.es
<http://www.unex.es/publicaciones>

I.S.B.N. de méritos: 978-84-697-1317-4.

Maquetación: Control P. 927 233 223. estudio@control-p.eu.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

ÍNDICE

PRÓLOGO	9
CONCEPTOS DE GEODESIA Y CARTOGRAFÍA.....	10
CAPÍTULO 1. GEODESIA	11
1. Concepto de Geodesia	11
2. Ramas de la Geodesia	12
3. División de la Geodesia	13
4. Objetivos de la Geodesia	13
5. Geodesia Física	16
6. Geodesia Matemática	17
7. Relación entre el geoide y el elipsoide	20
CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE REFERENCIA	23
1. Sistemas de Referencia	23
2. Marcos de Referencia	24
3. Sistemas de Referencia Terrestres	25
3.1. Sistema de Referencia European Datum 1950 (ED50).....	25
3.2. Sistema de Referencia European Terrestrial System (ETRS89)	27
3.3. Sistema de Referencia World Geodetic System 1984 (WGS84).....	28
4. Transformación entre Sistemas de Referencia	29
4.1. Transformación WGS84-ED50	30
4.2. Transformación ED50-ETRS89	32
<i>a. Transformación de Puntos aislados</i>	<i>33</i>
<i>b. Transformación de Cartografía Vectorial</i>	<i>33</i>
<i>c. Transformación de Ortofotografías</i>	<i>35</i>
CAPÍTULO 3. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS. UTM	36
1. Proyección Cartográfica	36
2. Tipos de Proyección	36

3. Proyección UTM.....	38
3.1. Ventajas de la proyección UTM.....	39
3.2. Husos UTM.....	40
3.3. Coordenadas UTM.....	41
3.4. Convergencia de cuadrícula.....	42
3.5. Duplicidad de coordenadas entre extremos de dos husos consecutivos.....	44
FOTOGRAMETRÍA DIGITAL APLICADA.....	45
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA.	
VISIÓN ESTEREOSCÓPICA.....	46
1. Fotogrametría.....	46
2. Elementos fundamentales en fotogrametría.....	47
3. Principio básico de la fotogrametría.....	49
4. Visión Estereoscópica. Paralaje.....	50
4.1. Procedimientos de visión estereoscópica artificial.....	51
4.2. Paralaje estereoscópico.....	53
5. Clasificación de la Fotogrametría.....	55
6. Ventajas y desventajas de la Fotogrametría respecto a la Topografía Clásica.....	57
7. Aplicaciones de la fotogrametría en Ingeniería Civil.....	57
CAPÍTULO 2. IMAGEN FOTOGRÁFICA DIGITAL.....	58
1. Antecedentes.....	58
2. La imagen digital.....	58
2.1. Características de la imagen digital.....	59
<i>a. Resolución</i>	59
<i>b. Dimensión</i>	60
<i>c. Profundidad de color</i>	60
2.2. Tamaño del archivo.....	61
3. Compresión de imágenes.....	61
3.1. Transformación discreta de cosenos (TDC).....	63
3.2. Lempel Ziv Welch (LZW).....	64
3.3. Transformación discreta wavelet (TDW).....	64
4. Pirámide de imágenes.....	65
5. Formatos gráficos de las imágenes fotogramétricas digitales.....	66

6. Tratamiento digital de imágenes	66
6.1. Histograma de una imagen	67
6.2. Técnicas de realce de la imagen	68
6.3. Filtros	69
<i>a. Filtros suavizantes y de paso bajo</i>	69
<i>b. Filtros realzantes y de paso alto</i>	69
6.4. Tipos de realces permitidos en fotogrametría	70
 CAPÍTULO 3. CÁMARAS FOTOGRAMÉTRICAS	72
1. Introducción	72
2. Cámaras fotogramétricas analógicas	72
2.1. Componentes de las cámaras analógicas	72
3. Cámaras digitales	75
3.1. Cámaras lineales	75
3.1. Cámaras matriciales	77
4. Comparación de ambas cámaras	78
<i>Lineales:</i>	79
<i>Matriciales:</i>	79
 CAPÍTULO 4. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO	80
1. Antecedentes	80
2. Introducción	80
3. Proceso fotogramétrico digital	80
3.1. Orientación interna	81
<i>a. Orientación interna con cámaras analógicas</i>	84
<i>b. Orientación interna con cámaras digitales</i>	86
3.2. Orientación relativa	87
3.3. Orientación absoluta	90
<i>Puntos de apoyo</i>	90
3.4. Orientación exterior (relativa y absoluta en un solo paso)	93
3.5. Aerotriangulación	94
<i>Distribución y número de puntos de apoyo</i>	95
4. Errores admisibles en el proceso fotogramétrico digital	96
5. Control de calidad posicional del proceso fotogramétrico digital	98
<i>Tolerancia para la desviación estándar Planimétrica:</i>	98
<i>Tolerancia para la desviación estándar altimétrica:</i>	99
6. Restitución fotogramétrica	99

CAPÍTULO 5. PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS	101
1. Introducción.....	101
2. Planos vectoriales obtenidos de la restitución.....	101
2.1. Calidad de la restitución.....	103
3. Modelos digitales de Elevaciones.....	104
3.1. Estructura de datos de los MDE.....	105
4. Ortofotografías	110
4.1. Rectificación de imágenes.....	110
4.2. Ortoproyección.....	110
5. Tipos de ortofotografías	112
6. Mosaicado de las ortofotografías	115
7. Calidad de la ortofotografía.....	117
CAPÍTULO 6. PROYECTO DE VUELO. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES....	119
1. Introducción.....	119
2. Pliego Fotogramétrico.....	119
2.1. Condiciones generales	119
2.2. Condiciones para la realización del vuelo.....	120
2.3. Condiciones para la realización del apoyo.....	121
2.4. Condiciones para la realización de la restitución y cartografía	121
2.5. Condiciones para la realización del mde y ortofotografías	122
3. Planificación del vuelo	123
3.1. Datos de partida.....	124
3.2. Cálculo de las características del vuelo.....	124
CAPÍTULO 7. FUTURO DE LA FOTOGRAMETRÍA; LIDAR Y FOTOGRAMETRÍA POR SATÉLITE.....	129
1. LiDAR.....	129
1.1. Ventajas y desventajas del LiDAR	131
1.2. Aplicaciones de la tecnología LiDAR.....	132
2. Fotogrametría por satélite.....	134
2.1. Tipos de geometría estereoscópica.....	134
2.2. Satélites estereoscópicos.....	136
BIBLIOGRAFÍA	137

PRÓLOGO

Los ingenieros civiles, a lo largo de su carrera profesional, han de manejar información cartográfica, obtenida en gran parte por técnicas fotogramétricas. En esta obra, se trata de hacer una introducción práctica a la técnica de la fotogrametría aérea digital, con el fin de dar a conocer los medios con los que se ha obtenido la cartografía sobre la que proyectan sus obras.

No es intención de este título la de ahondar en la formulación matemática, puesto que, a mi juicio, aporta poco al ingeniero civil y a su vez existen tratados muy completos destinados a lectores más especializados en la materia.

Este breve texto comienza esbozando algunos conceptos básicos de cartografía, haciendo especial hincapié en los sistemas de referencia, que en la actualidad están en proceso de cambio y que conviene que el ingeniero civil conozca antes de comenzar a trabajar con datos cartográficos.

La parte fundamental del texto se centra en la fotogrametría digital e insistiendo de nuevo en su sencillez, trata de explicar, desde la experiencia profesional, todo el proceso de trabajo, desde el momento en que se encarga un vuelo fotogramétrico, hasta que la cartografía digital llega a manos de un ingeniero para trabajar sobre ella, con sus exactitudes y precisiones.

Por todo ello, se pretende que este trabajo sirva de ayuda a los profesionales de la ingeniería civil, para valorar y saber manejar correctamente los datos cartográficos que en mayor o menor medida serán la base de su trabajo.

Elia Quirós Rosado

CONCEPTOS DE
GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

CAPÍTULO I

GEODESIA

1. CONCEPTO DE GEODESIA

La geodesia es la ciencia que tiene como objetivo el estudio y determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, su campo gravitatorio y sus variaciones temporales.

La geodesia la podemos dividir en dos grandes ramas:

La geodesia superior o geodesia:

Es la parte de la geodesia que trata de determinar y representar la Tierra en términos globales.

La geodesia práctica o topografía:

Es la parte de la geodesia que estudia y representa porciones menores de la Tierra donde la superficie puede ser considerada plana.

Si nos basamos en el estudio de la tierra, según un concepto matemático, la geodesia estudia tanto la forma como las dimensiones de la tierra, sin embargo, también se estudian, según la definición del concepto geodesia, el campo gravitatorio y sus variaciones temporales. Estos dos últimos conceptos entrarían dentro del campo de la física.

Siguiendo este último razonamiento podemos dividir la geodesia en dos tipos:

- *Geodesia física* (Campo gravitatorio): Estudia el campo gravitatorio de la Tierra por hipótesis de modelos de distribución de masas dentro de la Tierra o midiendo la gravedad en la superficie.

Define el Geoide (*figura 1*) como figura que precisa la forma de la tierra.

- *Geodesia Matemática* (Figura de la tierra): 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 válido para toda la Tierra.

Define el Elipsoide (*figura 2*) como figura que define la forma de la tierra.

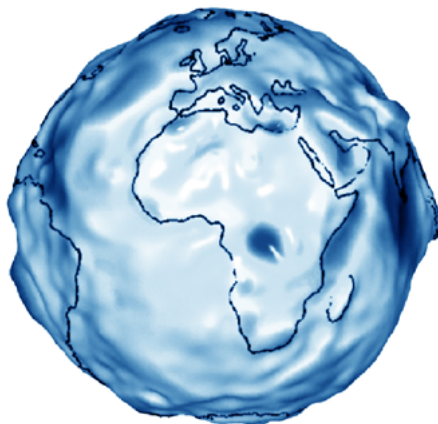


Figura 1. Geoide: Superficie de referencia Altimétrica. (Fuente: European Spatial Agency)



Figura 2. Elipsoide: Superficie de referencia planimétrica.

2. RAMAS DE LA GEODESIA

Existen varias ramas dentro de la Geodesia.

- **ASTRONOMÍA GEODÉSICA:** Determinación de coordenadas geográficas de puntos y acimutes de ciertas direcciones por métodos astronómicos, independientes de cualquier hipótesis de la forma de la Tierra.
- **GEODESIA GEOMÉTRICA:** Los datos de observación están constituidos por las medidas de ángulos y distancias en la superficie terrestre. El conocimiento de la geometría del elipsoide de revolución es fundamental.

- **GEODESIA DINÁMICA:** Dedicada a la determinación de las variaciones en las posiciones de las coordenadas de puntos, producidas de una forma temporal, secular, periódica o de naturaleza brusca, que pueden ocurrir globalmente, localmente o regionalmente.

3. DIVISIÓN DE LA GEODESIA

Atendiendo a la extensión del estudio geodésico, la geodesia se puede dividir en tres categorías:

- **GEODESIA GLOBAL:** Es practicada internacionalmente a nivel global y coordinada para toda la Tierra.
- **GEODESIA REGIONAL:** Es practicada por cada país, independientemente del resto, con el fin de resolver los problemas planteados por la cartografía y la geografía perteneciente a la nación.
- **GEODESIA TOPOGRÁFICA:** Trata de precisar detalles de una cierta superficie de pequeñas dimensiones, considerando esta superficie plana o esférica, según sus dimensiones.

4. OBJETIVOS DE LA GEODESIA

- Establecer y mantener redes de control tridimensionales nacionales y globales (*figuras 3, 4 y 5*), teniendo en cuenta los movimientos de las placas tectónicas.



Figura 3. Red Geodésica Nacional.



Figura 4. Red Geodésica Europea.



Figura 5. Red Geodésica Global.

- Medición y representación de fenómenos geofísicos tales como las mareas terrestres, movimientos de los polos (*figura 6*) y de la corteza...

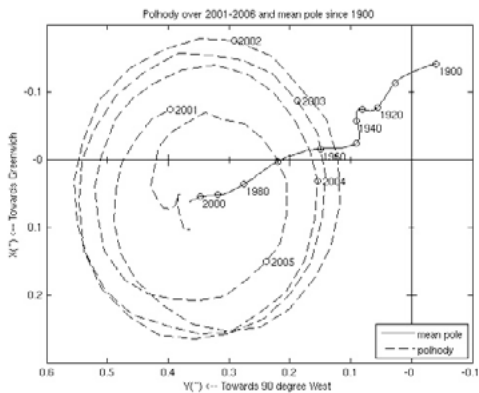


Figura 6. Movimiento del polo. (Fuente: NASA JPL)

- Determinación del campo gravitatorio y sus variaciones temporales, obteniendo datos que hacen determinar la figura del geoide como en la *figura 7*.

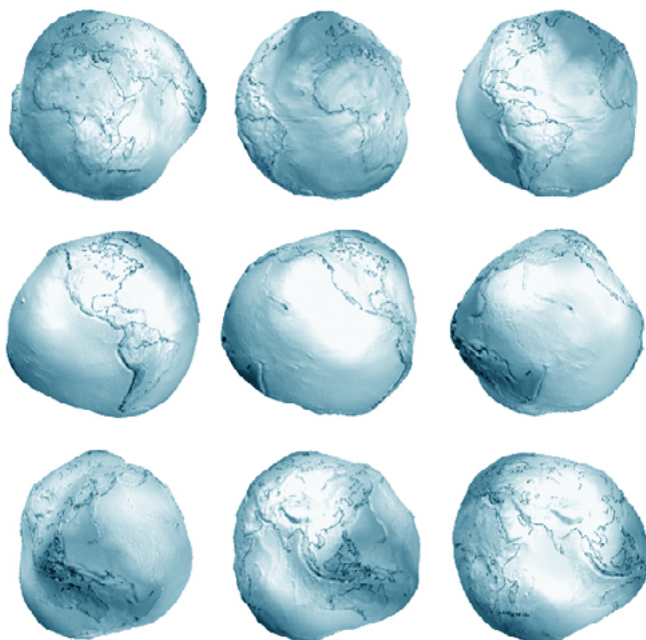


Figura 7. Geoide EIGEN-CG01C.

5. GEODESIA FÍSICA

La forma de la tierra es única. No hay ningún cuerpo geométrico que sea igual.

El 70.80% de la Tierra está cubierta por mares y océanos. La superficie por excelencia para medir altitudes es el nivel medio del mar. Este nivel medio, es la mejor aproximación a la forma real de la Tierra.

El nivel medio del mar depende de las irregularidades del campo gravitatorio terrestre, que altera su forma. El agua busca estar en equilibrio y tiende a seguir una superficie gravitatoria equipotencial.

Basándose en este hecho se introduce la figura llamada **Geoide**, definida como:

“Superficie gravimétrica equipotencial que más se acerca al nivel medio del mar y su continuación por debajo de los continentes.”

Entonces, el geoide sería la superficie de equilibrio de las masas oceánicas sometidas a la acción gravitatoria y a la de la fuerza centrífuga ocasionada por la rotación y traslación del planeta de manera que la dirección de la gravedad es perpendicular en todos los lugares.

El Geoide es el lugar geométrico de los puntos que se encuentran en equilibrio bajo la acción de las siguientes fuerzas:

- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los puntos de la superficie del mismo.
- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los astros del Sistema Solar.
- Fuerza centrífuga, debida al movimiento de rotación de la Tierra.

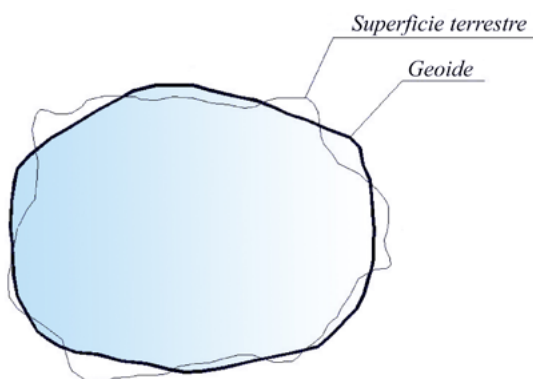


Figura 8. Ajuste del geoide a la superficie real de la tierra.

Realmente es una superficie irregular, tal y como se observa en la *figuras 7 y 8*, con protuberancias y depresiones debidas a la irregular distribución de las fuerzas gravitacionales en la masa del planeta.

La determinación de la forma del geoide se puede realizar por dos métodos:

- Métodos clásicos: Gravímetros que observan las variaciones periódicas en el módulo o magnitud de la gravedad.
- Métodos actuales: Satélites que observan señales de elementos que no están ligados directamente a la tierra tales como el GRACE, GOCE...

6. 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.

Sus características más destacables son:

- Mide ángulos y distancias sobre la superficie terrestre.
- Toma, como superficie de referencia, modelos matemáticos.
- Determina los parámetros de dichos modelos.

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.

Se pueden distinguir dos tipos de elipsoides en geodesia tal y como se puede apreciar en la *figura 9*:

- **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.

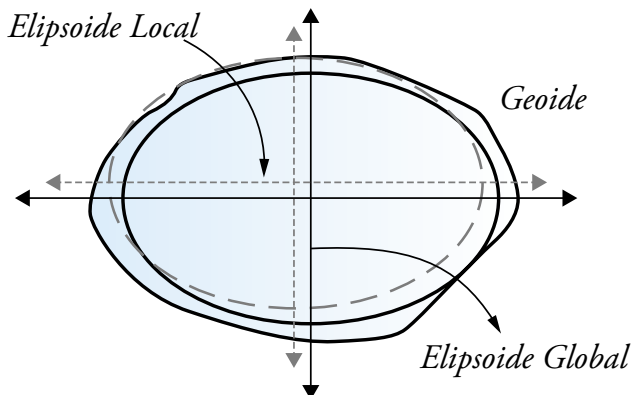


Figura 9. Diferencias entre un elipsoide local y uno global.

Los parámetros de un elipsoide de revolución global serían los mostrados en la *figura 10* 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:

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

Ec. 2: Inversa del factor de aplanamiento.

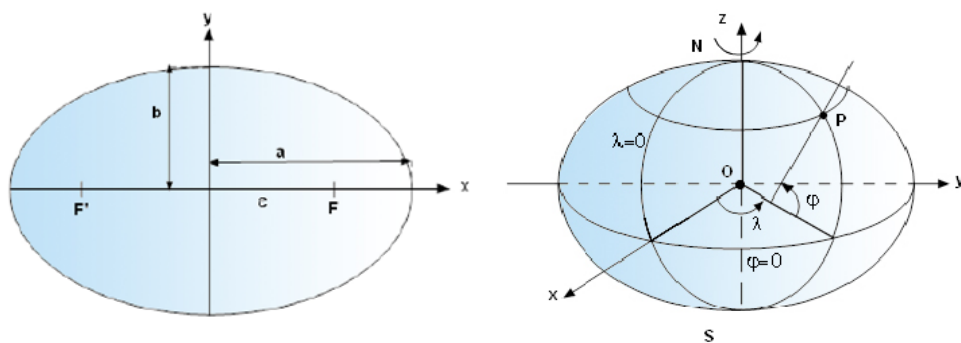


Figura 10. Parámetros de un elipsoide de revolución.

Algunos de los elipsoides utilizados tanto en la antigüedad como en la actualidad son los que se muestran a continuación en la *tabla 1*:

Nombre	a (m)	b(m)	1/f
Australian National	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

Tabla 1. Elipsoides más comunes

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 (*figura 11*).

Los elipsoides que son aplicables a nuestra situación geográfica son los siguientes:

- INTERNACIONAL 1924, o también denominado elipsoide de Hayford: es el elipsoide de referencia para el sistema ED50, que aún sigue en vigencia en España hasta el 1 de Enero de 2015. Es un **elipsoide local** al que se refieren las coordenadas del continente europeo.
- GRS 1980, o también llamado GRS-80: es el elipsoide Global que se toma como referencia en el sistema ERTS-89. Aunque es un **elipsoide global**, sólo aplica al continente europeo.
- WGS 84, es el **elipsoide global** que utiliza el sistema WGS84. Es el elipsoide con el que trabajan los sistemas GPS. Este elipsoide sí que se utiliza a nivel global sobre toda la superficie de la tierra.

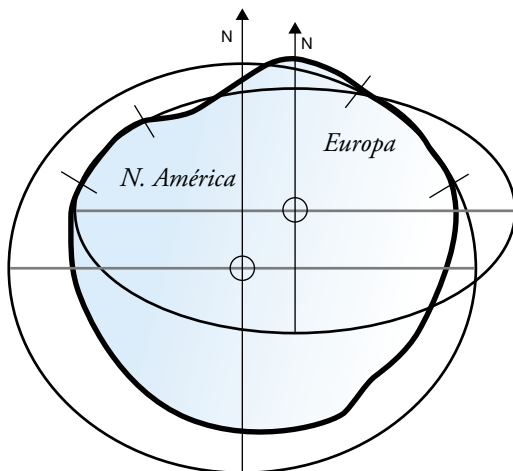


Figura 11. Diferencia entre dos elipsoides regionales, uno global y el otro local.

7. RELACIÓN ENTRE EL GEOIDE Y EL ELIPSOIDE

La distancia entre el elipsoide y el geoides en una localización concreta se llama **Ondulación del geoides** en ese punto (*figura 12*).

Dependiendo de dónde midamos esa distancia, es positiva o negativa, dependiendo si el elipsoide está por debajo o por encima del geoides respectivamente. Además, su valor varía espacialmente, tal y como se puede observar en la *figura 13*.

$$N=h-H$$

Ec. 3: Ondulación del Geoide

Siendo,

N la ondulación del geoide

h la altura o cota elipsoidal

H la altura sobre el geoide o cota ortométrica.

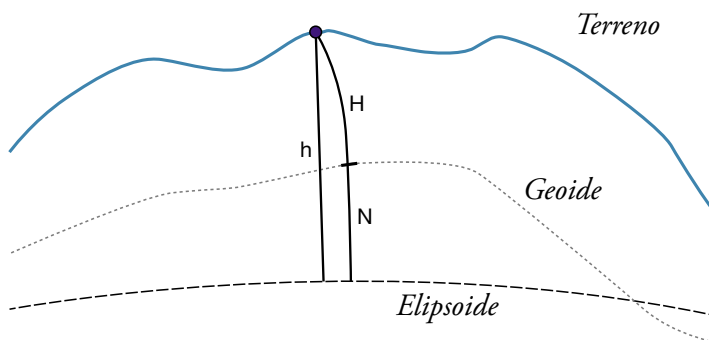


Figura 12. Ondulación del geoide.

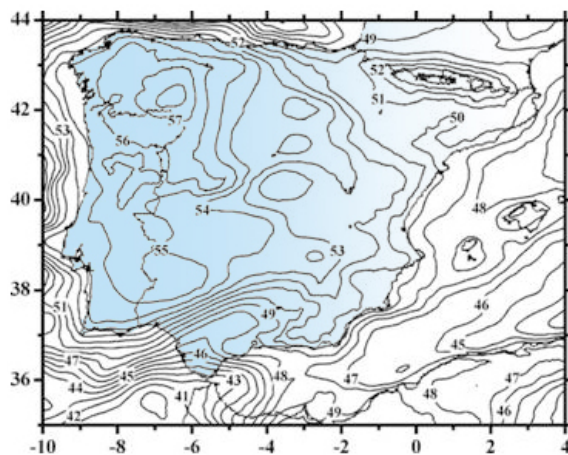


Figura 13. Valores de la ondulación del geoide en España.

El sistema de medida GPS nos da unas coordenadas referidas al WGS84, por lo tanto, la cota que mide es una cota elipsoidal. Sin embargo, las cotas que se miden al hacer una nivelación geométrica son cotas ortométricas, siendo estas últimas cotas las que

aparecen en toda la cartografía oficial. De ese modo, cuando se hace una medición con GPS¹, las cotas medidas, habrá que transformarlas a ortométricas, sumándole o restándole la ondulación del geode, dependiendo del lugar dónde nos encontremos.

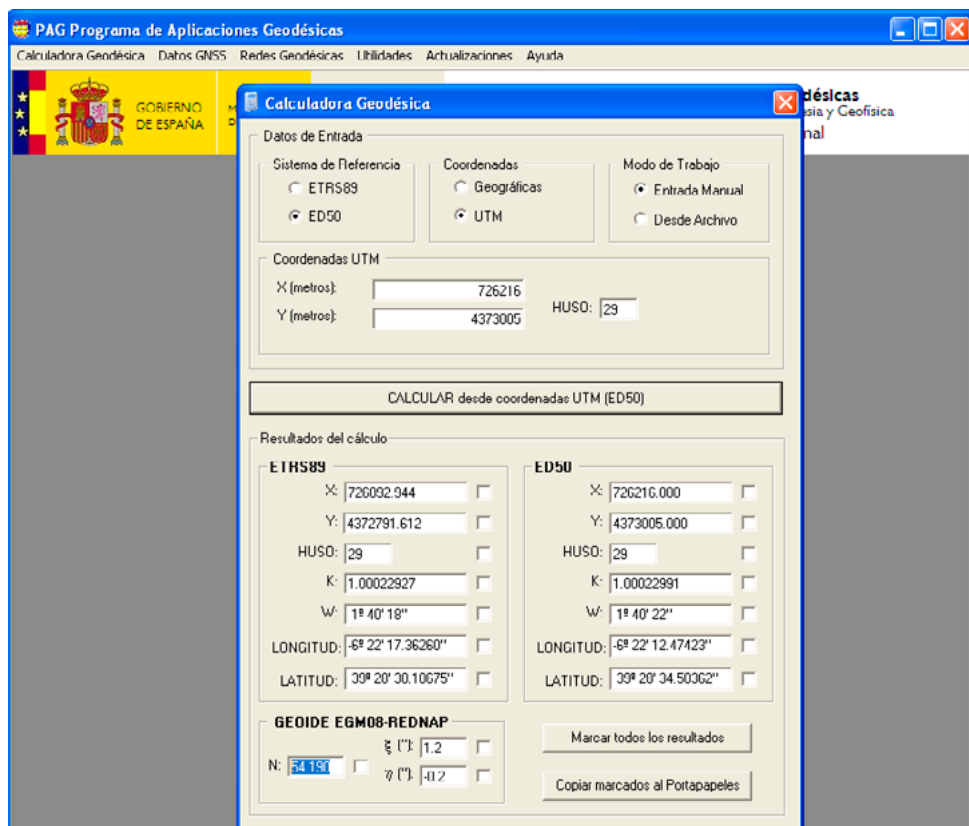


Figura 14. Calculadora geodésica del IGN.

Un recurso útil es el Programa de Aplicaciones Geodésicas del IGN². Tal y como se puede observar en la *figura 14*, introduciendo las coordenadas de un punto nos devuelve el valor de la ondulación en esa localización geográfica.

En nuestra localización geográfica, el valor de la ondulación del geode EGM08 oficial para la península con respecto al elipsoide Hayford (ED50) es de 54.190 m.

¹ Global Positioning System

² Instituto Geográfico Nacional.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE REFERENCIA

1. SISTEMAS DE REFERENCIA

Un **sistema de referencia** consiste en un conjunto de modelos necesarios para la descripción de posiciones y movimientos de cuerpos celestes, incluida la tierra (sistemas celestes) o de cuerpos sobre la tierra (sistemas terrestres).

Deben definirse, para ello: Origen, escala, orientación y plano principal.

Un sistema de referencia se denomina **Inercial**, si se encuentra en reposo o se mueve con velocidad constante respecto al resto del universo. Por tanto, se considera fijo en el espacio.

Hay dos niveles fundamentales de sistemas de referencia:

- Los **Sistemas de Referencia Celestes** (CRS³): Son sistemas cuasi-inerciales respecto a los cuales referimos las posiciones de los objetos celestes, por ejemplo, estrellas. La dirección del eje de rotación terrestre permanece aproximadamente constante respecto a tales objetos y permite definir el sistema de referencia. Tal y como se aprecia en la *figura 15*, su plano fundamental es el Ecuador, el eje Z se sitúa en la dirección del eje de rotación terrestre. El eje X en la dirección del punto Aries, y el eje Y formando triedro directo con los dos anteriores. Su origen es el centro de masas de la Tierra.

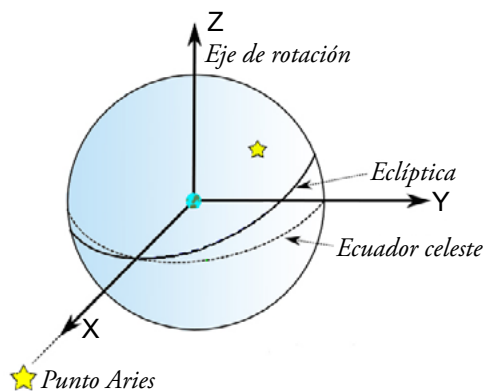


Figura 15. Sistema de Referencia Celeste.

³ Celestial Reference System

- Los **Sistemas de Referencia Terrestres** (TRS⁴): Son sistemas ligados a la tierra y giran conjuntamente con ella. Son no inerciales. Su plano fundamental es el ecuador y tal y como se aprecia en la *figura 16*, el eje Z está en la dirección de eje de rotación terrestre, el X en la dirección de la intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador y el Y formando un triedro directo con los anteriores. Su origen es el centro de masas de la tierra.

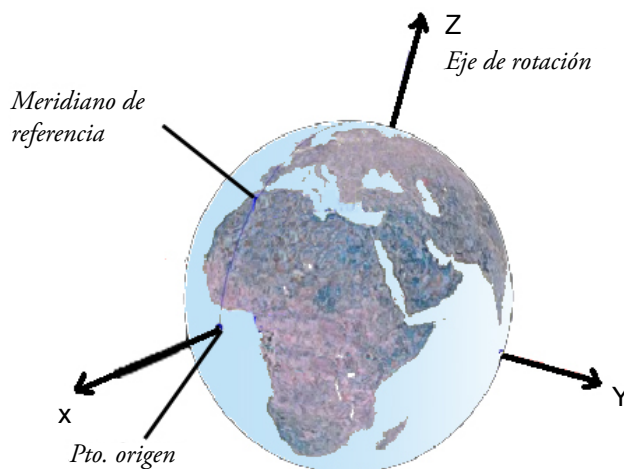


Figura 16. Sistema de Referencia Terrestre.

2. MARCOS DE REFERENCIA

Un marco de referencia es la materialización de un sistema de referencia.

El marco de referencia está constituido por el conjunto de coordenadas de los puntos de definición, las técnicas aplicadas en las observaciones de los mismos y los métodos de cálculos con los que se obtienen las coordenadas. Se suelen materializar tal y como se muestra en la *figura 17*.

Cada sistema de referencia tiene su correspondiente marco asociado, pero en algunos casos, un mismo punto puede servir de marco para sistemas diferentes (*figura 18*).

⁴ Terrestrial Reference System



Figura 17. Vértice Geodésico perteneciente a un marco de referencia.


Número.....: 70439 Nombre.....: Sierrilla Municipio...: Cáceres Provincia...: Cáceres Fecha de Construcción.....: 05 de mayo de 1980 Pilar con centrado forzado...: 1,20 m de alto, 0,30 m de diámetro. Último cuerpo.....: 1,00 m de alto, 1,00 m de ancho. Total cuerpos.....: 1 de 1,00 m de alto.	Sierrilla 01/11/2002 																		
Coordenadas Geográficas:																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Sistema de Ref.:</td> <td style="width: 35%;">ED 50</td> <td style="width: 35%;">ETRS89</td> </tr> <tr> <td>Longitud.....:</td> <td>- 6° 23' 31,5009"</td> <td>- 6° 23' 36,39053"</td> </tr> <tr> <td>Latitud.....:</td> <td>39° 29' 03,1105"</td> <td>39° 28' 58,71457"</td> </tr> <tr> <td>Altitud.....:</td> <td></td> <td>576,431 m (CF)</td> </tr> <tr> <td>Compensación:</td> <td>01 de enero de 1983</td> <td>28 de noviembre de 2004</td> </tr> </table>	Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89	Longitud.....:	- 6° 23' 31,5009"	- 6° 23' 36,39053"	Latitud.....:	39° 29' 03,1105"	39° 28' 58,71457"	Altitud.....:		576,431 m (CF)	Compensación:	01 de enero de 1983	28 de noviembre de 2004				
Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89																	
Longitud.....:	- 6° 23' 31,5009"	- 6° 23' 36,39053"																	
Latitud.....:	39° 29' 03,1105"	39° 28' 58,71457"																	
Altitud.....:		576,431 m (CF)																	
Compensación:	01 de enero de 1983	28 de noviembre de 2004																	
Coordenadas UTM. Huso 29 :																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Sistema de Ref.:</td> <td style="width: 35%;">ED 50</td> <td style="width: 35%;">ETRS89</td> </tr> <tr> <td>X.....:</td> <td>724301,95 m</td> <td>724178,927 m</td> </tr> <tr> <td>Y.....:</td> <td>4373832,17 m</td> <td>4373618,819 m</td> </tr> <tr> <td>Factor escala....:</td> <td>1,000219435</td> <td>1,000218802</td> </tr> <tr> <td>Convergencia...:</td> <td>1° 39' 32"</td> <td>1° 39' 29"</td> </tr> <tr> <td>Altitud sobre el nivel medio del mar:</td> <td></td> <td>521,049 m (BP)</td> </tr> </table>	Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89	X.....:	724301,95 m	724178,927 m	Y.....:	4373832,17 m	4373618,819 m	Factor escala....:	1,000219435	1,000218802	Convergencia...:	1° 39' 32"	1° 39' 29"	Altitud sobre el nivel medio del mar:		521,049 m (BP)	
Sistema de Ref.:	ED 50	ETRS89																	
X.....:	724301,95 m	724178,927 m																	
Y.....:	4373832,17 m	4373618,819 m																	
Factor escala....:	1,000219435	1,000218802																	
Convergencia...:	1° 39' 32"	1° 39' 29"																	
Altitud sobre el nivel medio del mar:		521,049 m (BP)																	

Figura 18. Vértice Geodésico con coordenadas en dos sistemas de referencia (fuente: IGN).

3. SISTEMAS DE REFERENCIA TERRESTRES

3.1. SISTEMA DE REFERENCIA EUROPEAN DATUM 1950 (ED50)

Procede de la compensación de redes geodésicas que los EEUU realizaron en esa fecha para tener cartografía unificada de todos los países aliados después de la segunda guerra mundial.

Se adoptó el elipsoide de hayford o internacional de 1924, como origen de latitudes el ecuador y como origen de longitudes el Meridiano de Greenwich.

El punto origen (**punto astronómico fundamental**) sobre el que ir transportando las posiciones calculadas del resto de puntos que conformaron el marco, fue, como se observa en la *figura 19*, el observatorio de Postdam (Alemania).

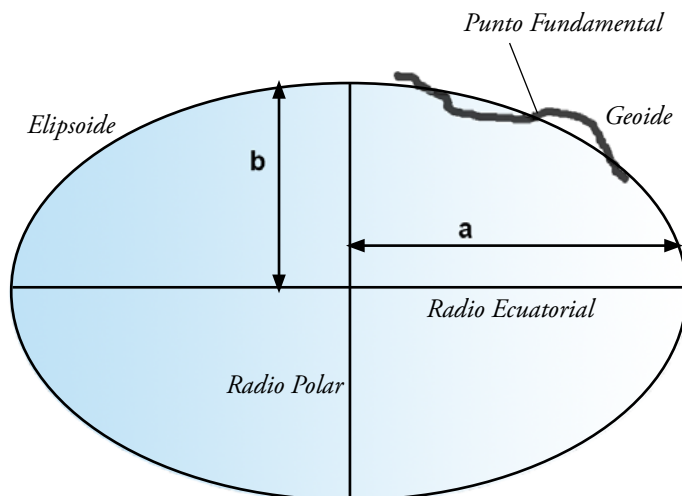


Figura 19. Punto Astronómico Fundamental.

Es un sistema adaptado a Europa, por tanto es un sistema de referencia local. Su elipsoide, tal y como se muestra en la *figura 20*, está desplazado unos 230m respecto al centro de masas de la tierra.

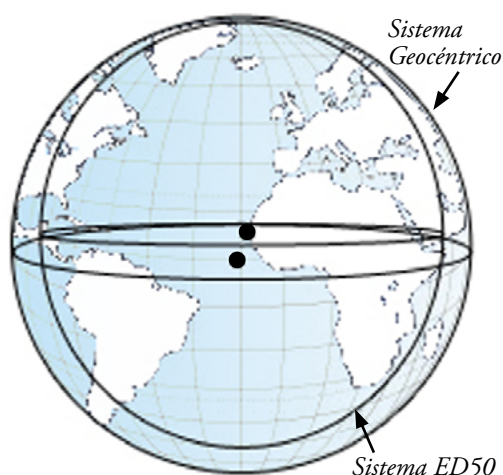


Figura 20. Disposición del sistema ED50 con respecto a un sistema geocéntrico.

3.2. SISTEMA DE REFERENCIA EUROPEAN TERRESTRIAL SYSTEM (ETRS89)

La necesidad de un sistema de referencia muy preciso para Europa hizo que se definiera un sistema de referencia terrestre denominado EUREF.

La primera materialización de la red se denominó EUREF89 y el sistema de referencia correspondiente es el ETRS89, que es el sistema oficial al que debe estar referida toda la cartografía en Europa.



Figura 21. Distribución del marco ETRS89.

Al estar situadas todas sus estaciones en la placa europea sus desplazamientos son conjuntos y por tanto se mantienen relativamente estables.

Este sistema tiene como elipsoide de referencia el GRS80 que es prácticamente idéntico al WGS84.

Según un Real Decreto, publicado en 2007, se adopta este sistema como el oficial para la elaboración de cartografía.

<http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35986-35989.pdf>

Dicho RD, establece un periodo hasta el 1 de enero de 2015 de transición y a partir de dicha fecha, toda la cartografía se producirá en este sistema.

El marco de referencia del sistema ETRS89 está compuesto por aproximadamente 200 estaciones distribuidas por la placa europea como se muestra en la *figura 21* y tienen coordenadas invariantes con el tiempo.

Convendría señalar que en el caso de las Islas canarias, al encontrarse en una placa tectónica diferente, se ha adoptado un sistema de referencia distinto, denominado REGCAN y que, al igual que en la península, se adoptará como oficial y único en la fecha de enero de 2015.

3.3. SISTEMA DE REFERENCIA WORLD GEODETIC SYSTEM 1984 (WGS84)

Es un sistema de referencia Terrestre Global, que tiene un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coinciden con los del sistema ETRS89.

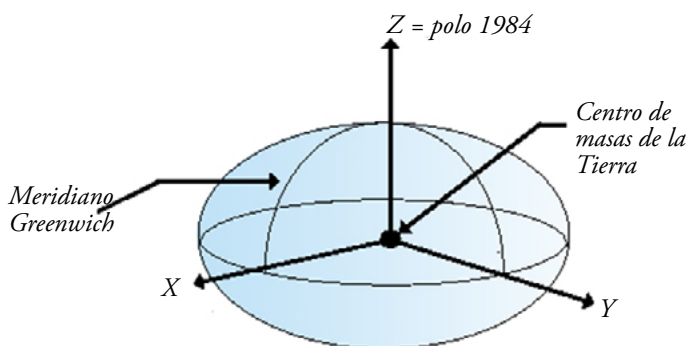


Figura 22. Sistema WGS84.

Su origen es el centro de masas de la tierra, el eje Z es la dirección del polo en 1984, el eje X es la dirección de la intersección del plano del ecuador con el meridiano de Greenwich y el eje Y la dirección que forma el triángulo directo (*Figura 22*).

Su marco de referencia fue inicialmente determinado por la posición de una serie 10 de estaciones, tal y como se muestra en la *figura 23*. Cinco de ellas son las encargadas de controlar los satélites de la constelación GPS.



Figura 23. Disposición inicial de las estaciones WGS84.

Posteriormente se incluyeron más estaciones.

4. TRANSFORMACIÓN ENTRE SISTEMAS DE REFERENCIA

Al realizar medidas con GPS se obtienen coordenadas cartesianas XYZ referidas al centro del elipsoide WGS84. Un ejemplo de dichas coordenadas se muestra en la *figura 24*.

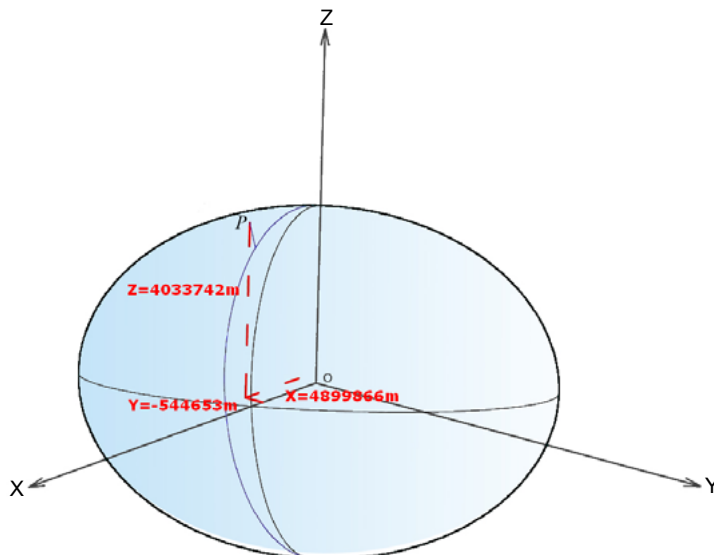


Figura 24. Coordenadas cartesianas WGS84 de un punto.

Hasta enero de 2015 los sistemas de referencia ED50 y ETRS89 están vigentes, a partir de esa fecha el sistema de referencia único será el ETRS89.

Todos estos años están sirviendo de margen para la conversión de toda la cartografía antigua al nuevo sistema. Por ello, es necesario estudiar una transformación entre los sistemas de coordenadas ETRS89 y ED50.

Además, como se ha dicho anteriormente, en el caso de que se obtengan coordenadas de puntos mediante GPS, el resultado inicial que se obtiene es de coordenadas tridimensionales WGS84 que, además de no pertenecer a nuestro sistema oficial, no se encuentran proyectadas. De tal modo que se hace necesaria también una transformación entre este sistema y los restantes oficiales.

4.1. TRANSFORMACIÓN WGS84-ED50

Consiste en una transformación tridimensional conforme.

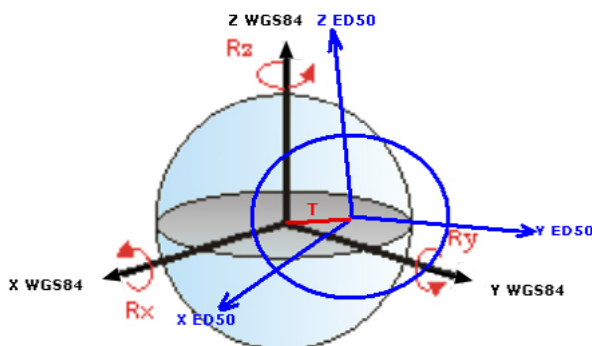


Figura 25. Transformación de coordenadas WGS84-ED50.

$$ED50 = T + (1 + \Delta) \cdot R \cdot WGS84$$

Ec. 4: Transformación de coordenadas WGS84-ED50

Siendo:

T el vector de translaciones: $T = (T_x, T_y, T_z)^T$.

Δ el factor de escala.

R la matriz de rotación función de los giros en los tres ejes.

El número de incógnitas es 7 (tres componentes del vector T , el factor de escala y las rotaciones en los tres ejes XYZ). Por cada punto se generarían tres ecuaciones, por lo tanto, se necesitan como mínimo tres puntos con coordenadas conocidas en los dos sistemas de coordenadas para poder resolver el sistema de ecuaciones.

El sistema se resuelve por mínimos cuadrados, ya que se suelen medir coordenadas de 4 puntos en los dos sistemas y de ese modo tenemos redundancia y comprobación de que los parámetros obtenidos son los correctos.

El modo de trabajo en campo suele ser el de medir coordenadas WGS84 en de 4 vértices geodésicos de los que se conocen sus coordenadas oficiales en ED50. De esa manera, conocemos coordenadas en los dos sistemas y se obtendrían los parámetros de transformación de coordenadas para las mediciones que se hagan con GPS en la zona interior del polígono que delimitan los 4 vértices geodésicos. Un ejemplo se muestra en la *figura 26*, en la que se observa cómo los parámetros de transformación obtenidos por los vértices medidos, afectarían a toda la superficie enmarcada dentro de ellos.



Figura 26. Ejemplo de toma de datos para la transformación WGS84-ED50.

Estos parámetros tienen una duración temporal limitada.

Si el trabajo que vamos a realizar, no necesita mucha exactitud, podríamos plantearnos la utilización de parámetros estándar tales como los proporcionados por organismos locales, regionales e incluso nacionales. Por ejemplo, los parámetros genéricos para **toda** la península ibérica proporcionados por el IGN son los siguientes:

Términos de Traslación	$A_x = 131.03$	$A_y = 100.25$	$A_z = 163.35$
Términos de Rotación	$R_x = -1'' .244$	$R_y = -0'' .019$	$R_z = -1'' .144$
Factor de Corrección de Escala: 9.39 ppm			

Tabla 2. Parámetros de transformación para la Península Ibérica

Insistiendo en que hay que tener mucha precaución a la hora de utilizarlos, puesto que la exactitud que se estima para las posiciones obtenidas aplicando estos parámetros corresponde con 70 cm de EMC⁵ en la dirección N/S, 71 cm de EMC en la dirección E/W, y 43 cm de EMC para la altitud.

4.2. TRANSFORMACIÓN ED50-ETRS89

Esta transformación no se puede modelar por una simple transformación de 7 parámetros, si deseamos aplicarla a escalas grandes, puesto que existe una distorsión difícil de absorber.

De ese modo, los parámetros que describen la transformación entre los dos sistemas son los que se obtienen conjuntamente de: “Conformidad + modelo de distorsión” (figura 27).

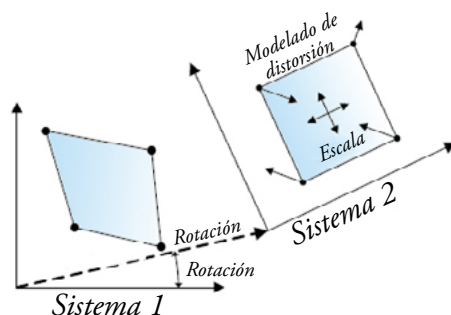


Figura 27. Transformación “Conformidad + Modelo de distorsión”.

El IGN ha modelado dicha transformación mediante la llamada malla de mínima curvatura cuyas diferencias en valores en función de la localización geográfica se pueden apreciar en la figura 28.

⁵ Error Medio Cuadrático

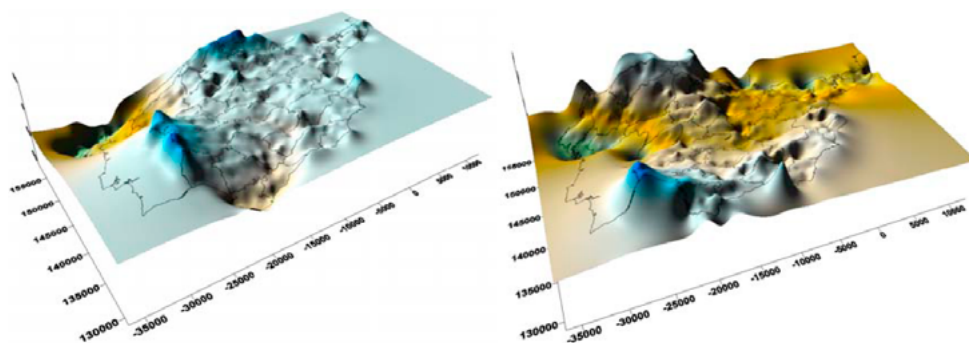


Figura 28. Malla de mínima curvatura en función de la longitud (Izda) y latitud (Dcha) (Fuente: I.G.N)

Dicha malla se implementa en programas de cálculo mediante el archivo *.gsb que proporciona el IGN.

<http://www.ign.es/ign/layoutIn/herramientas.do#DATUM>

Se pueden dar tres tipos de elementos a transformar:

a. Transformación de Puntos aislados

Se recomienda utilizar el Programa de aplicaciones geodésicas del IGN (*Figura 29*).

b. Transformación de Cartografía Vectorial

La transformación ya no es tan sencilla, puesto que, dependiendo de la extensión geográfica a transformar, las distorsiones afectan más o menos.

Existen varios softwares que pueden hacerlo, siempre y cuando se les cargue internamente el archivo que contiene la malla oficial *.gsb


Algunos ejemplos son:

FME. <http://www.safe.com/fme/key-capabilities/coordinate-reprojection/>

Autocad map. <http://www.youtube.com/watch?v=rm8ke5zfdkA>

Gvsig. <http://www.gvsig.org/web/docusr/acceso-editores/funcionalidades/extension-jcrs-gestion-de-sistemas-de-referencia-de-coordenadas/transformaciones/transformacion-por-fichero-rejilla/?searchterm=transformaci%C3%B3n%20sistemas%20de%20coordenadas>

Arcmap. <http://www.sinfogeos.es/blog-geomatica.html/item/19-arcgis-cambio-datum.html?tmpl=component&print=1>


Centro de Observaciones Geodésicas
 Subdirección General de Astronomía, Geodesia y Geofísica
 Instituto Geográfico Nacional

Iniciando comprobación de integridad...

Programa de Aplicaciones Geodésicas Versión 0.9.1

Calculadora Geodésica

Datos de Entrada

Sistema de Referencia <input checked="" type="radio"/> ETRS89 <input type="radio"/> ED50	Coordenadas <input checked="" type="radio"/> Geográficas <input type="radio"/> UTM	Modo de Trabajo <input checked="" type="radio"/> Entrada Manual <input type="radio"/> Desde Archivo
---	---	--

Coordenadas Geográficas

Longitud: (Deste negativo) Huso:

Latitud: (Sur negativo)

CALCULAR desde coordenadas Geográficas (ETRS89)

Resultados del cálculo

UTM ETRS89 X: <input type="text" value="440618.960"/> <input type="checkbox"/> Y: <input type="text" value="4451812.699"/> <input type="checkbox"/> HUSO: <input type="text" value="30"/> <input type="checkbox"/> K: <input type="text" value="0.99964340"/> <input type="checkbox"/> W: <input type="text" value="-0° 27' 2"/> <input type="checkbox"/> LONGITUD: <input type="text" value="-3° 41' 52.23650"/> <input type="checkbox"/> LATITUD: <input type="text" value="40° 12' 52.65890"/> <input type="checkbox"/>	UTM ED50 X: <input type="text" value="440728.527"/> <input type="checkbox"/> Y: <input type="text" value="4452020.217"/> <input type="checkbox"/> HUSO: <input type="text" value="30"/> <input type="checkbox"/> K: <input type="text" value="0.99964324"/> <input type="checkbox"/> W: <input type="text" value="-0° 26' 59"/> <input type="checkbox"/> LONGITUD: <input type="text" value="-3° 41' 47.53136"/> <input type="checkbox"/> LATITUD: <input type="text" value="40° 12' 56.93366"/> <input type="checkbox"/>
--	---

GEOIDE

N: <input type="text" value="51.222"/> <input type="checkbox"/>	ξ ("): <input type="text" value="2.1"/> <input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Marcar todos los resultados"/>
	η ("): <input type="text" value="-1.6"/> <input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Copiar marcados al Portapapeles"/>

Figura 29. Transformación de coordenadas de un punto mediante la Calculadora Geodésica

c. Transformación de Ortofotografías

Existen discrepancias entre distintos organismos públicos acerca de cómo realizar esta transformación.

La aplicación más adecuada es la que ofrece la IDE de Castilla la Mancha:

<http://ide.jccm.es/pnoa/>

Dicha aplicación, transforma la ortofoto por tres métodos:

- Por el punto central
- Por un rectángulo definido por dos puntos
- Por un recinto definido por un polígono shp

Se puede seleccionar el método de remuestreo deseado entre las siguientes opciones:

- Método del vecino más próximo
- Interpolación bilineal
- Interpolación bicúbica

CAPÍTULO 3

PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS. UTM

1. PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Una **Proyección Cartográfica** es una correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie terrestre y los puntos de un plano llamado Plano de proyección.

Puesto que cualquier punto de la esfera está definido por sus coordenadas geográficas (λ , φ) y cualquier punto del plano lo está por sus coordenadas cartesianas (X , Y), existirá una serie infinita de relaciones que ligen (λ , φ) con (X , Y). Cada una de estas infinitas relaciones será un sistema de proyección cartográfico.

Se trata de proyectar las sombras de los meridianos y paralelos sobre una superficie que pueda convertirse en plana sin deformaciones (cilíndrica (*figura 30*) o cónica).

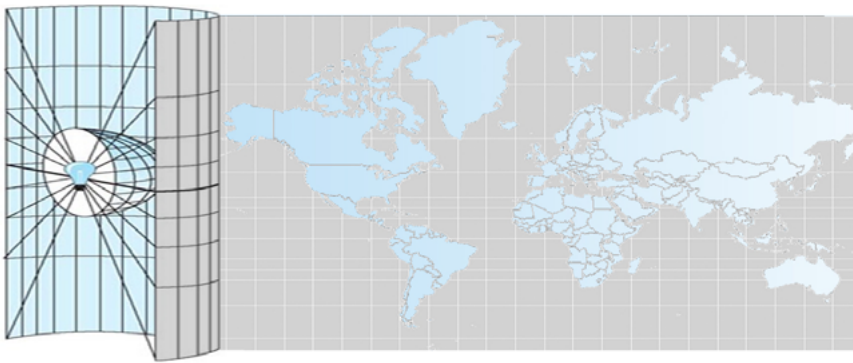


Figura 30. Proyección Cilíndrica.

2. TIPOS DE PROYECCIÓN

Las proyecciones se pueden clasificar en función de:

- Las propiedades que conserven: Algunas conservan los ángulos, otras las distancias...
- La superficie auxiliar con la que se realiza la proyección (*Figura 31*): Un cilindro, un cono o un plano.

- Tangencia de la superficie auxiliar (*Figura 33*): La tangencia puede hacerse por un meridiano, por un paralelo, por los polos...
- Punto desde el que se proyecta (*Figura 32*): Este puede estar en el interior de la esfera, en su superficie o alejado de la misma.

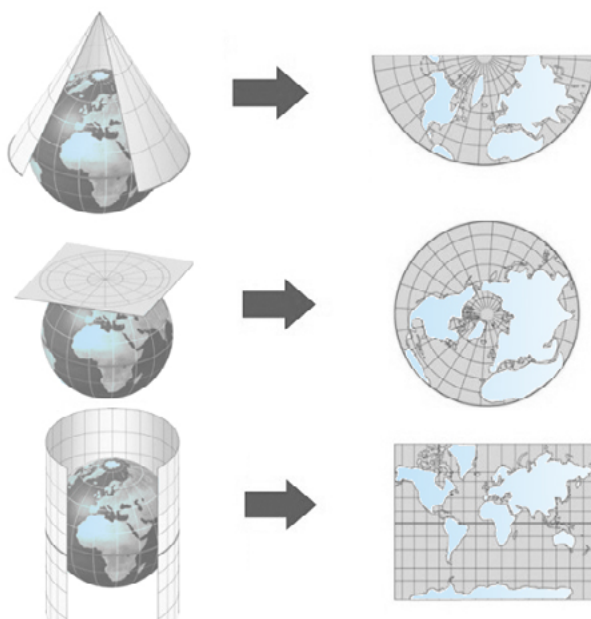


Figura 31. Tipos de Proyección en función de la superficie auxiliar que se utilice.

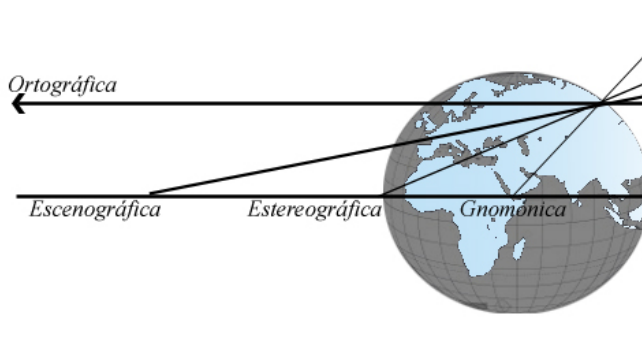


Figura 32. Tipos de Proyección en función del punto de proyección

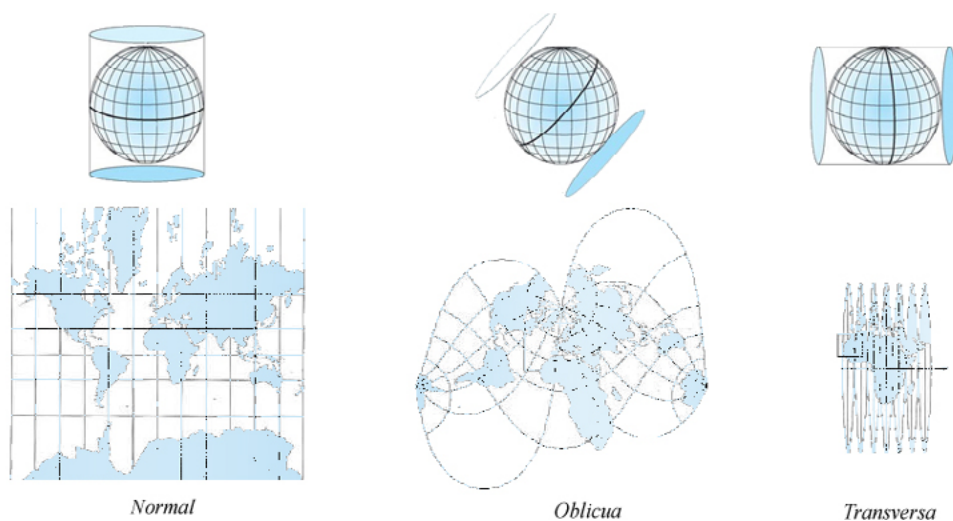


Figura 33. Tipos de Proyección en función de la situación de la tangencia

3. PROYECCIÓN UTM

En el RD 1071/2007 se especifica que:

“Para cartografía terrestre, básica y derivada, a escalas mayores de 1:500.000, se adopta el sistema de referencia de coordenadas ETRS-Transversa de Mercator”

Lo que indica que las mediciones han de ser referidas al sistema de referencia ETRS89 y posteriormente proyectadas al cilindro de la proyección UTM⁶.

La proyección UTM es una proyección cilíndrica en la que el eje del cilindro está en el plano ecuatorial y el cilindro es tangente a un meridiano llamado meridiano origen.

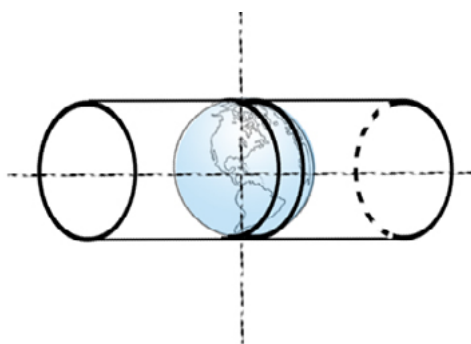


Figura 34. Disposición del Cilindro de proyección en UTM.

⁶ Universal Transversal Mercator.

Como se aprecia en la *figura 34*, al proyectar y desarrollar el cilindro el eje Y es el meridiano origen y el X es la generatriz tangente al ecuador del cilindro.

Se define **huso** como las posiciones geográficas que ocupan todos los puntos comprendidos entre dos meridianos. En el caso de UTM los husos comprenden 6° de longitud con la disposición mostrada en la *figura 35*:

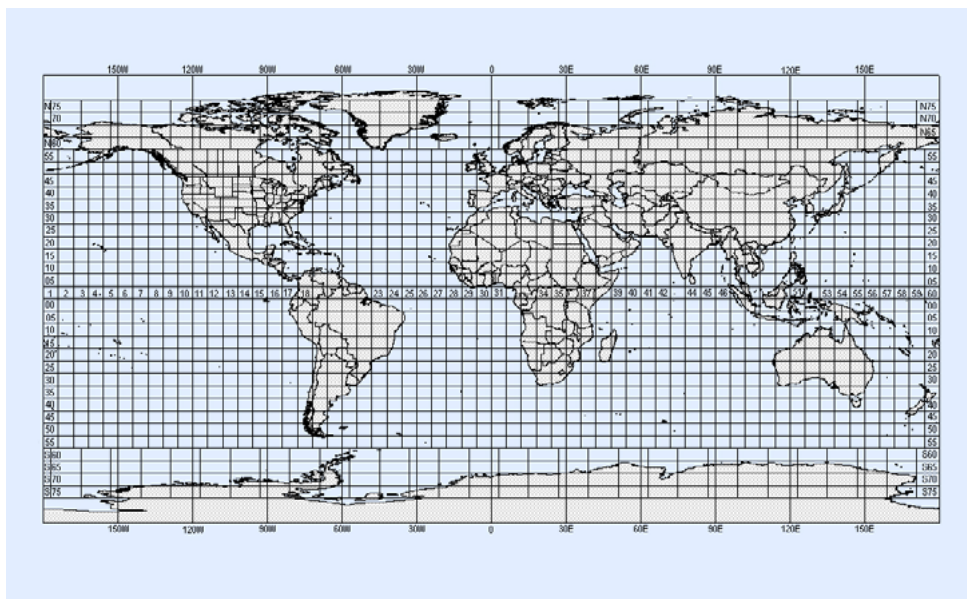


Figura 35. Distribución de los Husos a escala global

3.1. VENTAJAS DE LA PROYECCIÓN UTM

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.

3.2. Husos UTM

En un principio, la red se formó huso a huso, con un cilindro distinto para generar cada uno de los husos. Cada cilindro era tangente al meridiano central de cada huso (*Figura 36*).

Esta disposición del cilindro hacía que la línea del meridiano central fuera la única que conservara las distancias entre sus puntos (**Línea automecoica**).

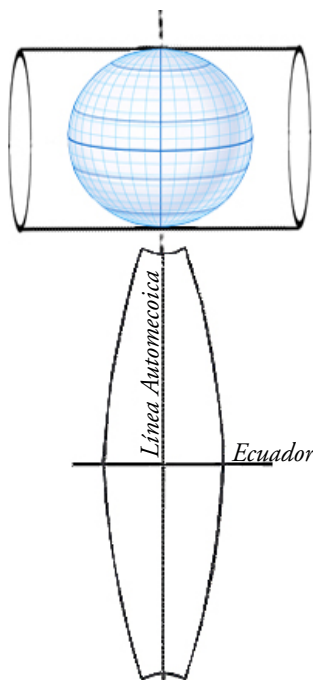


Figura 36. Cilindro inicialmente tangente al meridiano central

Para evitar que la distorsión de las magnitudes lineales aumentara a medida que aumentaba la distancia al meridiano central, se cambió la posición del cilindro hasta hacerlo secante por los meridianos extremos del huso, tal y como se aprecia en la *figura 37*.

De este modo, solo dos líneas se consideran rectas: El meridiano central y el ecuador. Y en el caso del meridiano central, no se conservan distancias.

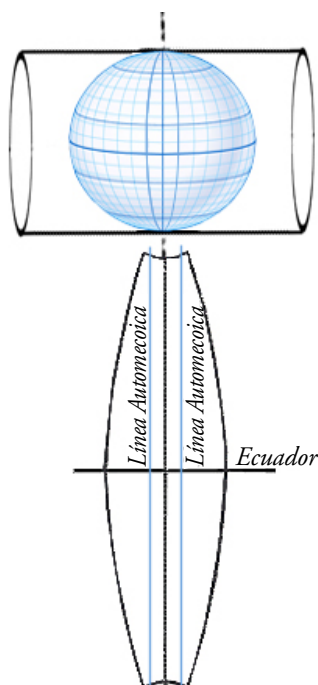


Figura 37. Cilindro secante a los meridianos extremos del huso

3.3. COORDENADAS UTM

El origen de coordenadas del sistema **es distinto para cada huso**, situándose en el punto de intersección del meridiano central de cada uno de ellos con el ecuador.

Tal y como se aprecia en la *figura 38*, ese punto no adopta coordenadas 0,0, como sería lo lógico, sino que, en el caso de las X ese punto adopta valor 500000m para evitar coordenadas negativas y en el caso de las Y adopta el valor 0 para el hemisferio norte y 10000000m para el hemisferio sur.

En consecuencia, habrá a lo largo del globo, 60 puntos con las mismas coordenadas. De ahí la importancia de definir siempre el número del huso cuando se definan las coordenadas UTM, puesto que en caso contrario, podría llevar a equívocos.

En el caso de la península, existen tres husos a los que referir las coordenadas situados según la siguiente *figura 39*.

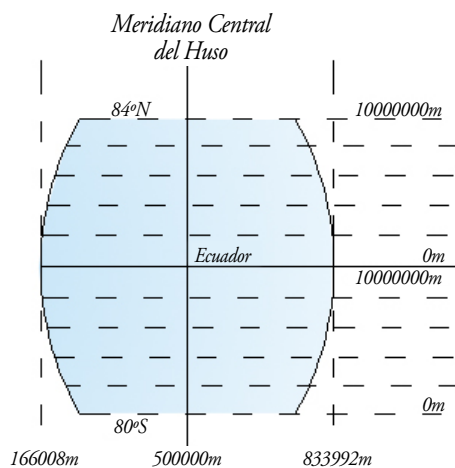


Figura 38. Coordenadas UTM HUSO 30.



Figura 39. Husos que incluyen a la península Ibérica.

3.4. CONVERGENCIA DE CUADRÍCULA

Sólo una línea del huso coincide con la dirección del Norte Geográfico, esa línea es la del meridiano central del huso.

En todos los puntos restantes del huso, existirá un ángulo entre la dirección del Norte Geográfico y el Norte de la Cuadrícula UTM. Este ángulo se denomina **Convergencia de cuadrícula** que variará en cantidad y en signo en función de la zona del huso (*Figura 40*).

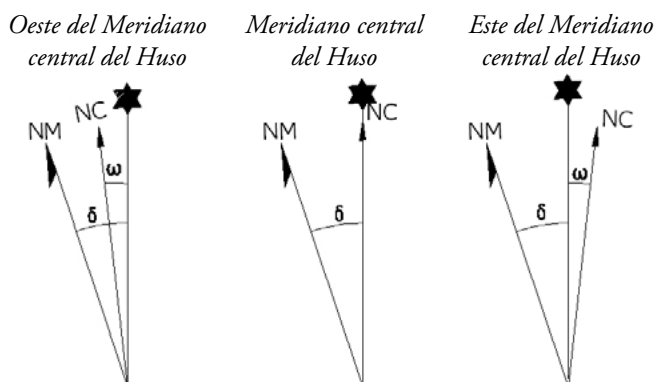


Figura 40. Disposición de la convergencia de meridianos en función de la posición dentro del huso.

Si observamos los gráficos de la *figura 40*, la orientación del Norte Magnético no varía, puesto que en nuestra longitud, siempre está al oeste del Norte Geográfico tal y como se muestra en la *figura 41*.



Figura 41. Localización del Norte Magnético en el año 2009

3.5. DUPLICIDAD DE COORDENADAS ENTRE EXTREMOS DE DOS HUSOS CONSECUTIVOS

En el meridiano límite de dos husos existe siempre una duplicidad de coordenadas, por ejemplo en la localización de la *figura 42*.

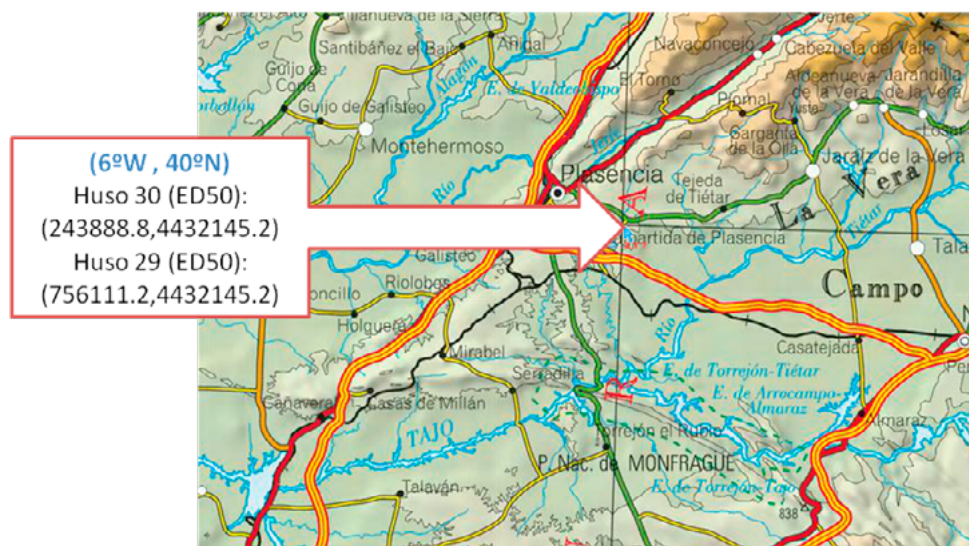


Figura 42. Duplicidad de coordenadas del meridiano entre los Husos 29 y 30

Si se diera el caso de que un proyecto, por ejemplo de una carretera, atravesara un cambio de huso, es habitual, referenciar todo el proyecto al huso que más superficie del proyecto contenga. La porción de proyecto que se referencia al huso que no corresponda, sufrirá un proceso llamado “forzado de coordenadas”.

Este forzado de coordenadas no podrá extenderse mucho, puesto que cuanto más nos alejemos del cambio de huso, los errores de la proyección UTM aumentan considerablemente.

En estos casos, algunos organismos públicos, exigen duplicidad de cartografía, para referenciar todo el proyecto a ambos husos.

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL APLICADA

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA.

VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

1. FOTOGRAMETRÍA

La **fotogrametría**, según Bonneval, es la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías.

Etimológicamente, la palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con luz. Es, en esencia, la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas, y su aplicación es extensiva a numerosas áreas de conocimiento.

Existe otra técnica que utiliza también fotografías aéreas denominada fotointerpretación y que se dedica al estudio pormenorizado de las fotografías con el objetivo de analizar fenómenos de muy variada tipología.

Sin embargo, la fotogrametría no interpreta fenómenos si no que, mediante mediciones en las fotografías, genera planos y mapas de gran exactitud.

Finalmente, podríamos definir la fotogrametría como la ciencia para elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo unos condicionantes específicos.

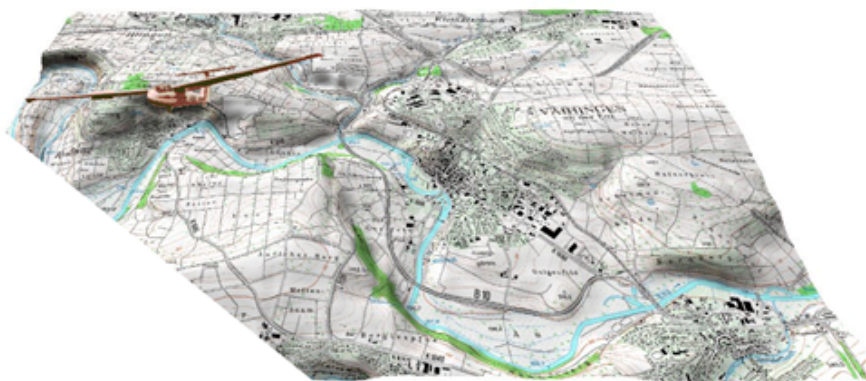


Figura 43. Fotogrametría Aérea.

La más extendida de sus posibles ramas es la **fotogrametría aérea** (*Figura 43*), en la que, a partir de fotografías aéreas tomadas bajo unos condicionantes geométricos, permite elaborar planos y mapas de áreas extensas con exactitud y agilidad.

Para un terreno rústico, el límite de rentabilidad para elegir entre un levantamiento fotogramétrico y uno por GPS podría estar en el entorno de unas 200 ha. En el caso de terreno urbano, el límite descendería considerablemente. Aunque todo depende de la escala, exactitud y características del terreno en cuestión.

2. ELEMENTOS FUNDAMENTALES EN FOTOGRAMETRÍA

La elección de la **escala de la fotografía** es función de la escala de representación (escala del plano a representar) y del tamaño de los objetos que se pretenden detectar; es el primer problema que hay que resolver.

La relación entre la escala de la imagen ($Mb=1/mb$) y la del plano ($Mk=1/mk$) que se trata de obtener por medios fotogramétricos, viene dada según el ábaco de la *figura 44*.

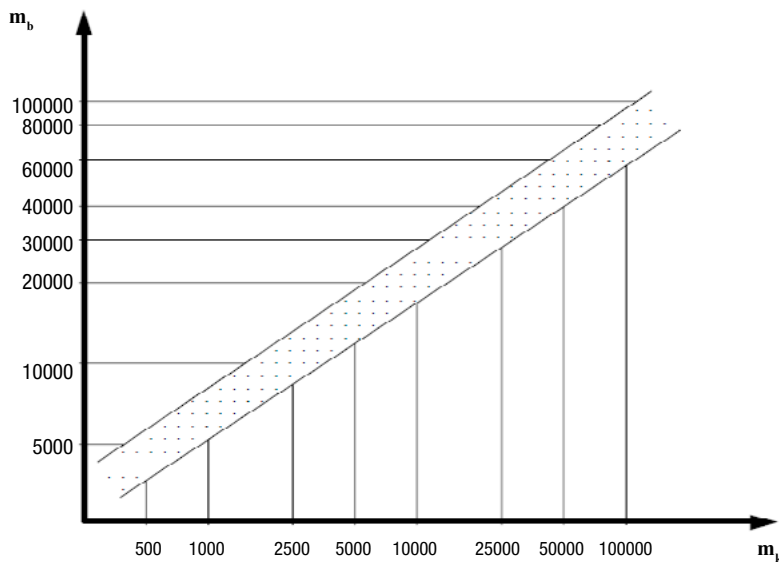


Figura 44. Relación entre la escala de la fotografía y la de la cartografía.

Dicha escala de las fotografías nos limitará la detección del tamaño de los objetos. Sabiendo que el límite de la percepción visual es de 0.2 mm. Si observamos con aparatos provistos de ampliación de la imagen, el límite pasa a ser 0.02 mm de manera que cada escala nos dará un tamaño mínimo de objeto distinto (*Tabla 3*).

1:5000	1:10000	1:20000	1:30000
0.10 m	0.20 m	0.40 m	0.60 m

Tabla 3. Tamaño mínimo de elemento detectado con un instrumento de restitución.

Los siguientes elementos a tener en cuenta son, la **distancia focal** de la cámara y la **altura de vuelo**.

La focal es un dato inherente a la cámara con la que se vaya a realizar el vuelo. Dicha magnitud, es un dato calibrado y corresponde con la distancia que existe desde el centro óptico del objetivo hasta el plano focal que es dónde se captura la imagen. La veremos con mayor detenimiento en capítulos posteriores.

La altura de vuelo vendrá dada por las dos magnitudes anteriores

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} \Rightarrow H = c \ mb$$

Ec. 5: Relación entre escala fotográfica y altura de vuelo.

Tal y como se aprecia en la *figura 45*, esa altura H es la altura media sobre el terreno, que nada tiene que ver con la altura de vuelo sobre el nivel del mar H_0 (dato del altímetro).

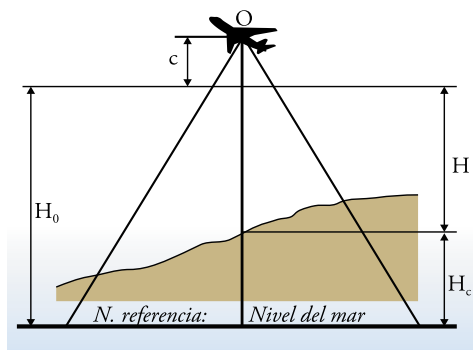


Figura 45. Altitud de vuelo sobre el nivel del mar.

3. PRINCIPIO BÁSICO DE LA FOTOGRAMETRÍA

El principio básico de la fotogrametría es el desplazamiento radial que sufre un punto en el fotograma debido a su altitud.

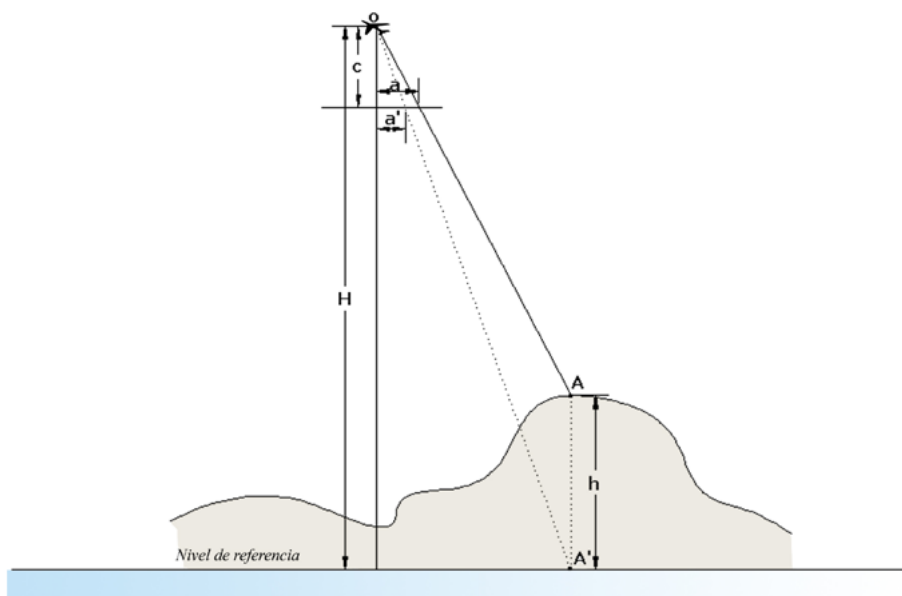


Figura 46. Desplazamiento de un punto debido al relieve.

De manera que podríamos deducir de la *figura 46* que la altura del punto sobre el nivel del mar de la siguiente forma:

$$\frac{H}{a} = \frac{h}{a - a'}$$

Ec. 6: Altura sobre el nivel del mar

Por tanto se concluye cual es la altura del punto sobre el nivel de referencia:

$$h = \frac{a - a'}{a} \cdot H$$

Ec. 7: Altura sobre el nivel de referencia

4. VISIÓN ESTEREOSCÓPICA. PARALAJE

La visión estereoscópica natural se basa en la capacidad que tenemos los seres humanos en apreciar el relieve de las cosas. Para ello, cada ojo captura una imagen del mismo objeto y en el cerebro, se unen por un proceso mental produciéndose una única imagen en relieve (*Figura 47*).

La visión estereoscópica artificial consiste en una imitación de la natural, en la que el observador no se encuentra frente al objeto y en su lugar, se observan dos imágenes tomadas desde puntos de vista diferentes (*Figura 48*), provocando la visión del relieve.

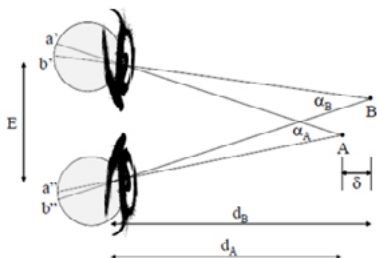


Figura 47. Visión estereoscópica natural.

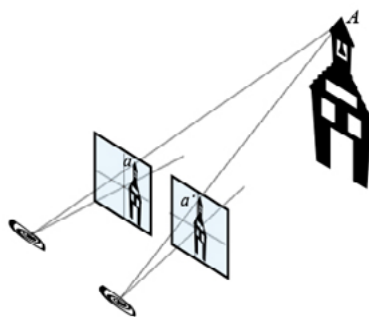


Figura 48. Visión estereoscópica artificial.

La técnica de la fotogrametría se basa en el principio de la estereoscopía para conseguir que, mediante imágenes del terreno, tomadas desde dos puntos de vista, se pueda reproducir el relieve del mismo. La *figura 49* es la que mejor refleja dicho principio.



Figura 49. Principio estereoscópico de la fotogrametría.

4.1. PROCEDIMIENTOS DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICA ARTIFICIAL

Partiendo siempre de dos fotogramas que contemplen la misma zona desde dos puntos de vista distintos (zona de recubrimiento entre dos pares estereoscópicos), se puede observar el relieve de las siguientes formas:

- a. Por observación con líneas de *visión convergente*: Es el método más cómodo de observación. Con cada ojo se observa un fotograma según los siguientes métodos:
 - a.1. **Anaglifo** (Figura 50): Con ayuda de gafas coloreadas con los colores complementarios a los que se muestran las dos imágenes en la pantalla, se consigue que cada ojo vea sólo su imagen correspondiente.
 - a.2. **Polarización**: Es el más utilizado en restitución digital. La pantalla posee filtros de polarización que desvían cada imagen al ojo correcto.
 - a.2.1. Polarización con **una pantalla** (Figura 51).
 - a.2.2. Polarización con **dos pantallas** (**ZScreen**) (Figura 52).



Figura 50.
Estereoscopia por anaglifo.

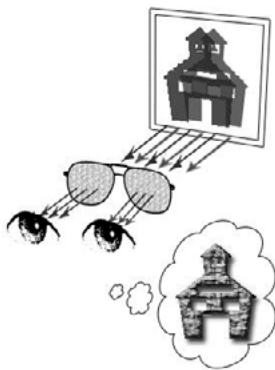


Figura 51.
Estereoscopia por polarización en una pantalla.



Figura 52.
Estereoscopia por polarización con dos pantallas.

- b. Por observación con líneas de *visión paralelas* (Figura 53). Es más cansado que el método convergente. Es el método que se utilizaba antiguamente con los estereoscopos de bolsillo.

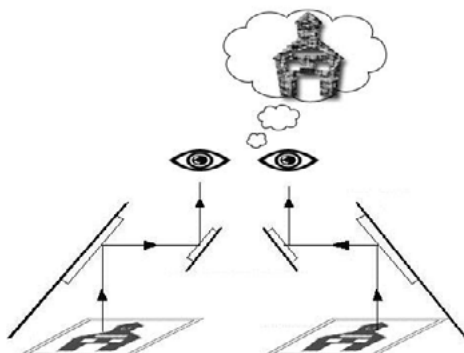


Figura 53. Estereoscopia paralela.

- c. Por *separación temporal* de las imágenes (*Figura 54*): Mediante unas gafas activas, se va mostrando en la pantalla las imágenes alternativamente. Esa alternancia está sincronizada con las gafas que tapan el ojo que no corresponde para que no la observe. Es un método que cansa más la vista que todos los restantes.



Figura 54. Estereoscopia por separación temporal

4.2. PARALAJE ESTEREOSCÓPICO

Se define como **paralaje**, el cambio de posición de la imagen de un punto en dos fotografías debido al cambio de posición de la cámara en el momento de la toma.

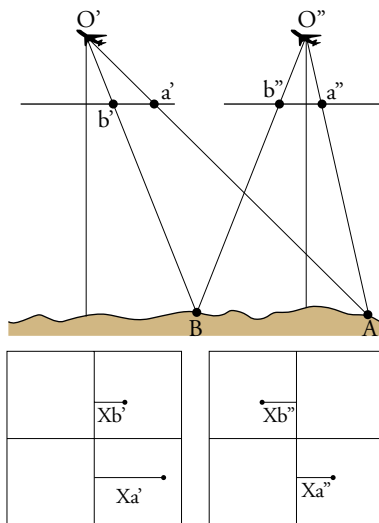


Figura 55. Paralaje estereoscópico.

Siguiendo la disposición de la *figura 55*, se llama paralaje a la siguiente cantidad:

$$Pa = xa' - xa'' \quad Pb = xb' - xb''$$

Ec. 8: Paralaje.

De esta forma se puede deducir la cota de cada punto respecto al plano de referencia:

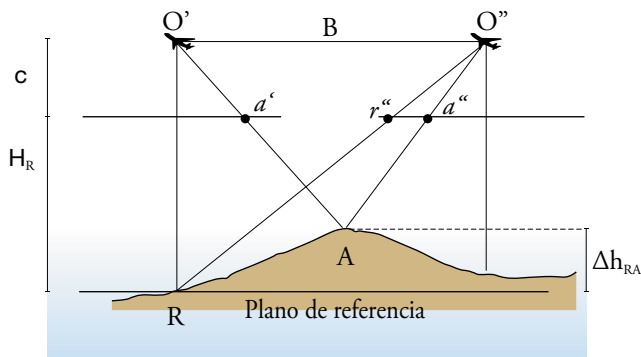


Figura 56. Relación Paralaje-Cota.

$$\text{Según la figura 56 } \frac{H_R}{B} = \frac{c}{P_R} \text{ siendo } P_R = xr''$$

Ec. 9: Relación entre nivel de referencia y paralaje.

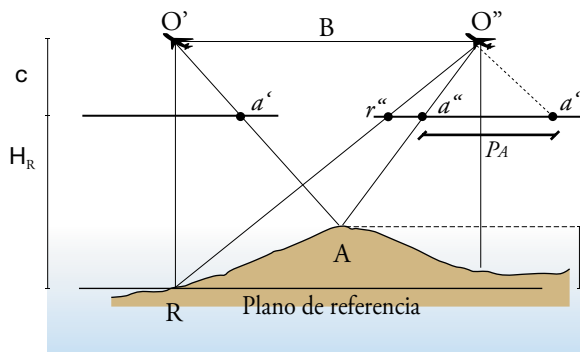


Figura 57. Relación Paralaje-Cota.

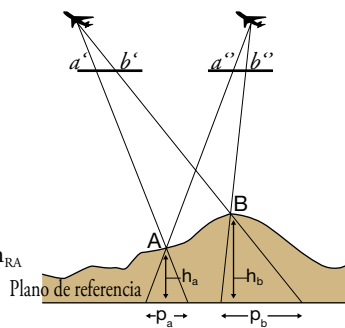


Figura 58. Relación Paralaje-Cota.

Para el punto A y observando la *figura 57*, entonces:

$$\frac{H_A}{B} = \frac{c}{P_A} \text{ siendo } P_A = xa' - xa''$$

Ec. 10: Relación entre cota y paralaje.

Lo que queremos obtener es el incremento de cota que hay entre el nivel de referencia y el punto A, quedando esa cantidad como:

$$\Delta H_{RA} = \frac{H_R \cdot \Delta P_{RA}}{P_A}$$

Ec. 11: Altura de un punto respecto al nivel de referencia.

Según se aprecia en la *figura 58*, la paralaje de cualquier punto se relaciona directamente con la elevación de ese punto y es mayor para elevaciones más altas que para elevaciones bajas, manteniendo un ángulo de vista constante.

5. CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría se puede clasificar según los siguientes aspectos:

a. En función del *instrumental* utilizado:

a.1. **Fotogrametría Analógica** (*figura 59*): Se miden fotografías analógicas en un equipo también analógico.

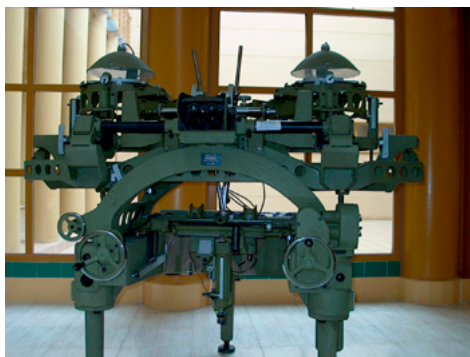


Figura 59. Restituidor Analógico.

a.2. **Fotogrametría Analítica** (*figura 60*): Se miden fotografías analógicas con técnicas computacionales.



Figura 60. Restituidor Analítico.



Figura 61. Restituidor Digital.

a.3. **Fotogrametría Digital** (*figura 61*): Medición de fotografías digitales en sistemas fotogramétricos digitales.

b. En función de la *distancia al objeto*:

b.1. **Fotogrametría Espacial** (*figura 62*): Medición en imágenes de satélite.



Figura 62. Fotogrametría Espacial.

b.2. **Fotogrametría Aérea** (*figura 64*): Medición en fotogramas aéreos.

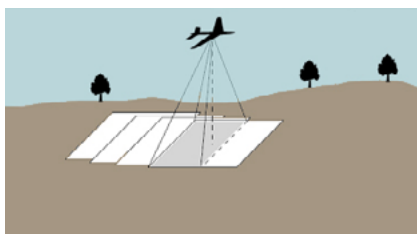


Figura 63. Fotogrametría Aérea.

b.3. **Fotogrametría Terrestre** (*figura 65*): Medición en fotogramas obtenidos desde la superficie terrestre.

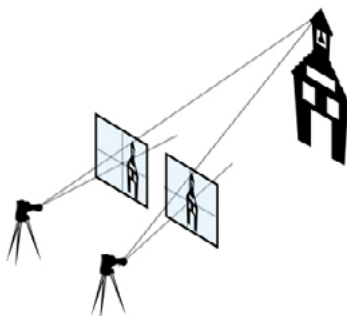


Figura 64. Fotogrametría Terrestre.

6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FOTOGRAMETRÍA RESPECTO A LA TOPOGRAFÍA CLÁSICA

La primera ventaja, se ha explicado en el apartado anterior y concierne al tema económico, aunque siempre dependiendo de la superficie a levantar.

Otras **ventajas** son:

- Levantamientos más rápidos, en la fase de restitución en sí. Hay que tener en cuenta que a veces el vuelo fotogramétrico se demora si la climatología no es la adecuada.
- Si el terreno es de difícil acceso, la fotogrametría es la técnica adecuada, puesto que no se necesita acceder a todo el terreno. Sólo habría que visitar aquellas zonas en las que se emplacen los puntos de apoyo.
- Registro continuo de todo el terreno. Todos los detalles del terreno quedarían registrados en la fotografía. Sin embargo, mediante un levantamiento topográfico, sólo se dispondría de coordenadas de los puntos medidos, que supondría un número bastante limitado con respecto a la totalidad del terreno.

La única **desventaja** del levantamiento de planos o mapas por medios fotogramétricos aéreos sería:

- Ocultamiento de elementos por la vegetación. Si el terreno tiene demasiada vegetación, impide la visión de elementos que estén por debajo de ella. En ese caso, si es necesario el registro de coordenadas de esos elementos, se haría necesaria una medición en campo de dichos elementos, por topografía clásica.

7. APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

En el marco general de la Ingeniería existen cuatro grandes grupos de actuaciones donde se utilizan la fotogrametría:

- a. Vías de comunicación. Para el estudio de establecimiento de trazados.
- b. Planificación territorial. En el planeamiento urbanístico y ordenación del territorio.
- c. Hidrografía. Estudio de cuencas, deformaciones de presas, etc.
- d. Ejecución de movimiento de tierras. Medición de volúmenes removidos.

CAPÍTULO 2

IMAGEN FOTOGRÁFICA DIGITAL

1. ANTECEDENTES

Hoy en día, casi todas las imágenes fotogramétricas que se utilizan tienen formato digital, ya que la fotogrametría digital es la que más auge ha adquirido en estos tiempos.

Dichas imágenes digitales lo son, o bien por su propia naturaleza (han sido capturadas por un sensor digital), o bien porque han sido transformadas a un formato digital mediante un escáner fotogramétrico.



Figura 65. Escáner Fotogramétrico.

Por esa razón, nos centraremos en ese tipo de imágenes en este capítulo, describiendo tanto su estructura, como su tratamiento.

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 valor denominado Nivel Digital (Nd) que estará representado por un nivel de gris en pantalla (*Figura 66*).

Esta composición de la imagen digital es la que corresponde con una imagen mono-banda, 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 67*, están compuestas por tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el verde (Green) y otra para el azul (Blue).

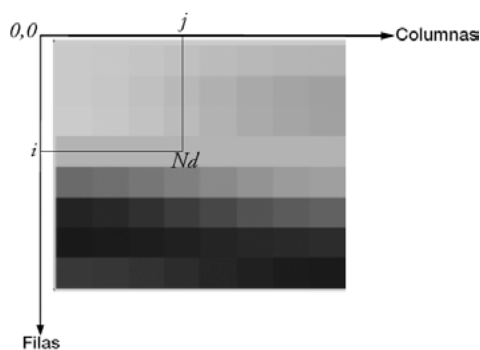


Figura 66. Imagen digital.

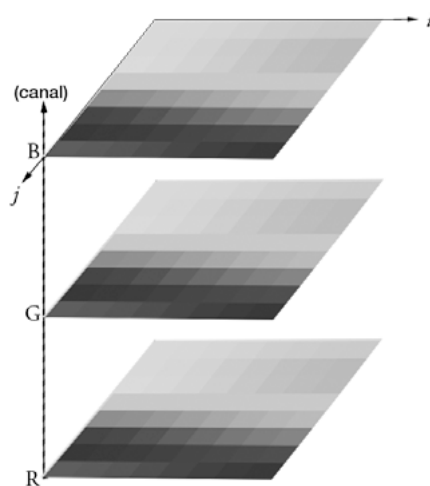


Figura 67. Imagen digital en RGB.

El almacenamiento de estas imágenes se triplica en espacio, puesto que cada matriz tiene sus propios niveles digitales.

2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN DIGITAL

a. Resolución

La calidad de una imagen digital depende del tamaño del píxel, y es la denominada **resolución**. Si ese tamaño 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 el caso de imágenes aéreas, la resolución se denomina espacial y tiene correspondencia directa con el tamaño del píxel en el terreno (GSD⁷). La *figura 68* muestra gráficamente a qué se refiere el término GSD.



Figura 68. GSD.

b. Dimensión

La **dimensión** de la imagen indica el ancho y el alto de la imagen. Se suele expresar en cm, pulgadas o píxeles.

c. 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 69*, 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.

Profundidad	Colores 2^n
1 bit	2
4 bit	16
8 bit	256
16 bit	65536
32 bit	4294967296

Tabla 4. Profundidad de color

⁷ Ground Sample Distance.

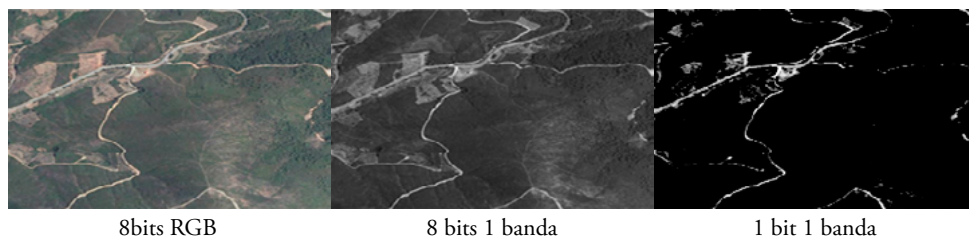


Figura 69. Profundidad de color.

2.2. 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. 12: Tamaño de una imagen (bits)

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. 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 70*, de 1 bit (B/N):

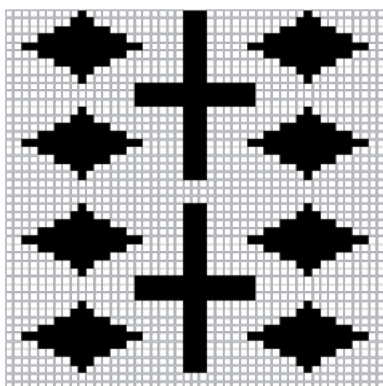


Figura 70. Ejemplo de imagen b/n a comprimir.

La primera fila de la imagen tendría los siguientes valores:

BBBBBBBBBNBBBBBBBBBBBBNNNBBBBBBBBBBBBNBBBBBBBB

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.

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, sufriendo por tanto, 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.

3.1. TRANSFORMACIÓN DISCRETA DE COSENOS (TDC)

Es el método de compresión que utiliza el formato JPG, y es un algoritmo de compresión con pérdida.

La TDC consigue concentrar la mayor parte de la información en unos pocos coeficientes transformados. De este modo, sólo hay que codificar esos pocos coeficientes para obtener una buena representación de todo el bloque de la imagen.

El objetivo de la TDC es traducir las variaciones de intensidad a componentes de frecuencia con el objetivo final de poder eliminar las altas frecuencias (el ojo humano es poco sensible a ellas) pero conservando las bajas frecuencias:

- Componente de alta frecuencia: cambios de brillo grandes en áreas pequeñas.
- Componente de baja frecuencia: cambios de brillo pequeños en áreas grandes.

Como se divide la imagen en bloques de 8x8 píxeles y se aplica la TDC sobre bloques y no sobre la imagen global, se pueden independizar los bloques entre sí. Realizando varias compresiones sucesivas, se observaría la separación que existe entre ellos tal y como se muestra en la *figura 71*.

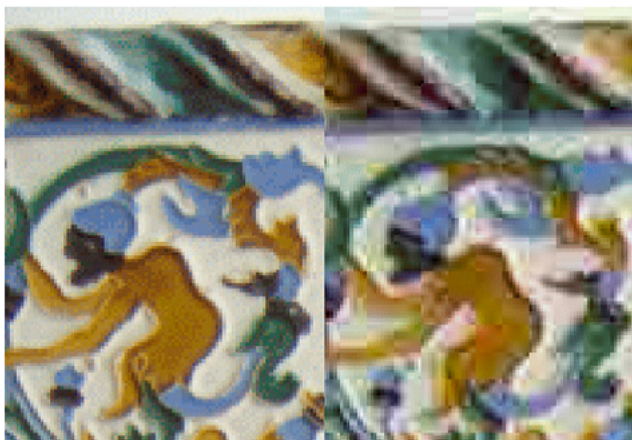


Figura 70. Efectos de la compresión jpg sucesiva de una imagen.

3.2. LEMPEL ZIV WELCH (LZW)

Es un algoritmo de compresión sin pérdida que se utiliza en formatos como GIF o TIFF que consiste en lo siguiente:

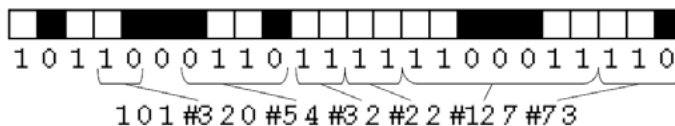


Figura 71. Compresión LZW

Cuando se produce una secuencia de píxeles similar a otra anterior, se sustituye dicha secuencia por una clave de dos valores: Los correspondientes a cuantos pasos se repiten y cuantos datos se repiten.

3.3. TRANSFORMACIÓN DISCRETA WAVELET (TDW)

Se emplea en el formato ECW patentado por la casa comercial ERViewer.

Este algoritmo representa la imagen según el concepto de multirresolución (Figura 73). Descompone la imagen original de manera iterativa generando series de imágenes (2x2 subimágenes) con la mitad de resolución en cada nivel.

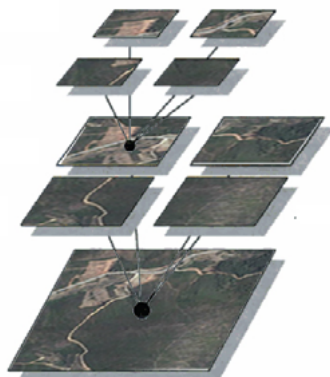


Figura 73. Compresión TDW.

El nivel de descomposición de la imagen la indica el usuario y se codificará el nivel máximo, que tendrá un código más reducido que el de la imagen original.

El algoritmo podrá reproducir la imagen original al descomprimirla, sólo hasta un cierto nivel de descomposición de la imagen. De este modo, es un algoritmo sin pérdidas hasta un ratio de compresión de 2:1 o 3:1, para compresiones mayores, sí que tendría pérdidas.

4. PIRÁMIDE DE IMÁGENES

Una **pirámide** de imágenes es una herramienta que utilizan la gran mayoría de los restituidores digitales, que ahorra en gran medida el proceso de cálculo en muchas de sus fases.

La pirámide de imágenes no es una técnica de compresión, pero sí que es un método de reducción de los procesos de cálculo y por consiguiente, del volumen de información con la que los restituidores trabajan.

La pirámide se basa en la multirresolución. La base de la pirámide será la imagen a resolución original y posteriormente se van almacenando en memoria imágenes a resoluciones más bajas consecutivamente.

Los procesos de búsqueda en una imagen piramidal, tal y como se muestra en la *figura 74*, se realizan desde las resoluciones más bajas hasta las más altas. Sin necesidad de explorar la totalidad de la imagen.



Figura 74. Búsqueda progresiva en una pirámide de imágenes.

5. FORMATOS GRÁFICOS DE LAS IMÁGENES FOTOGRAMÉTRICAS DIGITALES

Se define **formato** como el método estandarizado para la organización y almacenamiento de los datos de la imagen.

No todos los formatos estándar de imágenes se utilizan en fotogrametría, y al contrario, algunos formatos fotogramétricos no se utilizan en otros campos.

Los formatos más utilizados en fotogrametría son:

TIFF: comprimido o sin comprimir es el formato más implantado en fotogrametría.

ECW: con ratio de compresión pequeño, se utiliza sobre todo en la generación de ortofotos.

SID: formato comprimido similar al ECW.

Y todos los formatos propios de cada sistema fotogramétrico digital, tales como RSW (Photomod) PIX (PCI geomatic) IMG (Erdas imagine)...

6. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Antes de comenzar con el proceso fotogramétrico, se puede realizar un pre-procesamiento de las imágenes con el fin de mejorar la calidad visual, de las mismas.

Antes de nada, conviene definir algunos conceptos necesarios para comprender en qué consiste el tratamiento digital de imágenes.

6.1. HISTOGRAMA DE UNA IMAGEN

El **histograma** de una imagen digital con niveles de gris, es una función discreta que da una idea del valor de la probabilidad de que aparezca un determinado nivel de gris. Esta función, para todos los valores de gris, proporciona una descripción global de la apariencia de la imagen.

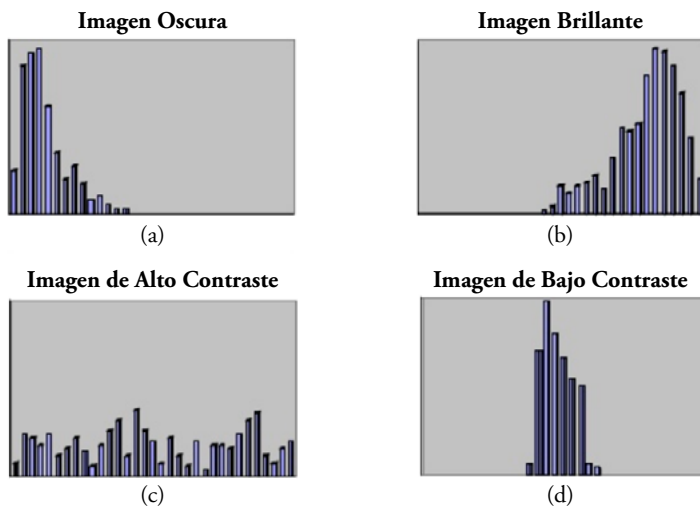


Figura 75. Histogramas.

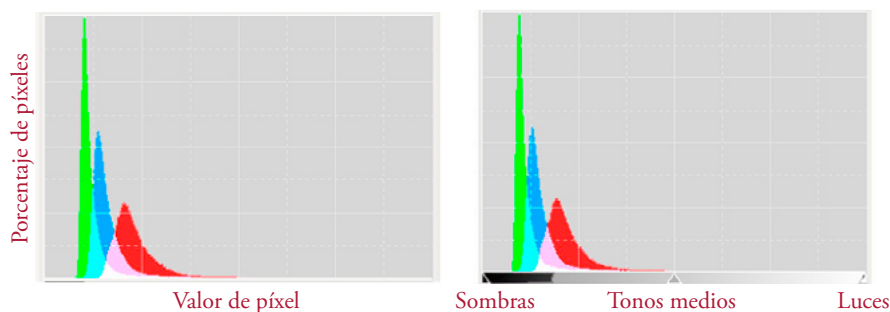


Figura 76. Histogramas de tres canales.

Cada imagen tiene su propio histograma. Pero, como regla general, se considera que una imagen tiene un buen contraste si su histograma se extiende ocupando casi todo el rango de tonos. Siguiendo esta premisa, la imagen correspondiente al histograma (c) de la *figura 75*, sería la imagen con mejor distribución de valores.

Una imagen RGB vendrá representada por su correspondiente histograma en cada uno de sus canales (*Figura 76*).

Las técnicas de tratamiento digital más empleadas en el pre-procesamiento de las imágenes son:

6.2. TÉCNICAS DE REALCE DE LA IMAGEN

La **ecualización del histograma** es una operación orientada a repartir de manera uniforme los niveles de gris entre los píxeles de la imagen. Este procedimiento asigna mayor rango de nivel digital de la imagen de salida a los niveles digitales más frecuentes en la imagen de entrada. En consecuencia, en la imagen realzada quedan mejor contrastados los niveles de gris ocupados por más celdillas en la imagen primitiva. En general se consigue un histograma mejor distribuido, con mejor separación entre los Nd más frecuentes de la imagen.

Algunas herramientas de realce de imágenes poseen la capacidad de trabajar con curvas de color o nivel de gris. Curvas como la mostrada en la *figura 77*, permiten transformar los histogramas con una precisión mayor, ya que se pueden aplicar varios puntos de control desde cualquier lugar en el histograma.

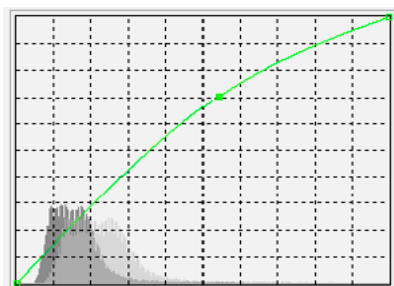


Figura 77. Manejo del histograma con la curva de color.

De este modo cada manipulación de la curva producirá un efecto en la imagen:

<p>Hacer la curva más horizontal: El contraste se reduce.</p>	<p>Hacer la curva más vertical: Se incrementa el contraste.</p>	<p>Curvar la línea: las luces y las sombras se incrementan, pero el contraste es ligeramente menor</p>

Tabla 5. Posibles cambios en el histograma de una imagen

6.3. FILTROS

Un **filtro** es un proceso matemático que consiste en aislar componentes de interés, reforzando o suavizando los contrastes espaciales de nivel de gris que integran una imagen. Es decir, se trata de transformar los niveles digitales originales de cada píxel para que se asemejen o diferencien más de sus vecinos.

Tal y como se muestra en la *figura 78*, un filtro consiste en una matriz que se desplaza por toda la imagen original y que tiene en cuenta los valores de los píxeles vecinos para asignar el *Nd* del píxel en la imagen filtrada.

Dependiendo del tipo de matriz con la que se filtre la imagen original, se producirán unos efectos u otros en la imagen filtrada.

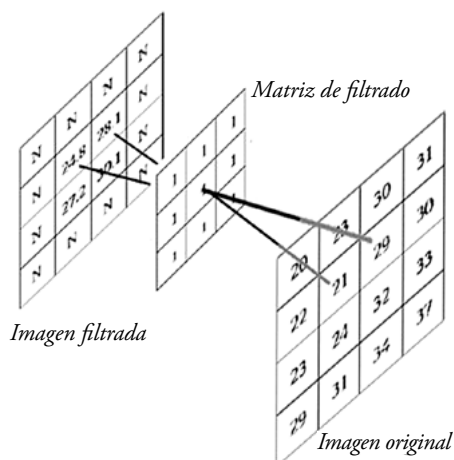


Figura 78. Filtro matricial.

a. Filtros suavizantes y de paso bajo

Se emplean para hacer que la imagen aparezca algo borrosa y también para reducir el ruido. Trata de asemejar el nivel de gris de cada elemento al de los adyacentes consiguiendo un suavizado de los ruidos de fondo.

Entre los filtros suavizantes se encuentran el filtro de la mediana (*Figura 79*), de la media, el difuminado lineal y el difuminado gaussiano (El valor de cada punto es el resultado de promediar con distintos pesos los valores vecinos a ambos lados de dicho punto).

b. Filtros realzantes y de paso alto

Se utilizan para reforzar el contraste en la imagen e intensificar detalles que están difuminados (*Figura 80*).

Algunos de estos filtros son los de enfoque, enfocar bordes, Sobel (calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada píxel)...



Figura 79. Ejemplo de filtro suavizante.

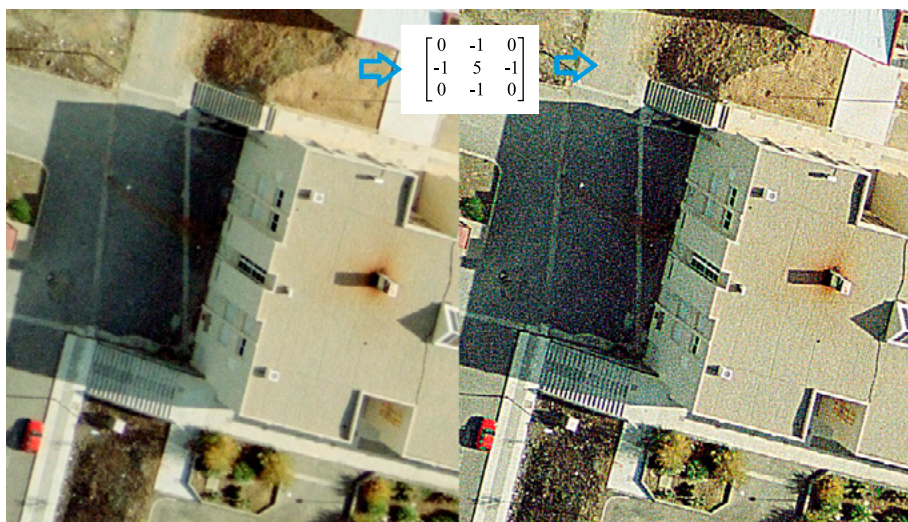


Figura 80. Ejemplo de filtro realzante.

6.4. TIPOS DE REALCES PERMITIDOS EN FOTOGRAMETRÍA

Las imágenes fotogramétricas pueden ser mejoradas, pero manipulándolas sólo hasta un determinado límite. No se puede abusar del retoque puesto que un manipulado excesivo podría conllevar un falseado de los datos métricos originales.

Como ejemplo, se adjunta la sección correspondiente al realce que se indica en un pliego de condiciones técnicas para la elaboración de cartografía por métodos fotogramétricos.

“La unidad para el equilibrado radiométrico será la zona de trabajo.

Se deberá garantizar continuidad cromática entre todas las hojas de las zonas de trabajo (“ortofoto continua”) para las 3 bandas RGB suministradas, preservando el color natural sin dominantes.

Se eliminarán de la imagen los efectos producidos por “hot spot”⁸, vignetting⁹ y cualquier otro que empeore la calidad de la imagen.

No se admitirán imágenes que tengan una saturación superior a 0.5% para cada banda en los extremos del histograma.

En caso de ser necesario, posterior a la información de la ortofoto, se podrán aplicar, con moderación, técnicas de tratamiento digital para la mejora visual, tal como expansión del contraste, balance de color, filtro de realce de bordes u otras que se consideren adecuadas.”



Figura 81. Viñeteado de las imágenes (fuente: Racurs).



Figura 82. Efectos de la reflexión del sol en el agua (Fuente: Racurs).

⁸ Hot spot: Una zona considerablemente más clara que el resto de la imagen (Figura 82)

⁹ Vignetting: Viñeteado (Figura 81).

CAPÍTULO 3

CÁMARAS FOTOGRAMÉTRICAS

1. INTRODUCCIÓN

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.

No obstante, estudiaremos ambos tipos de cámaras para, posteriormente compararlas y detallar sus ventajas e inconvenientes.

2. CÁMARAS FOTOGRAMÉTRICAS ANALÓGICAS

Las cámaras fotogramétricas analógicas son aquellas cámaras en las que la imagen se registra de forma instantánea en una película fotográfica.

2.1. COMPONENTES DE LAS CÁMARAS ANALÓGICAS

Las tres partes fundamentales de las cámaras se pueden distinguir en la *figura 83* y son:

- **Almacén o magazín:** Contiene la película y sus correspondientes mecanismos de avance y planeidad de la película.
- **Cuerpo:** une el magazín y el conjunto del objetivo.
- **Conjunto del objetivo:** que es el que almacena el sistema óptico, el diafragma, el obturador, los filtros... La intersección del eje óptico, con el plano focal indicará la posición del *punto principal* de la imagen.

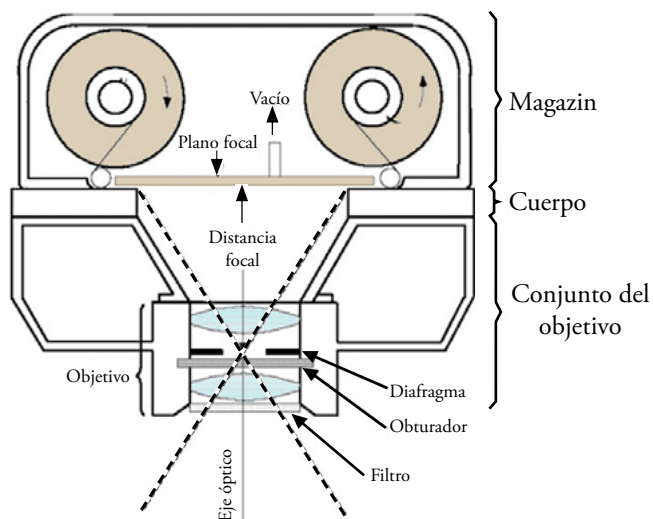


Figura 83. Componentes de una cámara fotogramétrica analógica.

Las cámaras se emplazan en el avión sobre una **montura** que normalmente, permite corregir la orientación y nivelación de la cámara.

Las últimas generaciones de monturas, incorporan plataformas **giroestabilizadas** (Figura 84), que registran los giros de la cámara durante el vuelo corrigiendo su verticalidad y un sistema **FMC**¹⁰ que reduce el movimiento aparente y el arrastre del terreno moviendo la cámara hacia atrás. Este FMC se hace imprescindible cuanto menor es la altura de vuelo y mayor la velocidad del avión.

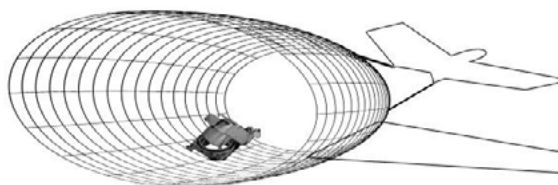


Figura 84. Plataforma de la cámara en el avión.

Las cámaras analógicas tienen un formato estándar de 23x23cm, y contienen en su plano focal, un marco en el que se representan:

¹⁰ Forward Motion Compensation.

- a. **Marcas fiduciales** (*Figura 85*). Que son fundamentales para comenzar el proceso fotogramétrico con la orientación interna de los fotogramas. El número de marcas fiduciales suele ser 8 distribuidas 4 en las esquinas y 4 en las partes centrales. Poseen coordenadas exactas, en el sistema de coordenadas imagen, siendo este uno de los datos incluidos en el certificado de calibración de la cámara.



Figura 85. Marca fiducial.

Centro fiducial de la imagen se define como el punto de intersección de las líneas que unen las marcas fiduciales.

El centro fiducial y el punto principal, no tienen por qué coincidir. Este desplazamiento viene indicado también en los parámetros de calibración de la cámara.

- b. **Información marginal:** Tal y como se observa en la *figura 86*, se suele plasmar información acerca del nombre del proyecto, organismo responsable del trabajo, fecha y hora de la toma, nombre de la cámara, distancia focal calibrada, escala del fotograma, número de pasada, número del fotograma, altitud aproximada y nivel esférico, en algunos casos.



Figura 86. Fotograma analógico.

3. CÁMARAS DIGITALES

En una cámara digital, el plano focal de la cámara es sustituido por un sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen (CCD¹¹)

La forma de disposición de los CCD da lugar a dos tipos de cámaras fotogramétricas digitales.

3.1. CÁMARAS LINEALES

La cámara dispone de tres líneas paralelas de 12K¹² sensores, transversales a la dirección de vuelo. Dichas líneas tienen diferentes inclinaciones: delantera, nadiral y posterior dispuestas como indica la *figura 87*.

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

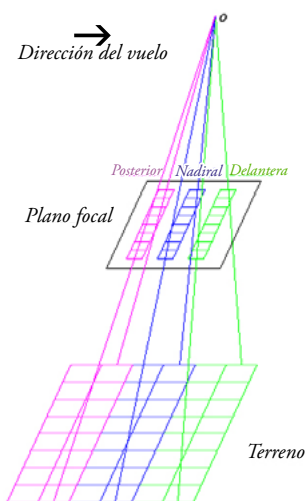


Figura 87. Cámara fotogramétrica digital lineal.

De este modo, tras la realización de una pasada, lo que se obtienen son tres bandas continuas de imágenes (*Figura 88*) compuestas por cada una de las líneas capturadas por los sensores.

¹¹ Charge-Coupled Device

¹² Kilobyte

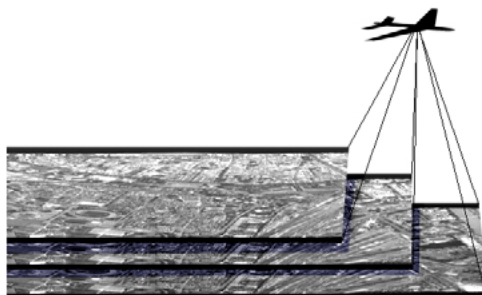


Figura 88. Toma fotogramétrica de una pasada con cámara lineal.

Por tanto, una gran ventaja de este tipo de cámaras es que todos los puntos del terreno aparecerán en tres imágenes. Dicho registro conlleva que todos los puntos son capturados bajo la dirección nadiral del avión (*Figura 89*). Al capturar todo el terreno de forma vertical, se favorece en gran medida a la generación de las ortofotos verdaderas, que veremos en el capítulo 5, puesto que los elementos elevados no aparecerán desplazados en la fotografía.

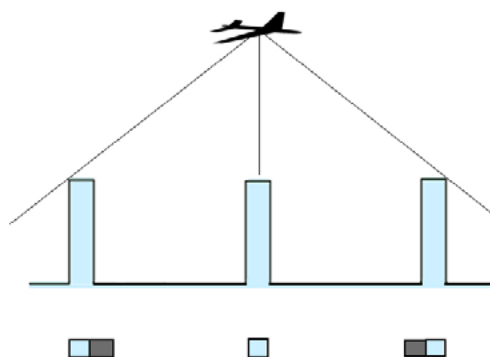


Figura 89. Desplazamiento en puntos no nadirales.

Sin embargo, cada línea tendrá su propio centro de proyección y no se podrá considerar como una toma fotogramétrica con geometría típica. Este aspecto complica bastante los cálculos del proceso fotogramétrico. Por ello, este tipo de cámaras necesita estar complementada por un sistema de posicionamiento GPS (*Figura 90*) y sistemas inerciales INS/IMU¹³ que registren datos y coordenadas de cada línea.

¹³ Inertial system /Inertial Measurement Unit

Además, los restituidores han de estar preparados para trabajar con este tipo atípico de geometría, premisa que en la actualidad casi todos los restituidores del mercado cumplen.

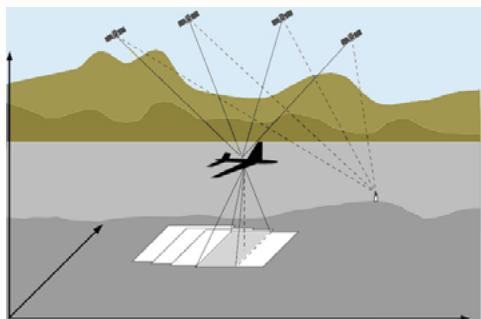


Figura 90. GPS en el vuelo.



Figura 91. Cámara Leica ADS40.
(fuente: Leica Geosystems)

La cámara lineal del mercado por excelencia es la de la *figura 91*.

3.1. CÁMARAS MATRICIALES

Se puede apreciar en la *figura 92* que este tipo de sensores es similar a las cámaras aéreas analógicas en cuanto a composición. Las cámaras matriciales constan de $1K \times 1K$ elementos sensoriales (1024×1024 píxeles), $2K \times 2K$, $3K \times 2K$, $4K \times 4K$, $4K \times 7K$, $7K \times 9K$, $5K \times 10K$, $9K \times 9K$. De ellos, los más habituales son los de $3K \times 2K$ y $4K \times 4K$, que al igual que las lineales, también pueden capturar en otros rangos del espectro electromagnético.

A este tipo de sensores también se les dota de sistemas GPS e INS durante el vuelo, pero dichas dotaciones no son imprescindibles como en el caso anterior, ya que la geometría de la

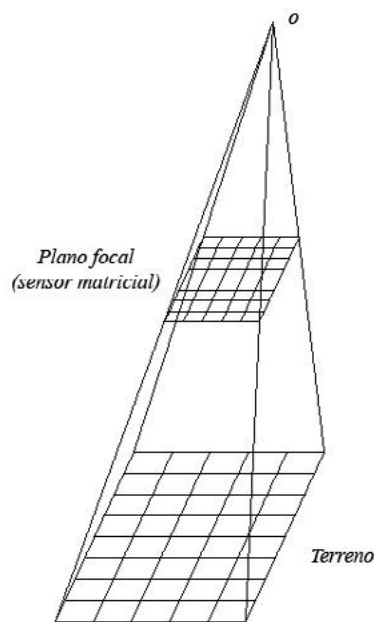


Figura 92. Geometría de la toma con cámara digital matricial.

toma, tal y como se puede observar en la *figura 94*, es igual a la de una cámara analógica. En dicha *figura 94* se puede apreciar que a pesar de que las cámaras sean multi-objetivo, la geometría de la toma sigue siendo la habitual.

Una de las cámaras matriciales más actuales es la mostrada en la *figura 93*. Combina varios objetivos en su plano focal, produciendo imágenes matriciales parciales que se unifican en una imagen completa en postproceso, de 17310 x 1131 píxeles.



Figura 93. Cámara Ultracam XP de Vexcel.
(Fuente: Vexcel Corporation)

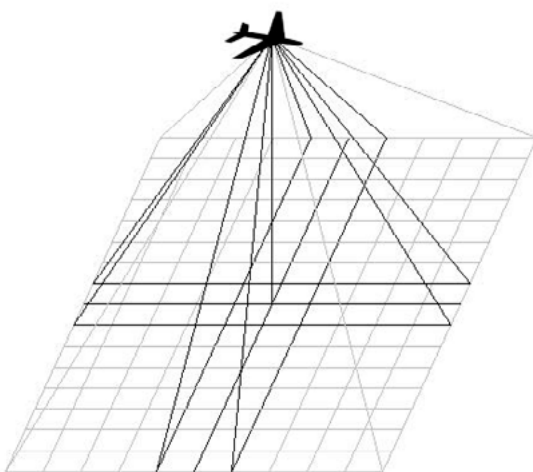


Figura 94. Toma fotogramétrica multi-objetivo matricial.

4. COMPARACIÓN DE AMBAS CÁMARAS

Las ventajas de las cámaras digitales con respecto a las analógicas son muchas. La principal es que, al no necesitar ser digitalizadas para trabajar con los restituidores digitales, se evita un proceso en el que se introducen errores, tanto geométricos como radiométricos, que influyen en gran medida en la calidad de los productos fotogramétricos finales. Otras cuestiones no menos importantes son la vulnerabilidad de los negativos con el paso del tiempo, la necesidad de un almacenaje adecuado, etc.

Ya dentro del formato digital, la elección de la cámara es una cuestión complicada. No obstante, no suele ser el usuario el que realice dicha elección ya que ésta es una cuestión inherente a la empresa que elijamos para el vuelo fotogramétrico. Cada empresa trabaja normalmente, sólo con un tipo de cámara.

Se muestran a continuación las ventajas y desventajas de ambos sistemas.

Lineales:

Ventajas	Desventajas
Registro continuo de todo el terreno desde tres puntos de vista.	Sistema GPS: dependiente de estaciones en tierra a menos de 30Km.
Mayor resolución (<i>Figura 95</i>).	El objetivo ha de estar abierto permanentemente.
No necesitan mucha corrección radiométrica.	Es necesario implementar un nuevo flujo de trabajo (ya no existen modelos estereoscópicos) y de software.

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de las cámaras lineales

Matriciales:

Ventajas	Desventajas
Su geometría es igual a la de las fotografías analógicas	Tienen menor resolución.
No necesitan sistemas GPS	

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de las cámaras matriciales

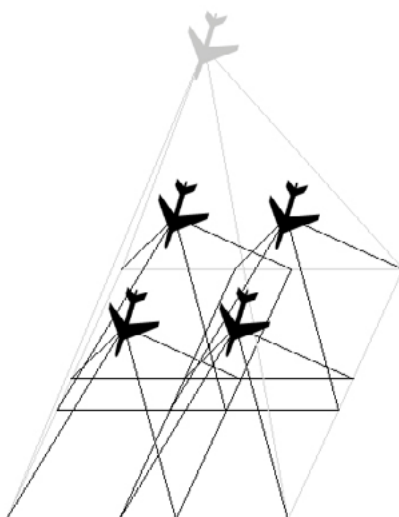


Figura 95. Ventaja de las cámaras lineales con respecto a las matriciales.

CAPÍTULO 4

PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

1. ANTECEDENTES

Como vimos en capítulos anteriores, la fotogrametría en la actualidad, se realiza mediante procedimientos digitales, en la inmensa mayoría de los casos. Por ello, en este capítulo nos centraremos en explicar el procedimiento fotogramétrico digital, que difiere, en algunas fases, de los antiguos procedimientos analíticos.

2. INTRODUCCIÓN

Se entiende por **proceso fotogramétrico** a todas las fases consecutivas que conllevan la producción cartográfica a partir de fotografías, generalmente aéreas.

El proceso comienza con la toma fotográfica de la zona y culmina con la obtención de coordenadas tridimensionales de dicha zona. Dichas coordenadas, posteriormente, pueden dar lugar a distintos productos tales como planos cartográficos, modelos digitales de elevaciones, ortofotos...

Este proceso conlleva trabajos de campo y de gabinete encadenados. Los errores y precisiones de cada una de las fases se acumulan a lo largo de todo el proceso. De tal manera que la calidad del resultado final depende de la calidad de todas y cada una de las fases.

3. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL

El **problema fundamental de la fotogrametría** consiste en la reconstrucción de la posición de un par de fotogramas tal y como se hicieron en el momento de la toma, para así, por analogía geométrica poder medir coordenadas tridimensionales del terreno capturado en la zona de recubrimiento.

En principio, los datos de partida son dos o más fotogramas en formato digital. Pero además se hace necesario obtener coordenadas en campo de puntos con el fin

de, por un lado orientar el trabajo en un sistema de referencia en concreto y por otro lado, obtener una comprobación del mismo para poder asegurar la calidad del producto final.

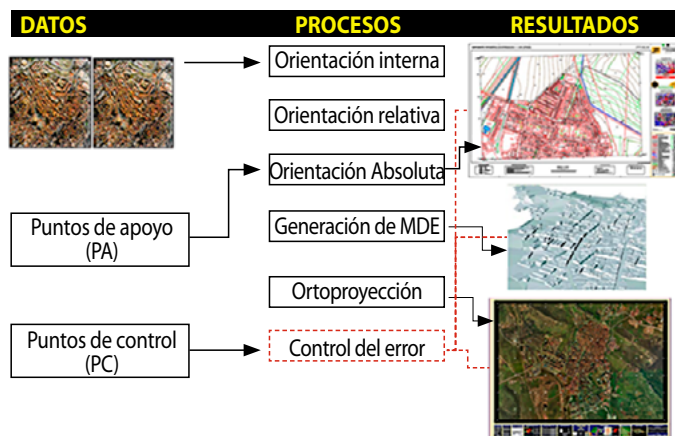


Figura 96. Fases del proceso fotogramétrico digital.

3.1. ORIENTACIÓN INTERNA

La **orientación interna** en fotogrametría digital consiste en un proceso de transformación del sistema de coordenadas píxel (fila, columna) al sistema de coordenadas de la cámara expresadas en mm y referidas a un sistema cartesiano 3D cuyo origen está en el centro de proyección de la cámara. La diferencia entre los dos sistemas de coordenadas se puede apreciar en la *figura 97*.

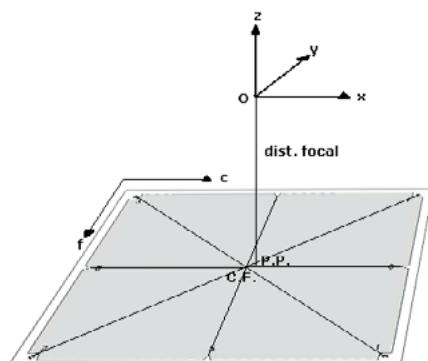


Figura 97. Transformación de coordenadas en la orientación interna.

Además, en este proceso se corrigen los siguientes errores:

- El **punto principal** no coincide con el centro fiducial (en el caso de fotografías analógicas) (Figura 98).

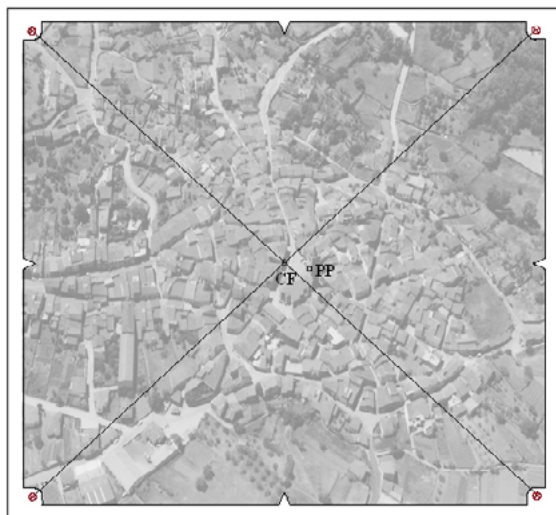


Figura 98. Centro fiducial y punto principal.

- La **película fotogramétrica** ha sufrido deformación (en el caso de fotografías analógicas).
- **Distorsiones del objetivo.** Todos los objetivos tienen una distorsión (figura 99), que viene cuantificada en el certificado de calibración de la cámara. En algunos casos es positiva y en otra es negativa.

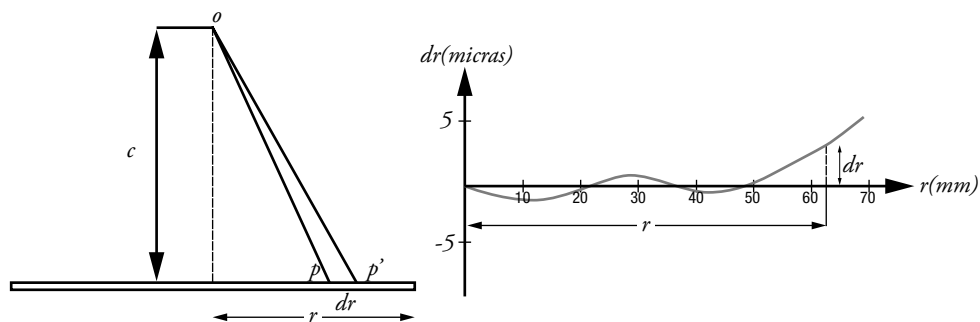


Figura 99. Efecto de las distorsiones del objetivo

- La **refracción atmosférica**. Tal y como se observa en la *figura 100*, hace que la imagen de los puntos aparezca, en los fotogramas, más alejada del centro de lo que en realidad le corresponde.

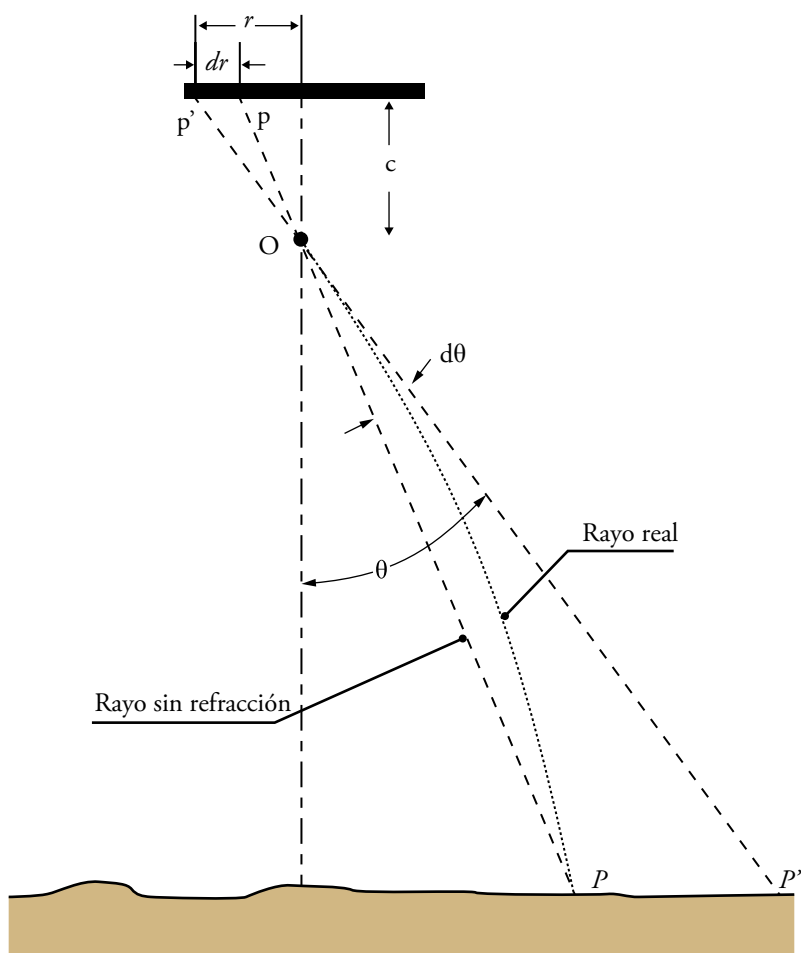


Figura 100. Efecto de la refracción atmosférica.

- La **esfericidad terrestre**. Produce un acercamiento de los puntos al centro del fotograma, como se observa en la *figura 101*.

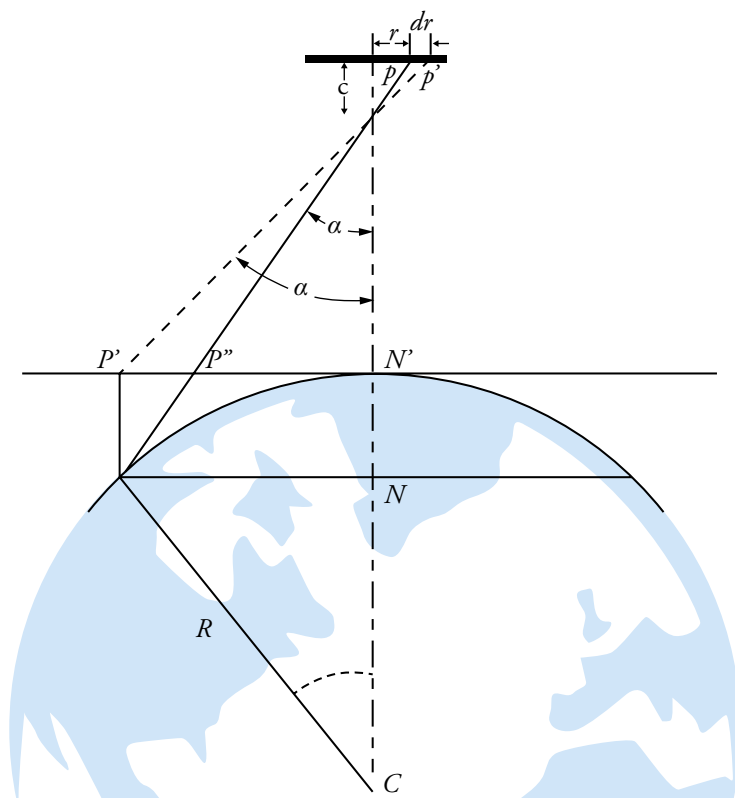


Figura 101. Efecto de la esfericidad terrestre.

Cabría ahora distinguir el proceso a seguir en la orientación interna, si se trata de imágenes analógicas o digitales.

a. Orientación interna con cámaras analógicas

La orientación interna de imágenes capturadas con este tipo de cámaras se realiza en dos pasos.

En primer lugar, se introducen los datos de calibración de la cámara:

- Distancia focal calibrada.
- Distorsiones del objetivo.
- Coordenadas de las marcas fiduciales en el sistema de coordenadas de la cámara.

Posteriormente se procede a medir coordenadas de las marcas fiduciales en el sistema de coordenadas imagen.

De este modo, se conocen las coordenadas de las marcas fiduciales en los dos sistemas de coordenadas. En el caso del sistema de coordenadas píxeles, porque las medimos y en el caso del sistema cámara, porque nos las dan en el certificado de calibración.

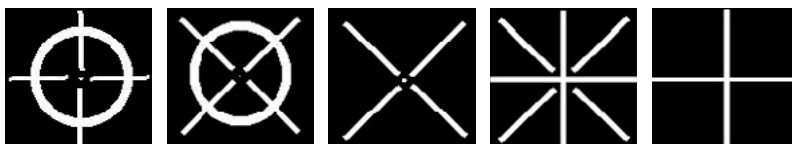


Figura 102. Patrones estándar de marcas fiduciales.

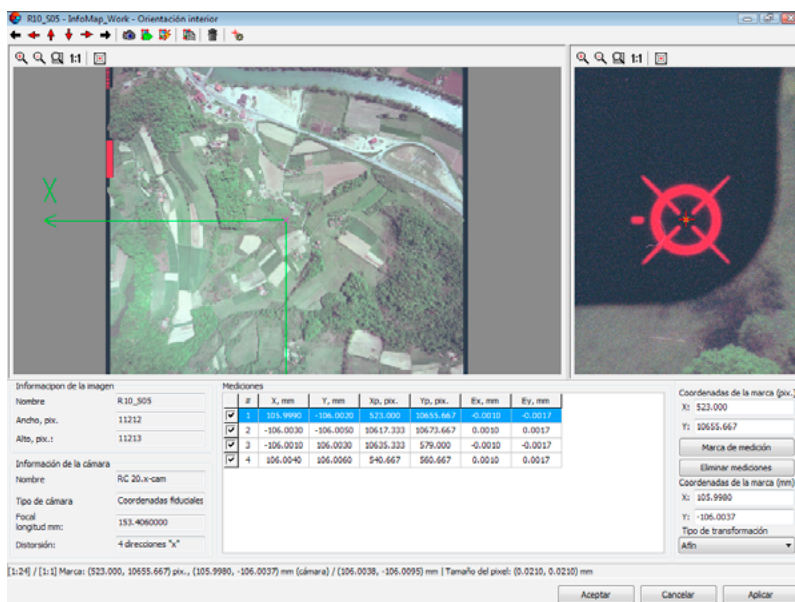


Figura 103. Proceso de orientación interna digital.

Con ambos conjuntos de coordenadas (Figura 103), se calcularán los parámetros de transformación entre los dos sistemas, aplicándose los a toda la imagen.

Esta transformación puede ser afín o proyectiva. No procederemos en este texto a detallar matemáticamente la diferencia entre ellas, puesto que existen gran variedad

de trabajos que las explican pormenorizadamente. Será elección del usuario el elegir entre una u otra a la hora de trabajar, en función de las exactitudes y precisiones requeridas.

El proceso de medición de las marcas fiduciales en los restituidores digitales de última generación suele ser **automático**. En la gran mayoría de los casos, el ordenador tiene una serie de patrones de las marcas fiduciales y las localiza mediante técnicas de correlación automática. Algunos patrones estándar son los que se muestran en la *figura 102*.

En otros casos, la orientación interior no es tan automática, puesto que es el operador el que tiene que indicar el centro de cada una de las marcas fiduciales.

La orientación interior se considera **semiautomática** si el operador indica manualmente sólo las marcas fiduciales de la primera fotografía del proyecto. Si el operador señala manualmente todas las marcas de todas las fotos, se considera **manual**.

b. Orientación interna con cámaras digitales

La orientación interna de las imágenes adquiridas con cámara digital consiste únicamente en la determinación de la posición del punto principal de la foto, con respecto al centro de la imagen digital (fila, columna).

Estas imágenes carecen de marcas fiduciales, con lo que el proceso es completamente automático. Lo único que hay que determinar son los parámetros de calibración de la cámara (*Figura 104*).

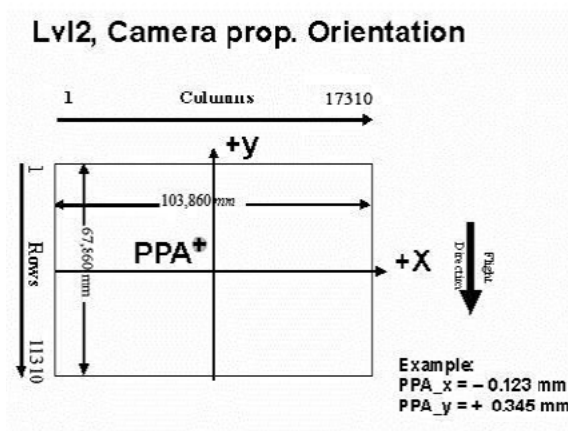


Figura 104. Orientación interna con cámaras digitales.

3.2. ORIENTACIÓN RELATIVA

La **orientación relativa** es la fase del proceso en la que se relacionan geométricamente las imágenes estereoscópicas, formándose el modelo estereoscópico (*figura 105*).

Esta fase consiste en identificar puntos homólogos en cada fotografía (*Figura 109*), para posteriormente reconstruir los haces y generar el modelo.

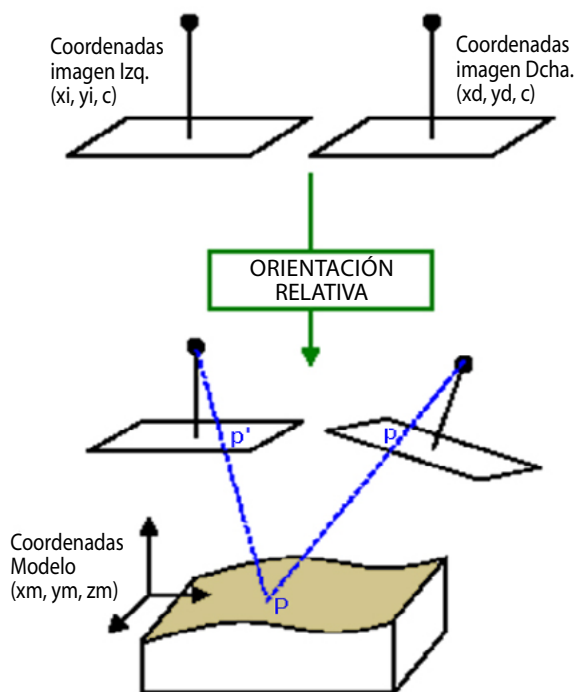


Figura 105. Orientación relativa.

La reconstrucción de los haces se hace por la **condición de coplaneidad**, que es la que obliga a que se encuentren, los dos centros de proyección los puntos de imágenes homólogos y el punto terreno en un único plano, tal y como se muestra en la *figura 106*.

La orientación relativa se habrá realizado correctamente si se produce la intersección de todos los rayos homólogos. El mínimo número de puntos de intersección para lograr la formación del modelo es de 6 distribuidos según *Von Grüber* que se muestra en la *figura 107*.

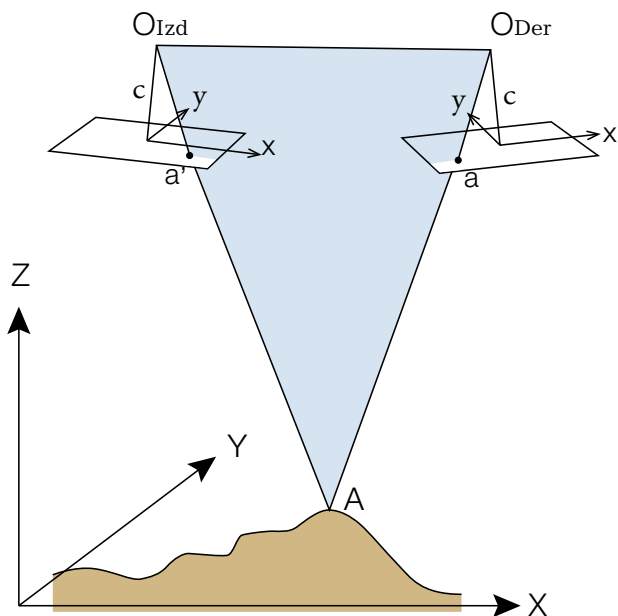


Figura 106. Condición de coplaneidad.

Este es el mínimo número de puntos, si se identifican de forma manual en cada una de las fotos.

Los restituidores digitales ofrecen la posibilidad de realizar este proceso de forma automática, mediante técnicas de correlación. Si se realiza el proceso de forma automática, habrá que aumentar el número de puntos a lo que se llaman **puntos dobles** en la distribución de *Von Grüber* (Figura 108).

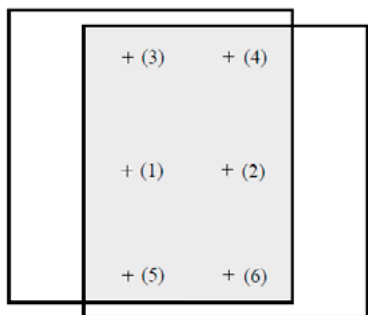


Figura 107. Distribución de Von Grüber.

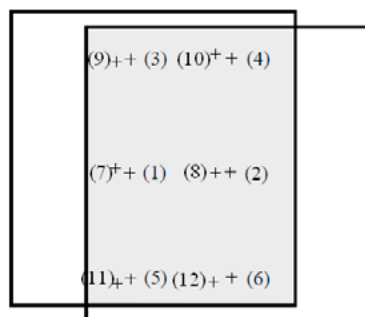


Figura 108. Distribución de Von Grüber en orientación relativa automática.

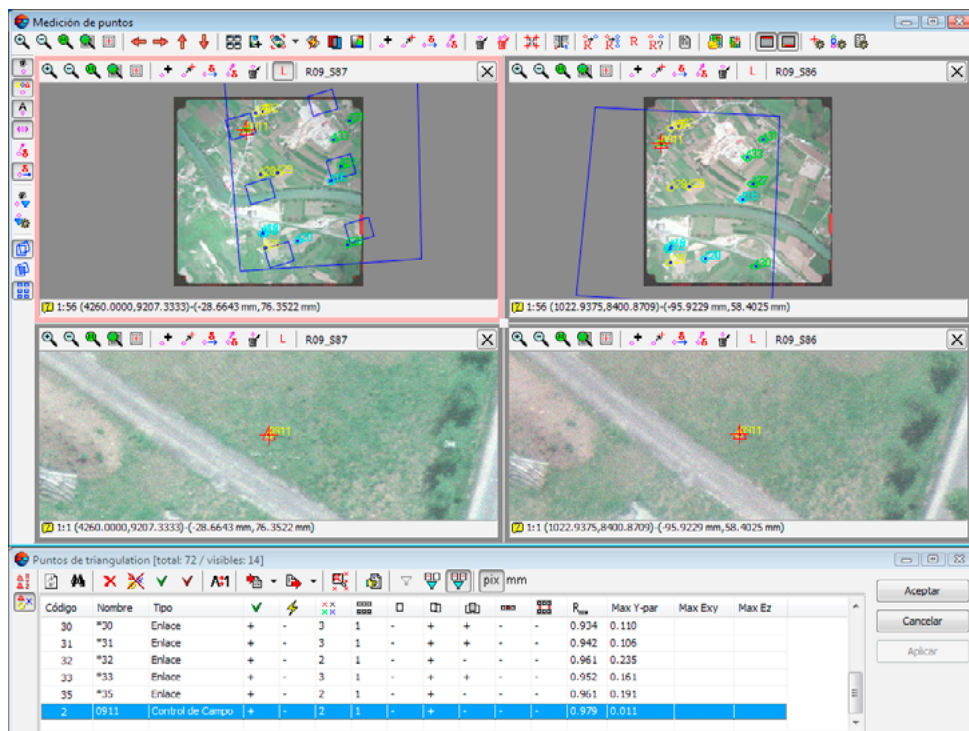


Figura 109. Proceso de orientación relativa digital.

Aunque el proceso se realice de forma automática, requiere de la revisión exhaustiva por parte del operador, ya que dependiendo de la técnica de correlación, a veces los puntos que el restituidor elige, no son adecuados (Figura 110). Por ejemplo, puntos en sombras de elementos, en coches en movimiento...

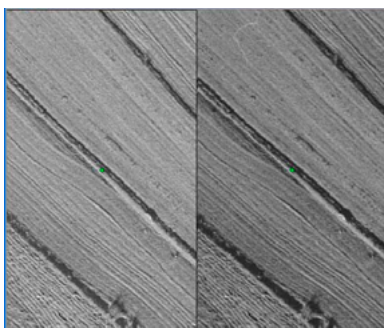


Figura 110. Puntos homólogos.

3.3. ORIENTACIÓN ABSOLUTA

La **orientación absoluta** consiste en nivelar el modelo, escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio, tal y como se observa en la *figura 111*.

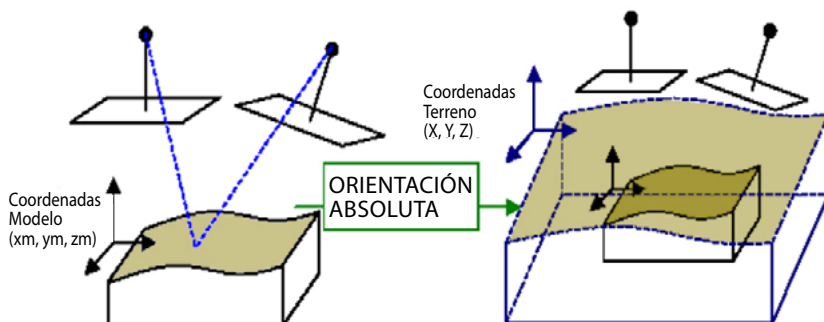


Figura 111. Orientación absoluta.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \cdot [R] \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Ec. 13: Transformación de la orientación absoluta

Para ello se han de conocer una serie de puntos $n \geq 3$, tanto en el sistema de coordenadas modelo como en el sistema de coordenadas terreno.

Cada punto generaría, por tanto, 3 ecuaciones y tenemos 7 incógnitas por resolver.

En la práctica se utilizan al menos 4 puntos de apoyo para una posible resolución del sistema mediante mínimos cuadrados y así tener un control de la exactitud de esta fase.

Puntos de apoyo

Los puntos que se necesitan para la orientación absoluta son los denominados **Puntos de Apoyo**, que se toman en campo con coordenadas referidas al sistema de coordenadas en el que se va a entregar el trabajo final.

Los puntos de apoyo deben estar bien distribuidos por el modelo y han de reunir las siguientes características:

- Deben ser claramente identificables en todos los fotogramas en los que aparezcan.
- Deben ser detalles estables en el terreno.
- Se ha de marcar con anterioridad a la salida de campo la zona en la que ha de estar, para cumplir con los requisitos de distribución.
- Debe permitir un correcto posado en cota por parte del operador en el proceso de identificación en el modelo.
- Debe tener una dimensión apropiada para la escala de la fotografía, tal y como se indicó en el primer capítulo. En caso de ser un punto artificial que hemos colocado en el terreno, se podría reducir a la mitad el tamaño mínimo del mismo.

La distribución ideal de los puntos de apoyo es la que se muestra en la *figura 112*, en la que se muestra la disposición si existen distintas pasadas.

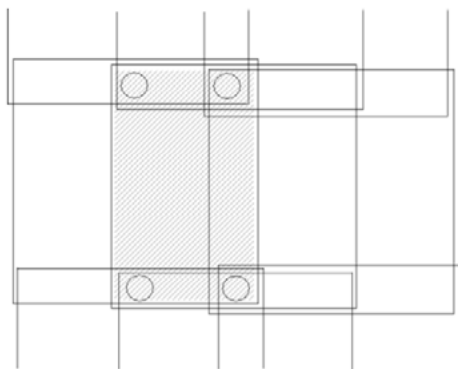


Figura 112. Distribución ideal de los puntos de apoyo.

Cada punto debe numerarse con una denominación única que haga referencia al número de fotograma al que pertenece, la pasada en la que está y su número propio.

Actualmente, se utiliza la técnica GPS para la obtención de coordenadas de los puntos de apoyo en campo. Con lo que, cuando se entrega la documentación

al operador fotogramétrico, se le entrega, además de las reseñas de los puntos (*Figura 113*) y los listados de coordenadas, los cálculos seguidos para la obtención de coordenadas de los puntos en el sistema de referencia del proyecto.



Figura 113. Reseña de un punto de apoyo.

Una vez conocidas las coordenadas de los puntos de apoyo, habrá que identificarlos en las fotos en las que aparezcan y con las coordenadas bien definidas en ambos sistemas se podrán calcular los parámetros de la transformación. Dicho proceso concluido, se puede observar en la *figura 114*.

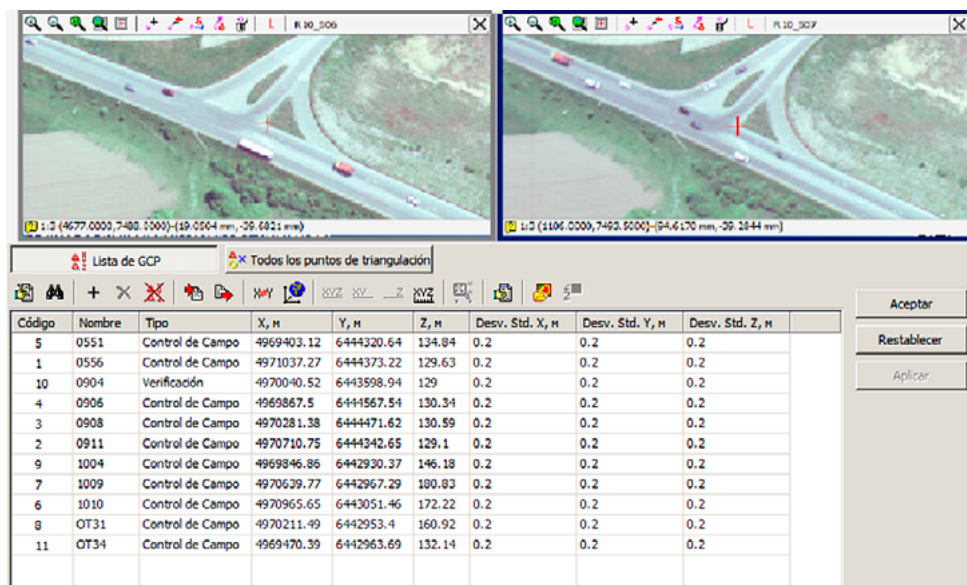


Figura 114. Orientación absoluta digital.

3.4. ORIENTACIÓN EXTERIOR (RELATIVA Y ABSOLUTA EN UN SOLO PASO)

En algunos restituidores digitales, el proceso de la orientación relativa y absoluta se realiza en un solo paso. De manera que, no se calcula el modelo y directamente se obtienen los parámetros para la transformación de coordenadas imagen en el sistema de la cámara al sistema terreno.

Para ello se aplica la **condición de colinealidad**, que es la que se muestra en la *figura 115* y que obliga a que se encuentren en la misma recta, el centro de proyección, el punto imagen y el punto del terreno proyectado.

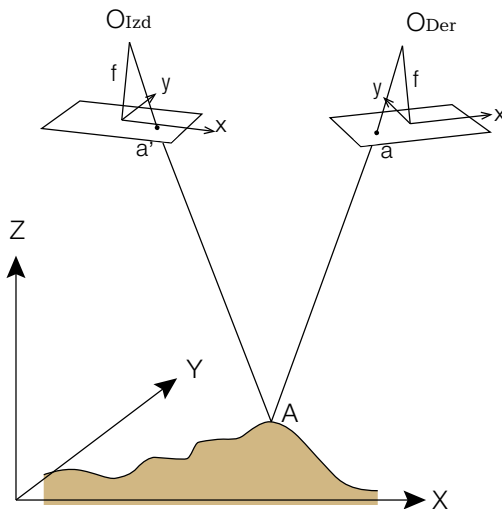


Figura 115. Condición de colinealidad.

3.5. AEROTRIANGULACIÓN

La **aerotriangulación** es el proceso que se realiza en un proyecto fotogramétrico con el objeto de reducir el número de puntos de apoyo tomados en campo.

En grandes proyectos de fotogrametría el número de puntos de apoyo se incrementa en gran cantidad y el coste de la toma de datos es muy elevado. Mediante la aerotriangulación se reduce el número cuantiosamente.

Además, la mayor parte del trabajo se hace en gabinete, minimizando los retrasos por la imposibilidad de la toma de datos en campo por cuestiones meteorológicas.

El fundamento de la aerotriangulación es que una vez que tenemos un par fotogramétrico perfectamente orientado, podemos transferir coordenadas terreno de puntos al modelo siguiente, para no tener que tomarlos en campo. Este método es el que se denomina **aerotriangulación por modelos independientes**.

Sin embargo, está más extendido otro método que se denomina **aerotriangulación por haces**, en el que se hace el ajuste de toda la pasada a la vez.

En los últimos años, con la implementación de los vuelos con GPS y sensores inerciales, se ha reducido en mayor medida el número de puntos de apoyo necesario para ajustar correctamente un bloque fotogramétrico. El GPS registra las coordenadas del centro de proyección de cada fotografía aunque continúa haciéndose necesario un apoyo de campo suficiente, puesto que esta técnica no está aún depurada. El GPS y la cámara funcionan de modo independiente y la toma de datos de ambos sigue intervalos distintos (*Figura 116*).

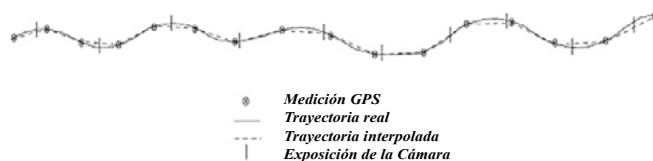


Figura 116. Descoordinación entre tomas de dato de la cámara y el sistema GPS.

Además, la antena GPS y la cámara tienen un desfase que es difícil de cuantificar con precisión, puesto que, tal y como se observa en la *figura 117*, la plataforma giroestabilizadora hace que la cámara esté en continuo movimiento con respecto a la antena.

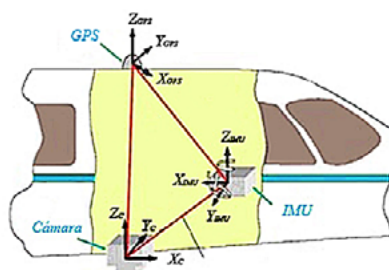


Figura 117. Desfase entre la antena GPS y cámara en el avión.

Distribución y número de puntos de apoyo

Para el método de aerotriangulación por haces, que es el método más extendido y partiendo de un vuelo dispuesto de GPS, se toman puntos dobles en las esquinas del bloque y un punto por cada dos modelos en la zona de recubrimiento entre pasadas.

Esta distribución sigue la premisa de que la exactitud de la aerotriangulación está condicionada por los puntos de apoyo de los extremos del bloque, mientras que los puntos interiores tienen una incidencia muy pequeña en planimetría, pero sí influyen en altimetría.

Siguiendo este esquema y tomando como ejemplo la figura 118, para un vuelo compuesto por 14 fotografías en dos pasadas sólo habría que tomar 11 puntos de apoyo. Si hubiéramos calculado todo el bloque sin triangulación hubiéramos necesitado 4 puntos por modelo, lo que supondría un total de 48 puntos de apoyo.

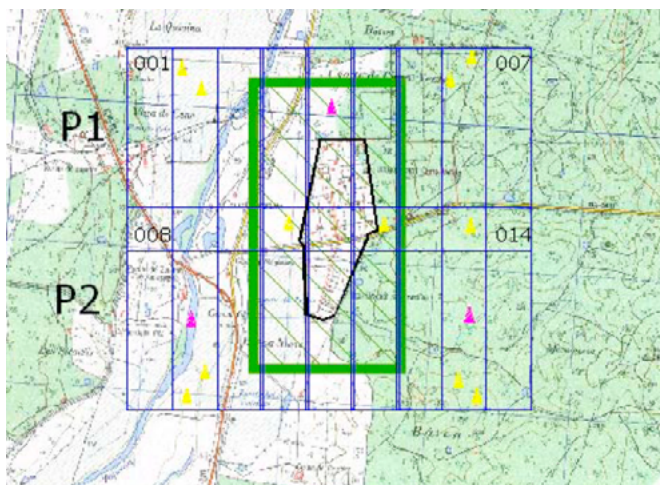


Figura 118. Distribución de puntos de apoyo y control en aerotriangulación de vuelo con GPS.

Una vez tomadas las coordenadas de los puntos, el operador tendrá que medir un mínimo de 12 puntos de enlace en cada zona de recubrimiento entre pares, tal y como se muestra en la figura de los puntos dobles en la zona de *Von Grüber*.

También, se tomarán en campo **puntos de control** (color magenta en la *figura 118*) que no han de intervenir en los cálculos de la aerotriangulación y que servirán para comprobar los cálculos. Su distribución será la de un punto en el centro de la pasada para las pasadas impares y dos en los extremos para las pasadas pares.

4. ERRORES ADMISIBLES EN EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL

Como se comentó al comienzo del capítulo, los errores en el proceso fotogramétrico se van acumulando en las fases consecutivas. Al final de todo el proceso se deberá realizar un control para verificar la calidad de los datos obtenidos. No obstante, cada fase tendrá que haber superado los requisitos mínimos de exactitud, para que el proceso sea correcto (*figura 119*).

Cada fase tendrá que cumplir con unas especificaciones de exactitud:

- **Orientación interna:** Si el fotograma ha sido capturado por una cámara analógica y posteriormente escaneado, el error medio máximo no debe ser mayor de un píxel.

Si la imagen ha sido adquirida por una cámara digital, no procede especificar tolerancia, puesto que la orientación interior es automática y el operador no tiene que intervenir.

- **Orientación relativa:** La tolerancia planimétrica es distinta que la altimétrica, siendo:

$$E_{Medio}^{xy} = \sqrt{2} \cdot 0.5 \text{ pxl}$$

$$E_{Medio}^Z = \frac{f}{b} \cdot E_{Medio}^{xy}$$

Ec. 14: Errores máximos en la orientación relativa

- **Orientación absoluta:** El error medio aceptable se diferencia, también en este caso, planimétricamente y altimétricamente:

$$E_{Medio}^Z = 0.15mm \cdot Equi.$$

Ec. 15: Errores máximos en la orientación absoluta

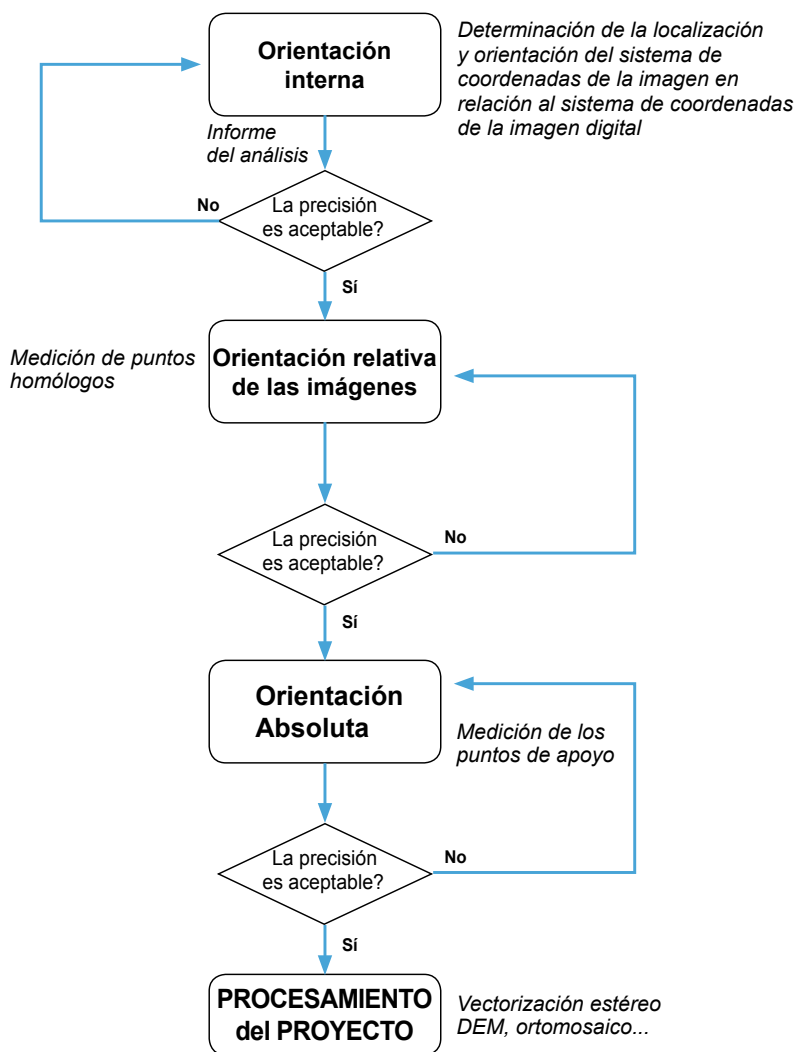


Figura 119. Control en el proceso fotogramétrico

5. CONTROL DE CALIDAD POSICIONAL DEL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL

A pesar de que todo el proceso ha de ser controlado fase por fase, tal y como se indica en el apartado 4, hay que realizar un control de calidad con datos externos que no hayan intervenido en el proceso. Para ello utilizaremos los puntos de control que se tomaron junto a los de apoyo.

Se define **error** a la diferencia entre el valor medido y el valor real. A partir de los errores medidos en los puntos de control, a los cuales se les considera como “valor verdadero”, se obtendrán los siguientes estadísticos, para posteriormente compararlos con las tolerancias y establecer la validez o no del proceso fotogramétrico.

- Error medio:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$$

Ec. 16: *Error medio*

- Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - EM)^2}$$

Ec. 17: *Desviación estándar*

Las tolerancias para las desviaciones estándar de los errores obtenidos con los puntos de control han de distinguirse según sean planimétricos o altimétricos.

Tolerancia para la desviación estándar Planimétrica:

- Medición del punto digital:

$$\sigma_{xy} \leq \frac{1}{3} \text{pixel} \cdot Mb$$

Ec. 18: Error en la medición de un punto digitalmente

- Medición del punto en campo:

$$\sigma_{XY}$$

Ec. 19: Error en la toma de coordenadas planimétricas

Entonces la desviación estándar planimétrica máxima será:

$$\sqrt{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{XY}^2}$$

Ec. 20: Desviación estándar planimétrica máxima

Tolerancia para la desviación estándar altimétrica:

En este caso depende de la relación B/H, (Base fotográfica/Altura de vuelo) y de la precisión planimétrica al medir el punto digital:

Entonces la desviación estándar altimétrica en la medición digital será:

$$\sigma_z \leq \sigma_{xy}$$

Ec. 21: Desviación estándar altimétrica en la medición digital

Teniendo en cuenta la desviación del punto la medirlo en campo la desviación estándar altimétrica máxima será:

$$\sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_Z^2}$$

Ec. 22: Desviación estándar altimétrica máxima

6. RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA

Una vez concluidos todas las orientaciones fotogramétricas y realizadas las comprobaciones de exactitudes alcanzadas, podremos comenzar a obtener el registro tridimensional del terreno.

Se entiende por restitución al proceso de extracción de la información métrica del modelo estereoscópico con ayuda de un índice móvil según el principio de marca flotante.

El instrumento que permite hacer las orientaciones y las operaciones de medición y registro de coordenadas se llama **restituidor**.

El principio de marca flotante es aquél por el que dos marcas, que se colocan sobre dos puntos homólogos, una vez realizadas correctamente todas las orientaciones, se han de fundir en una sola imagen (una sola marca). Además, se cumple que dicha marca estará a la altitud del punto sobre el que está “**posada**”.

De este modo, el operador fotogramétrico se irá posando sobre todos los elementos del terreno e irá obteniendo un registro de coordenadas tridimensionales de ellos, tal y como se puede observar en la *figura 120*.

Este proceso de restitución tiene como resultado la cartografía vectorial, que es el primer producto derivado del proceso fotogramétrico.



Figura 120. Restitución fotogramétrica.

CAPÍTULO 5

PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS

1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se indicó en el capítulo anterior y sin entrar en particularidades, los tres productos por excelencia, que se obtienen del proceso fotogramétrico (*Figura 121*) son:

- Planos vectoriales obtenidos de la restitución.
- Modelos digitales del terreno.
- Ortofotografías.

El orden de mención de los mismos no es aleatorio sino que, salvo excepciones, es necesario generar unos productos antes que otros, puesto que su obtención se basa en los productos anteriores.

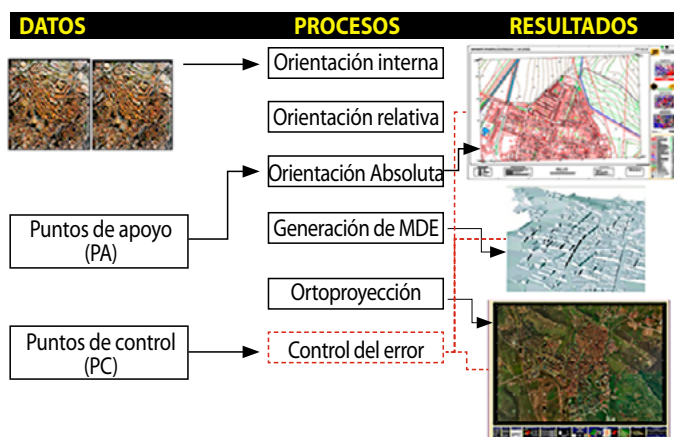


Figura 121. Fases del proceso fotogramétrico digital.

2. PLANOS VECTORIALES OBTENIDOS DE LA RESTITUCIÓN

Los **planos vectoriales** obtenidos de la restitución son productos elaborados de forma manual por el operador fotogramétrico.

El operador representa, mediante el principio de la marca flotante y de forma tridimensional, los elementos que procedan, según la escala del mapa o plano final.

Así tal y como se aprecia en la *figura 122*, para la elaboración de cartografía a escala 1:10000 no será necesario representar más que las manzanas de los núcleos urbanos. Sin embargo, para representar correctamente un plano a escala 1:1000 se representarán las separaciones entre viviendas.



Figura 122. Representación a escalas 10000 y 1000.

Altimétricamente, también será el operador el que trace las curvas de nivel. Para ello, dejará fija la cota de la marca flotante y recorrerá el terreno posándose continuamente sobre él. Dicho recorrido será el que imprimirá la forma de la curva de nivel.

Muchas estaciones fotogramétricas digitales están dotadas de sistemas de correlación automática que son capaces de realizar automáticamente las curvas de nivel. Actualmente, este proceso aún no está perfeccionado y las curvas trazadas mediante este proceso automático, necesitan un largo proceso de edición posterior para reparar los errores del trazado de curvas por elementos que no son propios del terreno (elementos elevados). Este hecho hace que, en la gran mayoría de los casos, sea más rentable hacer el trazado de forma manual desde un principio.

La equidistancia de las curvas de nivel, está supeditada no sólo a la escala cartográfica, sino también al relieve a representar. En un terreno demasiado escarpado, hay ocasiones en las que no hay espacio suficiente para las curvas de nivel, y por el contrario, en zonas llanas hay veces que las curvas se quedan escasas.

Para un relieve medio se puede adoptar la siguiente tabla como orientativa:

Escala	Equidistancia (m)
1:50000	20
1:25000	10
1:10000	5
1:5000	2
1:1000	1
1:500	0.5

Tabla 7. Equidistancias más utilizadas

2.1. CALIDAD DE LA RESTITUCIÓN

El producto derivado en primera instancia de la restitución es la denominada minuta. Dicha minuta ha de ser **revisada** y **editada** para dar lugar al plano o mapa final.

En primer lugar, se realiza una revisión de los posibles errores que pudiera tener. La mayoría de las estaciones fotogramétricas digitales tienen una serie de rutinas de control de calidad que detectan errores tales como:

- Cruce altimétrico correcto de los elementos con las curvas de nivel.
- Ausencia de curvas de nivel.
- Cruce de curvas de nivel.
- Errores altimétricos de la hidrología.
- Elementos poligonales cerrados.
- Errores topológicos.
- Etc.

Una vez revisados los errores, se procederá a la fase de edición. En la que se incluirá la toponimia y se distinguirán por ejemplo, los distintos tipos de viales (diferenciando carreteras locales, de regionales....) En esta fase, dependiendo de la escala del producto final, habrá que realizar también alguna revisión de campo (para identificar y localizar los elementos que han quedado ocultos por las edificaciones o elementos elevados).

Finalizados los procesos de revisión y edición, este primer producto fotogramétrico se podrá considerar finalizado.

3. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

Los modelos digitales del terreno¹⁴ son un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio, sea esta la que sea.

Se pueden realizar muchos tipos de MDT, pero en nuestro caso, procede distinguir entre los siguientes modelos:

- **MDE**, Modelo digital de Elevaciones (*Figura 123*): Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

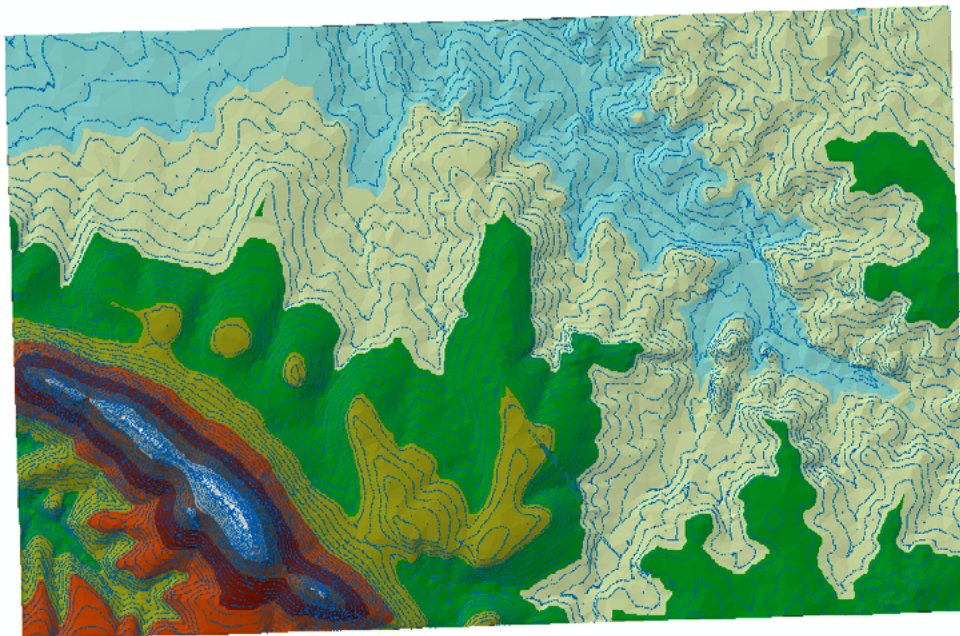


Figura 123. MDE.

- **MDS**, Modelo digital de Superficie (*Figura 124*): Incluye las altitudes de los elementos elevados de la superficie, tales como edificios, árboles...

¹⁴ MDT

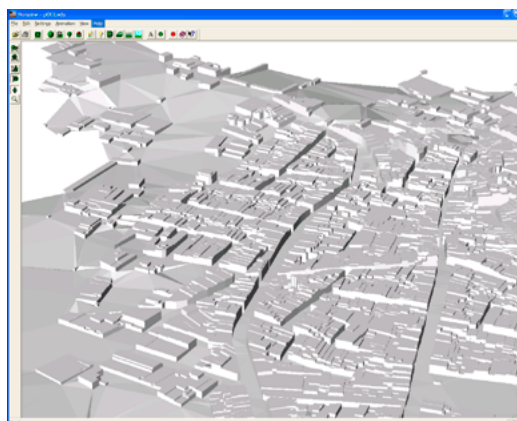


Figura 124. MDS.

3.1. ESTRUCTURA DE DATOS DE LOS MDE

En general, la unidad básica de información en un modelo digital de elevaciones es un punto acotado, definido por una terna compuesta por un valor de la altitud (Z) al que acompañan los correspondientes valores de X e Y.

Los mapas convencionales, utilizan las curvas de nivel para representar la superficie del terreno, pero los MDE pueden ser de dos tipos fundamentalmente

- **MDE vectoriales:** Se basan en entidades geométricas y además de las ya conocidas curvas de nivel mostradas en la *figura 123*, también podemos señalar los TIN¹⁵ como modelos vectoriales de información (*Figura 125*).
- **Estructuras Ráster** (*Figura 126*): Se basan en la representación del terreno por medio de estructuras matriciales regulares y constantes. Su estructura es la misma que la de una imagen digital, en la que cada píxel muestra el valor de la elevación media del terreno en su superficie.

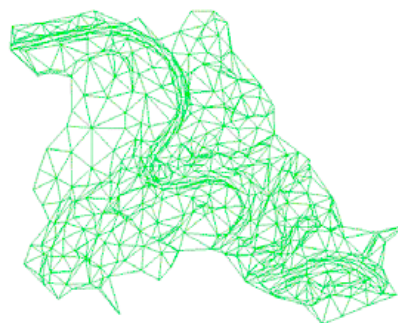


Figura 125. TIN.

¹⁵ Triangulated irregular network

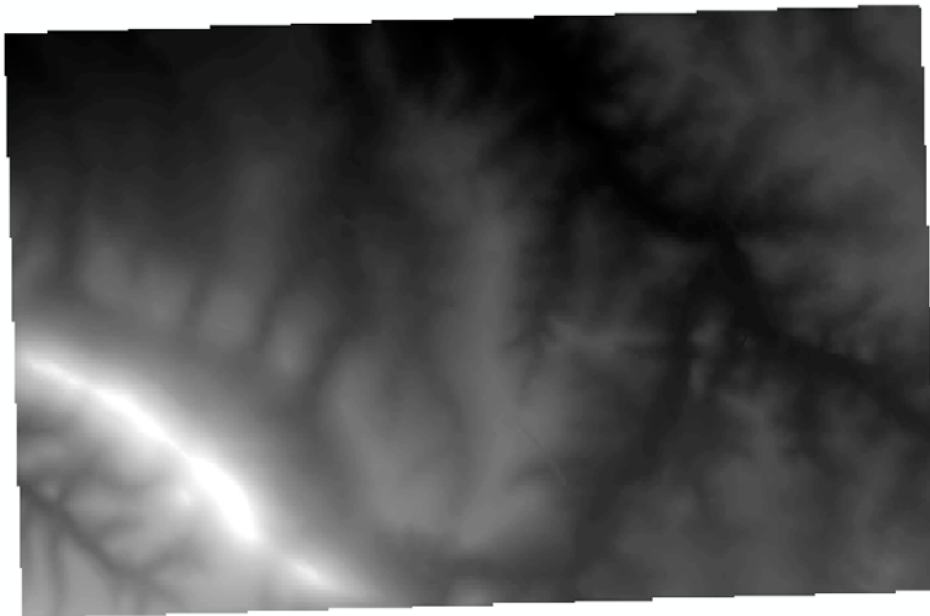


Figura 126. MDE ráster.

3.2. Métodos para la generación de los MDE

Los MDE, en el campo de la fotogrametría, se pueden obtener por distintos métodos.

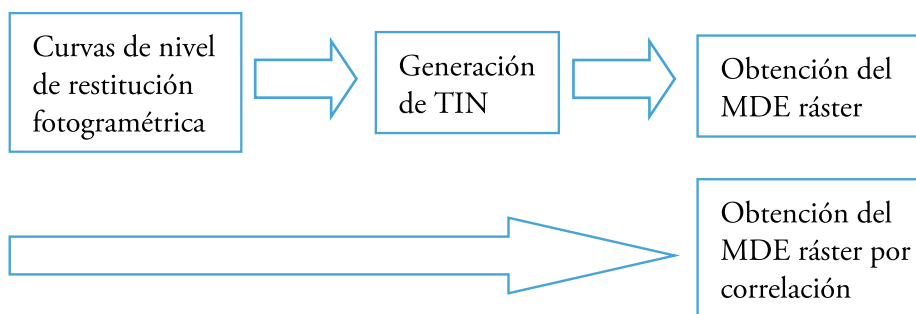


Figura 127. Métodos para la generación de los MDE

Según se observa en el esquema de la *figura 127*, la primera opción se realiza de forma consecutiva apoyándose en el resultado de la fase anterior. Es una forma

“manual” de obtener el MDE en la que el resultado suele estar garantizado ya que se basa en las curvas de nivel que han sido revisadas y editadas por un operador.

El único proceso a tener en cuenta es el método de **interpolación** (*Figura 128*) que se utilice, ya que el traspaso de formato TIN a formato ráster lo requiere.

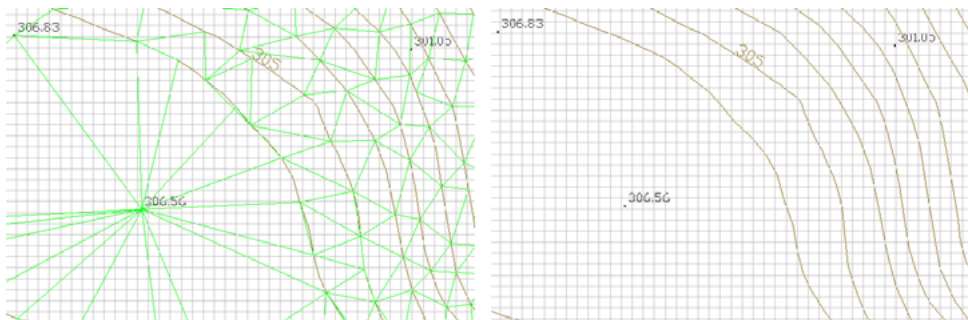


Figura 128. Interpolación.

En el segundo caso de la *figura 127*, el modelo se hace de forma automática, directamente a partir de los fotogramas orientados.

Los tipos de *matching*¹⁶ o correlación pueden ser a nivel de área o a nivel de elemento.

- **Matching a nivel de área ABM**¹⁷: Compara los niveles de gris del patrón a lo largo de la ventana de búsqueda. Este proceso se puede observar en la *figura 129* y es el que se utiliza en la orientación interna automática para buscar las marcas fiduciales.

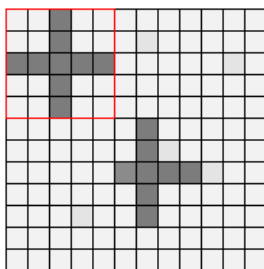


Figura 129. ABM.

¹⁶ Término inglés que se refiere al proceso de correlación automática.

¹⁷ Area Based Matching

- **Matching a nivel de elemento FBM¹⁸**: Extrae formas de las imágenes (aplicando filtros) y las compara (*Figura 130*).

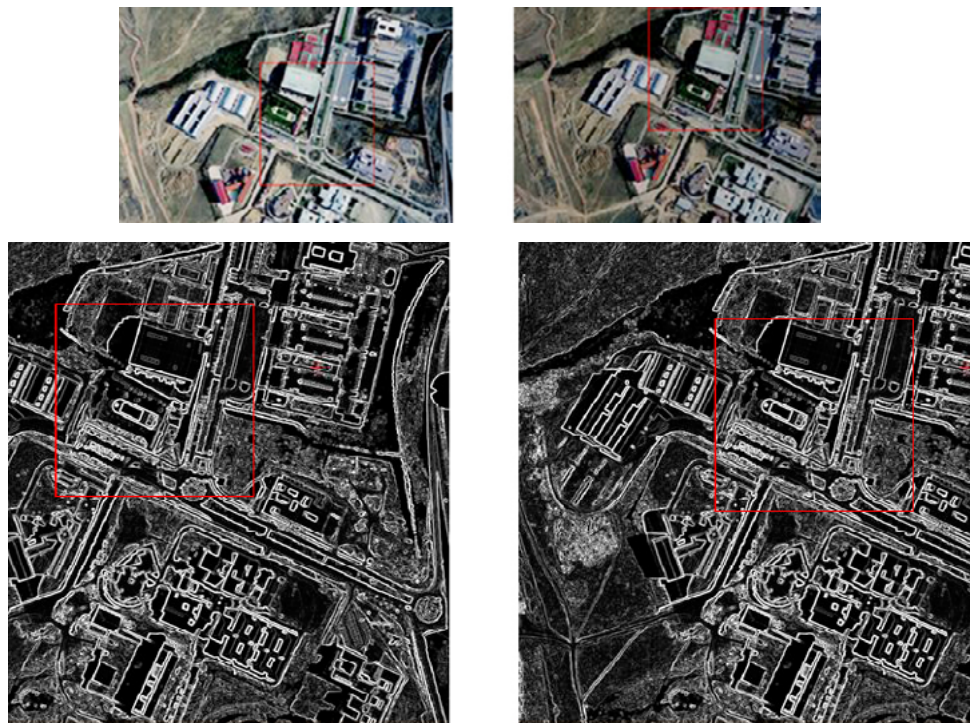


Figura 130. FBM.

Este proceso de correlación de imágenes (matching) que en primera instancia, parece sencillo de ejecutar, se encuentra con diversos problemas, entre ellos los elementos elevados y la diferente apariencia del mismo elemento en las distintas fotografías. Un ejemplo claro es el que se muestra en la *figura 131*. La misma cornisa del edificio aparece completamente diferente en cuanto a número e intensidad de píxeles en una y otra imagen, con lo que un correlador automático le costará identificar que se trata del mismo elemento.

Otro problema de la generación de los MDE de forma totalmente automática, es que, al no incorporar las líneas de ruptura, el modelo generado necesitará un proceso de edición para la eliminación de errores altimétricos que sin duda se van a producir.

¹⁸ Feature Based Matching.

Si el formato de salida que deseamos para nuestro modelo es el de MDE, entonces, además deberemos realizar un proceso de filtrado de puntos para eliminar todos los elementos elevados, tales como edificios, vegetación...

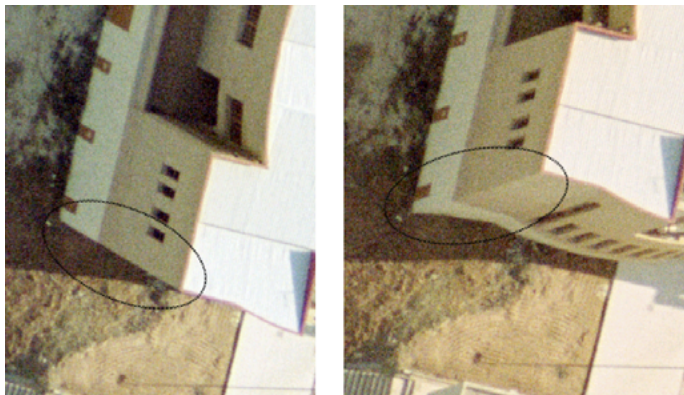


Figura 131. Problemas del matching.

Sea nuestro modelo obtenido por una u otra opción de la *figura 127* y con el fin de cuantificar la exactitud del proceso, se ha de realizar un control del error mediante los puntos que teníamos destinados a ello (*Figura 132*).

Como tolerancia altimétrica se establece que el 90% de ellos deben tener un error menor de un cuarto de la equidistancia, en función de la escala en cuestión. El 10% restante podrá variar como máximo en la mitad del valor de la equidistancia.

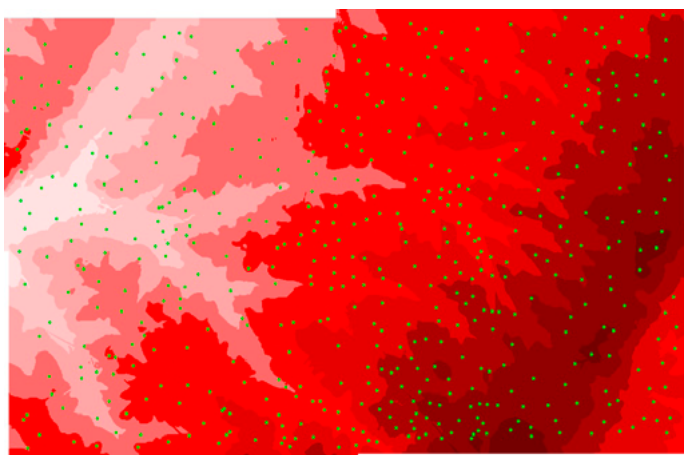


Figura 132. Control del MDE

4. ORTOFOTOGRAFÍAS

Convendría, aclarar una diferencia fundamental entre dos términos similares, pero que se refieren a procesos fotogramétricos que difieren en metodología y en resultados.

4.1. RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES

La rectificación (*figura 133*) es una técnica fotogramétrica en la cual se cambia la proyección cónica de una fotografía a una proyección ortogonal.

Su principal ventaja es la obtención de una escala uniforme, con la consiguiente posibilidad de medición.

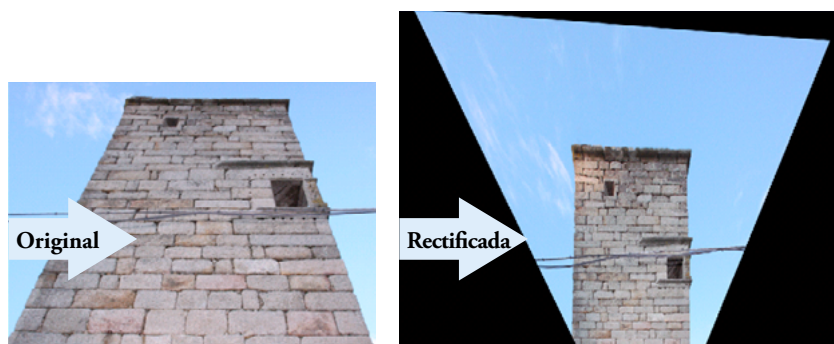


Figura 133. Resultado de la rectificación

4.2. ORTOPROYECCIÓN

La ortoproyección (*Figura 134*) es el método fotogramétrico de obtener fotomapas precisos, corregidos de las deformaciones producidas en la imagen fotográfica por el relieve y la inclinación de la fotografía, mediante la rectificación diferencial de la fotografía original. Para ello se hace necesaria la utilización del MDE.

En el caso de fotogrametría aérea el proceso de generación de la ortofotografía digital se sintetiza en la siguiente *figura 135*.

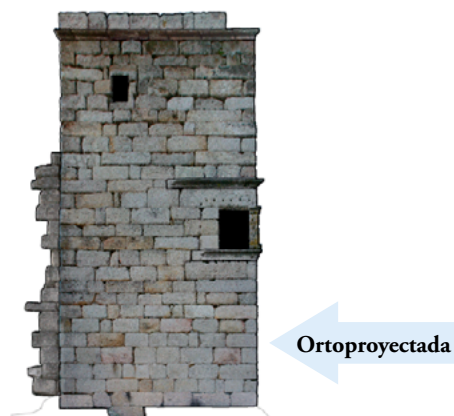


Figura 134. Resultado de la ortoproyección.

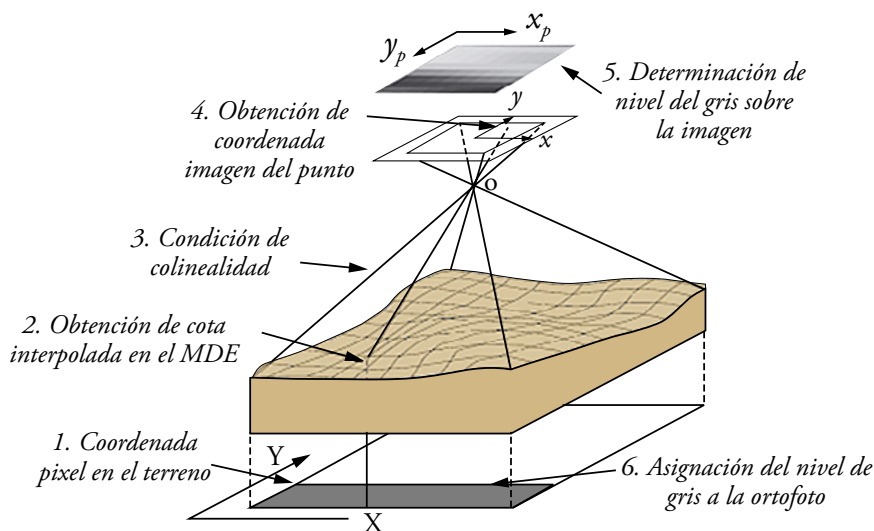


Figura 135. Fases del proceso de realización de la ortofoto.

Por cada píxel del terreno, se obtiene su coordenada Z en el MDE. Conocida esa cota y mediante la condición de colinealidad, se averigua el tono de gris del píxel correspondiente en la fotografía original que es el que se plasmará en la ortofografía.

En este proceso, se necesita interpolar en algunas zonas los niveles de gris a representar, porque la posición que devuelva la condición de colinealidad no tiene por qué ser el centro exacto de un píxel de la imagen original.

Las interpolaciones más usualmente utilizadas son:

- **Vecino más próximo** (Figura 136).

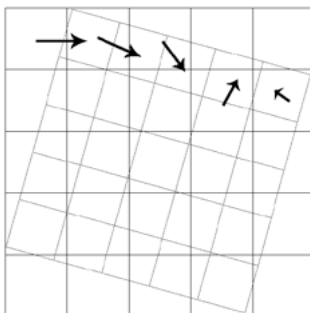


Figura 136. Interpolación por el vecino más próximo.

- **Interpolación bilineal:** Promedia los niveles de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original (*figura 137*).

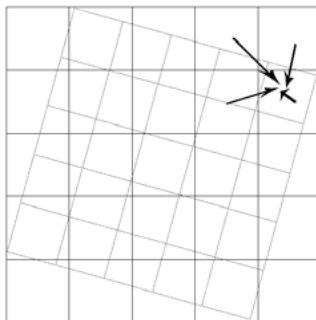


Figura 137. Interpolación bilineal.

- **Convolución bicúbica:** Considera los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos (*Figura 138*).

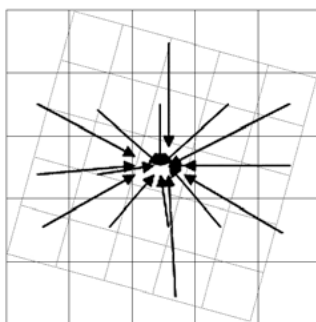


Figura 138. Interpolación bicúbica.

5. TIPOS DE ORTOFOTOGRAFÍAS

Las ortofotografías confeccionadas a partir de los MDE son las más comunes y se denominan “*ortofotografías convencionales*”. Este tipo de ortofotos tienen algunos problemas en cuanto a la correcta representación de los elementos elevados. Por ejemplo, tal y como se observa en la *figura 139*, los edificios aparecen tumbados por pertenecer a zonas radiales de la imagen fotográfica en la que se capturaron. Hemos de recordar entonces la *figura 89* del capítulo 3 en la que se observaba el desplazamiento en la fotografía de los elementos elevados cuando no eran capturados por la cámara de forma nadiral.

Por este hecho, no se deben realizar mediciones de coordenadas o distancias de elementos elevados en las ortofotos convencionales.



Figura 139. Ortofotografía convencional.

Además, estos problemas de desplazamientos de elementos elevados puede provocar efectos visuales llamativos en la unión de dos ortofotos convenciones contiguas. En la *figura 140* se puede observar que la unión de dos ortofotos ha sido realizada por el medio de una avenida y por lo tanto los edificios de un lado y otro de la misma tienen diferentes perspectivas.

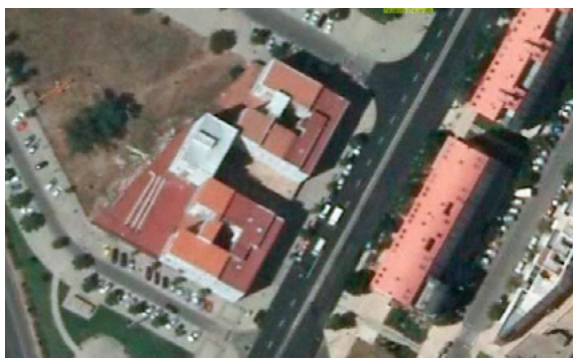


Figura 140. Errores debidos a la diferencia de perspectiva.

En la actualidad se ha comenzado a extender el nuevo formato de ortofotografías denominadas “*ortofotografías verdaderas*”.

Este tipo de ortofotografías se realizan sobre un MDS en vez de apoyarse en un MDE. De esta manera, se tiene en cuenta la altura de todos los elementos elevados del terreno y sus resultados son mucho más correctos, tal y como se aprecia en la *figura 141*.

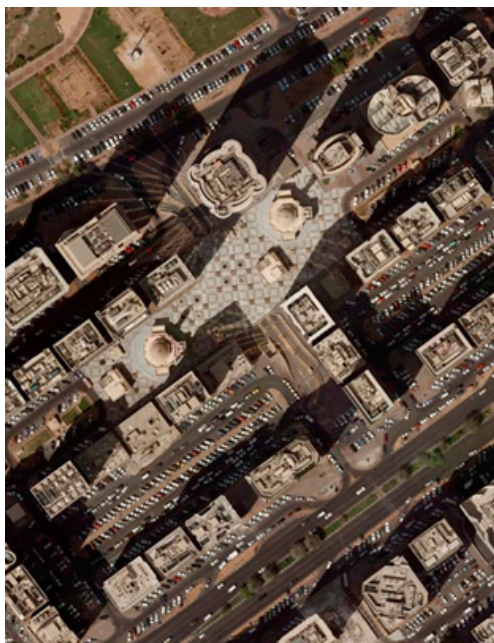


Figura 141. Ortofotografía verdadera.

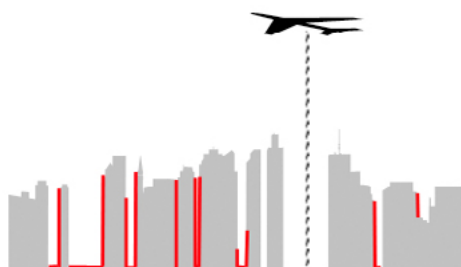


Figura 142. Vacíos de la toma convencional.

El proceso de elaboración de las ortofotos verdaderas es más laborioso que el de las convencionales y requiere, además de mayor recubrimiento transversal entre los fotogramas del vuelo, un vuelo LiDAR para la correcta obtención del MDS.



Figura 143. Generación de la ortofotografía verdadera.

El “vacío” a cubrir de la *figura 143*, es el que hace necesario el vuelo con mayor recubrimiento y así tener la zona tomada desde varios puntos de vista.

6. MOSAICADO DE LAS ORTOFOTOGRAFÍAS

El hecho de que, para cubrir la zona de trabajo, sea necesario un vuelo fotogramétrico compuesto por muchas fotografías, hace que para realizar la ortofotografía de toda la zona, se haga preciso un mosaicado de todas las ortofotografías generadas.

El equilibrado radiométrico es fundamental en esta fase y se basa en el hecho de que los histogramas, en las zonas de solape entre ortofotografías adyacentes han de ser iguales, lo que supone que se ha de hacer un ajuste radiométrico total de ambas imágenes hasta que éste coincida.

A pesar de que las fotografías hayan sido corregidas radiométricamente, a la hora de unir las ortofotografías se suele notar la diferencia entre unos ortofotogramas y otros, con lo que el proceso no se debe hacer de manera automática, puesto que los resultados no serían estéticamente correctos.

La forma correcta de actuar es ir indicando manualmente las polilíneas de unión entre los fotogramas que sigan elementos tales que no se aprecie la diferencia radiométrica.

Se muestra un ejemplo en la *figura 144*. En la parte superior se muestra el resultado de no limitar la unión de los fotogramas mediante líneas que sigan elementos natu-

rales. En la parte inferior, se encuentra el resultado de haber trazado por la polilínea roja que sigue el trazado de una vía de comunicación. Se puede apreciar claramente la mejora estética del producto final.



Figura 144. Delimitación correcta de las líneas de unión de ortofotogramas. (fuente: Racus)

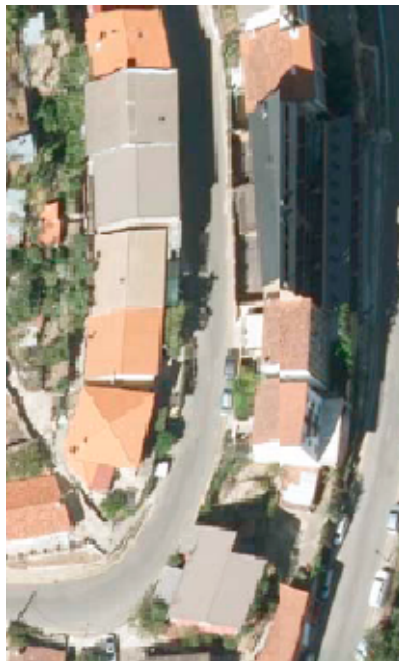


Figura 145. Errores en la unión de elementos elevados.



Figura 146. Delimitación correcta de unión entre ortofotografías.

Además, esa polilínea se hace necesaria en las ortofotos convencionales, no sólo para minimizar los errores radiométricos, sino que también, en el caso de construcciones

que atraviesen las líneas de corte, para eliminar los errores geométricos de la diferencia de perspectiva de los elementos elevados. Un ejemplo se indica en la *figura 145*.

La solución es definir manualmente la unión, para forzar a que no atravesase ningún edificio, tal y como se muestra en la *figura 146*.

7. CALIDAD DE LA ORTOFOTOGRAFÍA

El **resultado visual** final de la ortofoto completa necesita una supervisión, ya que es frecuente que existan algunos errores, en gran medida, derivados de la calidad del MDE, y que no se hacen visibles hasta que no se genera la ortofoto.

El primer error que suele aparecer es la de “arrastres” (*figura 147*) de la imagen. Esto es debido a que el MDE tiene algún error local en cota y la foto es forzada a ser estirada para acoplarse a él, quedando la ortofoto deformada en esa zona.



Figura 147. Arrastres de la imagen en la ortofoto por error del MDE.

Otro error frecuente es similar al anterior, pero se produce en los elementos elevados. Si la ortofoto es convencional, se apoya en el MDE, que, como recordaremos, no tiene en cuenta los elementos elevados del terreno y a veces, éstos elementos elevados no quedan correctamente representados tal y como se aprecia en la *figura 148*.



Figura 148. Deformaciones por errores del MDE.

Finalmente, habría que destacar la **calidad geométrica** de la ortofoto, que, en definitiva, es la principal cualidad de la misma. Para valorar dicha calidad, se han de utilizar puntos de control comparando su situación planimétrica con la reflejada en la ortofoto (*figura 149*).



Figura 149. Ejemplo de control de calidad de la ortofoto.

Como tolerancia planimétrica del trabajo queda establecido que el 90% de los puntos bien definidos no diferirán de su verdadera posición 0.2 mm a la escala del plano.

CAPÍTULO 6

PROYECTO DE VUELO. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES

1. INTRODUCCIÓN

El ingeniero civil, a lo largo de su carrera, probablemente requerirá la realización de un vuelo fotogramétrico para la obtención de cartografía a una escala que le sea suficientemente precisa para el diseño de su obra.

Es por ello que se plantea este capítulo. Se pretende aquí esbozar los elementos necesarios para realizar un pliego en el que se especifiquen desde los requerimientos necesarios en la ejecución del vuelo hasta la calidad que le sea necesaria en los productos finales que será con los que realmente trabaje.

2. PLIEGO FOTOGRAMÉTRICO

Un pliego de condiciones fotogramétrico es un documento en el que se establecen todas las premisas a cumplir, por la empresa responsable de realizar el trabajo de fotogrametría, a la hora de ejecutar todas las fases del proceso fotogramétrico.

Recordemos que el objetivo final de los trabajos fotogramétricos es obtener todos o alguno de los productos fotogramétricos que hemos visto en capítulos anteriores. Por ello, la secuencia del pliego deberá ser la propia del flujo de trabajo fotogramétrico.

Las partes de un pliego fotogramétrico suelen ser las que a continuación se detallan.

2.1. CONDICIONES GENERALES

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.

Como hemos indicado en la primera parte de este texto, nos encontramos en un periodo de transición entre sistemas de referencia oficiales. Esta premisa nos obliga a decidirnos por uno de los dos sistemas ETRS89 o ED50 a los que referir nuestro trabajo.

Lo más lógico parecería trabajar ya en el nuevo sistema ETRS89, pero a veces el hecho de poseer ya datos cartográficos de la zona en el sistema antiguo, podría darse el caso de requerir el trabajo en el antiguo sistema ED50. No obstante esta segunda opción no es muy recomendable, puesto que sería mejor transformar los datos antiguos de ED50 a ETRS89 tal y como se indicó en el capítulo 2 de la primera parte del texto.

Otro elemento que se ha de indicar claramente en este apartado será la escala de los productos fotogramétricos que vayamos a requerir. Dicha escala será la que posteriormente también limite las precisiones y tolerancias generales.

En este apartado habrá que especificar las dimensiones, forma y localización de la zona que se quiere cartografiar. De sus dimensiones y forma dependerá en mayor medida la planificación del vuelo fotogramétrico.

2.2. CONDICIONES PARA LA REALIZACIÓN DEL VUELO

En este apartado se han de especificar:

- *Tipos de cámaras a utilizar:* Si se exigen cámaras digitales o se admiten aún analógicas. En este último caso habría que especificar posteriormente el tipo de escáner con el que se han de transformar los negativos del vuelo al formato digital.
- *Dotaciones que ha de tener el avión en el vuelo:* Por ejemplo si se exige que el avión esté dotado con GPS o si por el contrario no es necesario.
- Muy importante es definir *la geometría del vuelo*, o lo que es lo mismo los recubrimientos longitudinales (entre fotogramas consecutivos) y transversales (entre pasadas). Recordemos que el recubrimiento longitudinal más habitual es del 60%, pero en el caso de querer obtener ortofotografías verdaderas, habrá que aumentar dicho recubrimiento. El recubrimiento transversal suele ser de un 25% aproximadamente.
- *Las condiciones del vuelo* tales como la hora del vuelo, altura del sol también han de ser especificadas, para evitar sombras de los elementos elevados.
- *Formato de entrega de los archivos digitales:* Si además de los archivos digitales con formato original, se van a requerir duplicados con formato comprimido y qué tipo de algoritmo de compresión se ha de utilizar.

Una parte fundamental del trabajo es la planificación del vuelo. Dicha planificación no se suele incluir dentro del pliego en sí, sino en un anexo aparte. Por esa razón, trataremos el tema más adelante y al igual que en un pliego, le dedicaremos un apartado en exclusiva al final del capítulo.

2.3. CONDICIONES PARA LA REALIZACIÓN DEL APOYO

La toma de datos y procesamiento de los puntos de apoyo es lo que se suele denominar como “apoyo del vuelo”.

Recordemos que además de tomar los puntos necesarios para realizar o bien la aerotriangulación o bien el apoyo de los modelos estereoscópicos de forma independiente, se tomarán coordenadas de una serie de puntos, identificables en las fotografías y que no intervengan en ninguna de las fases del proceso. Estos serán los llamados puntos de control.

En esta parte del pliego habrá que especificar el número de puntos de apoyo que se han de tomar. Por ello habrá que indicar si se va a realizar aerotriangulación o no. Además, dependiendo de si se ha requerido que el avión esté dotado con sistema GPS, el número de puntos también se reducirá.

El número y distribución de puntos de apoyo y de control dependerá del número de fotografías necesarias para recubrir toda la zona, con lo que no se suele indicar un número total, sino, un número que sea función del número de fotografías.

Las premisas de cómo queremos que se entreguen las reseñas de los puntos de apoyo y todos los cálculos realizados desde la toma de datos hasta la obtención de coordenadas en el sistema de referencia final también se han de indicar en este apartado.

Es muy importante especificar en este apartado las tolerancias tanto planimétricas como altimétricas que han de cumplir todos los puntos medidos. Puesto que de su exactitud depende la exactitud del resultado final.

2.4. CONDICIONES PARA LA REALIZACIÓN DE LA RESTITUCIÓN Y CARTOGRAFÍA

Corresponde a este apartado la especificación de, tanto las tolerancias que han de cumplir los errores cometidos en las orientaciones fotogramétricas, como de las tolerancias y especificaciones técnicas del primer producto fotogramétrico al que nos hemos referido en capítulos anteriores.

Con respecto a las tolerancias de las orientaciones, se especificarán para las fases de orientación interna, relativa y absoluta, teniendo en cuenta que los errores se acumulan en cada una de las fases.

En cuanto a la cartografía, se especificará el formato que se desea que tenga el resultado final. Refiriéndonos a tipos de líneas, color, grosor, etc.

Si esta parte del pliego está bien definida, el resultado cartográfico será más completo. Por ejemplo, no es lo mismo especificar que todas las carreteras se representen con color rojo y línea continua, a detallar que las carreteras nacionales a su vez tendrán un grosor 2 y las autovías un grosor 3 y que además cada una debe estar en capas diferentes.

Conviene especificar también qué tipo de control de calidad se le ha de realizar a la cartografía final.

2.5. CONDICIONES PARA LA REALIZACIÓN DEL MDE Y ORTOFOTOGRAFÍAS

Como se ha visto ya, para realizar ortofotografías, necesitamos haber realizado primero o bien un MDE o bien un MDS, en función del tipo de ortofoto que vayamos a generar. Por lo tanto, lo primero que hay que especificar es el tipo de ortofotografía que vamos a requerir.

En el caso de que requiramos una ortofoto convencional, las exigencias acerca del MDE no han de ser muchas. Normalmente se solicitan modelos ráster en formato ASCII, de manera que cualquier programa pueda abrirlos. Además se suele solicitar que se entregue un fichero con las líneas de rotura con las que se ha realizado dicho MDE. Este modelo ráster, puede servirnos posteriormente para trabajar en un SIG sin necesidad de generarlo nosotros a partir de las curvas vectoriales de la cartografía.

Si hemos solicitado una ortofotografía verdadera habrá entonces que tenerlo en cuenta en el apartado de la geometría del vuelo, puesto que como ya hemos dicho, requieren de mayor recubrimiento estereoscópico. Además, se suele requerir entonces de una toma de datos LiDAR para que el MDS tenga mayor exactitud. Esto, sumado a que la generación de la ortofoto es mucho más laboriosa, puede incrementar mucho los costes del trabajo.

Se requerirá en este apartado un control del MDE o del MDS antes de realizar la ortofotografía, y posteriormente, también se han de especificar las tolerancias que han de cumplir geoméricamente las ortofotos.

Se suele indicar también en este apartado las premisas con respecto a las correcciones radiométricas que se le han de realizar a los fotogramas para generar el mosaico final. Hay que ser muy cuidadosos en este aspecto, puesto que no se deben permitir muchas manipulaciones, ya que éstas conllevan a pérdidas de calidad métrica en las ortofotos.

Finalmente, se especificarán los formatos de entrega de los archivos digitales y en caso de que el trabajo sea demasiado extenso, qué formatos de compresión deseamos.

3. PLANIFICACIÓN DEL VUELO

La planificación de un proyecto fotogramétrico podemos dividirla en tres fases:

- **Planificación del vuelo** que debe seguirse para tomar todas las fotografías aéreas que se usarán en el proyecto.
- **Planificación del control terrestre**, así como la ejecución de todos los trabajos topográficos que satisfagan la precisión requerida por el proyecto.
- **Estimación de los costos** que conlleva el proyecto.

La condición fundamental de toda planificación de vuelo, es la obtención una adecuada cobertura fotográfica con el mínimo de fotografías, tal que cada parte del terreno por pequeña que sea, debe ser cubierta estereoscópicamente. Esto significa que toda la superficie debe aparecer en las zonas de superposición tanto de fotografías adyacentes de un recorrido como en las áreas superpuestas de recorridos vecinos.



Figura 150. Proyecto de vuelo de una traza lineal.

Como se puede apreciar en la *figura 150*, en el caso de obras civiles lineales, la geometría de la traza lineal puede complicar la toma fotogramétrica para que se cumpla que todas las zonas posean recubrimiento estereoscópico

3.1. DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida que tendremos serán, la geometría de la zona a sobrevolar, y la escala de la cartografía que queremos realizar.

A partir de estos datos, deberemos realizar la planificación del vuelo calculando el número de fotografías necesarias y su disposición para poder restituir toda la superficie deseada.

3.2. CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL VUELO

Recordaremos algunas de las premisas que ya se han visto en los primeros capítulos.

En primer lugar, habrá que tener en cuenta la escala del producto final para saber a qué escala deberá capturarse el terreno en la toma fotogramétrica (*Figura 151*).

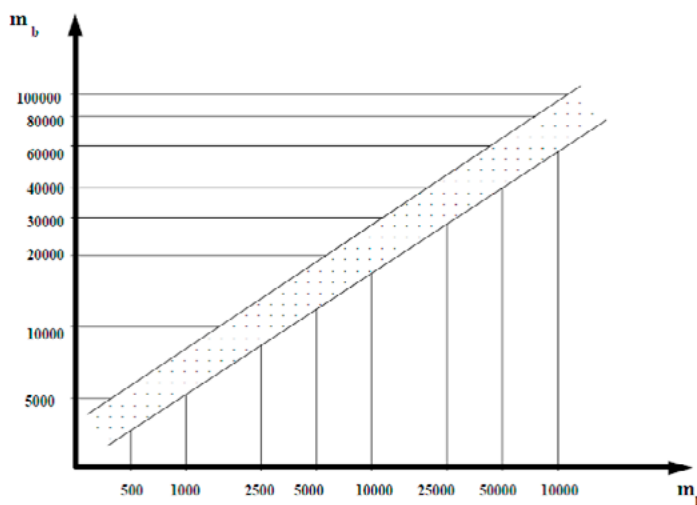


Figura 151. Relación entre escala fotográfica y cartográfica.

El segundo dato a obtener es la altura de vuelo, la cual sabemos que está supeditada por la distancia focal de la cámara. Dicho dato no será elección nuestra si no que deberemos ajustarnos a las cámaras que tengan las empresas encargadas del vuelo fotogramétrico. Conocido este dato, podremos obtener la altura de vuelo sobre el terreno (*Figura 152*):

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} \Rightarrow H = c mb$$

Ec. 23: Relación entre la escala y la altura de vuelo

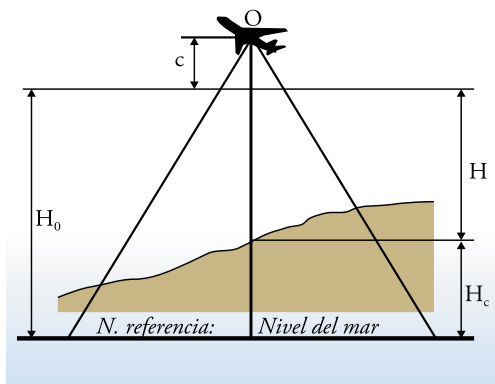


Figura 152. Altitud de vuelo sobre el nivel del mar.

En función de los recubrimientos horizontal y transversal que hayamos especificado en el pliego, tendremos las dimensiones S_1 y S_2 de los modelos estereoscópicos (Figura 153) y su solapamiento entre pasadas (Figura 154).

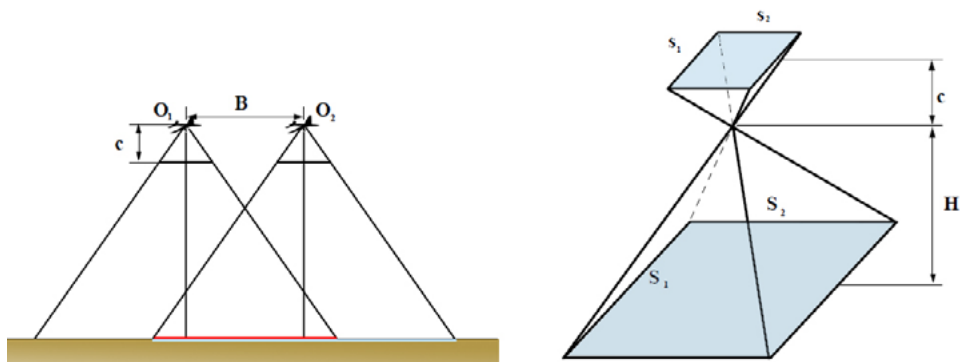


Figura 153. Dimensiones de la fotografía.

$$S_1 = mbs_1 \quad S_2 = mbs_2$$

Ec. 24: Tamaño del fotograma sobre el terreno

La distancia que recorrerá el avión entre toma y toma se denomina “Base” y se obtiene de la siguiente forma:

$$B = S_1 (1-p) = s_1 mb (1-p) = s_1 mb \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$$

Ec. 25: Base

El recubrimiento transversal se refiere a la distancia entre pasadas y viene determinada por los siguientes parámetros:

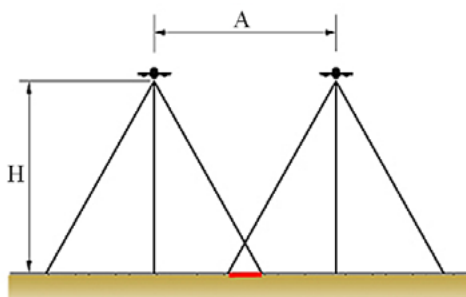


Figura 154. Recubrimiento transversal.

$$A = S_2 (1-q) = s_2 mb (1-q) = s_2 mb \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

Ec. 26: Distancia entre pasadas

Si la zona de trabajo es regular o se puede asemejar a un polígono regular, como la de la figura 155, entonces, las pasadas se dispondrán paralelas entre sí.

Sin embargo, si la zona del proyecto es una característica particular del terreno, es decir, tiene forma irregular, o si es larga, estrecha y girada de las direcciones cardinales como la de la figura 156 (cauces de ríos, trazados de nuevas carreteras, líneas costeras,.....etc.) no resultará económico

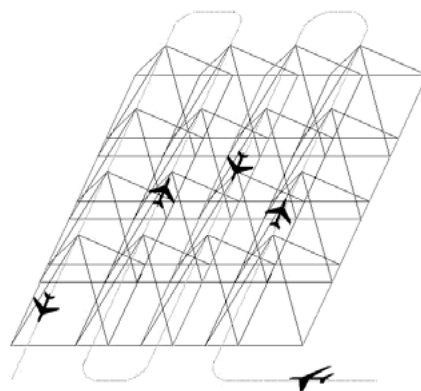


Figura 155. Esquema de vuelo en zona regular.

volar en las direcciones Norte-Sur o Este- Oeste puesto que obtendríamos muchas pasadas con pocos fotogramas útiles. En este caso es evidente que habría que volar las mayores longitudes de línea paralelamente a los límites de la zona, pero con mucha precaución de recubrir suficientemente los cambios de pasadas.

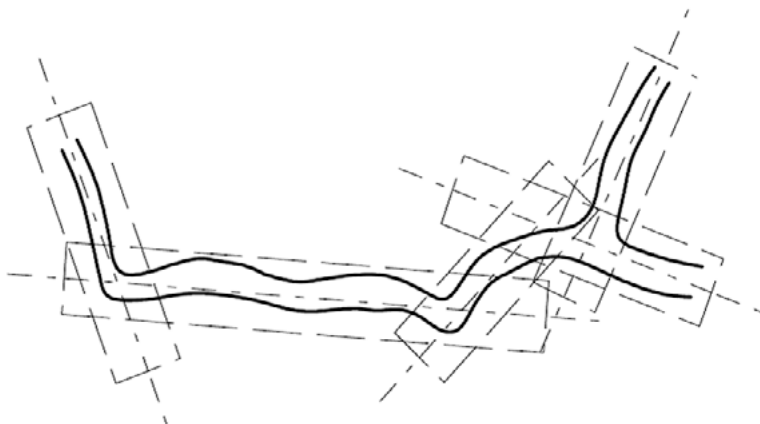


Figura 156. Esquema de vuelo en zona irregular

Ahora calcularemos más detalladamente el número de fotografías necesarias para recubrir toda la zona, siguiendo la geometría de la *figura 157*.

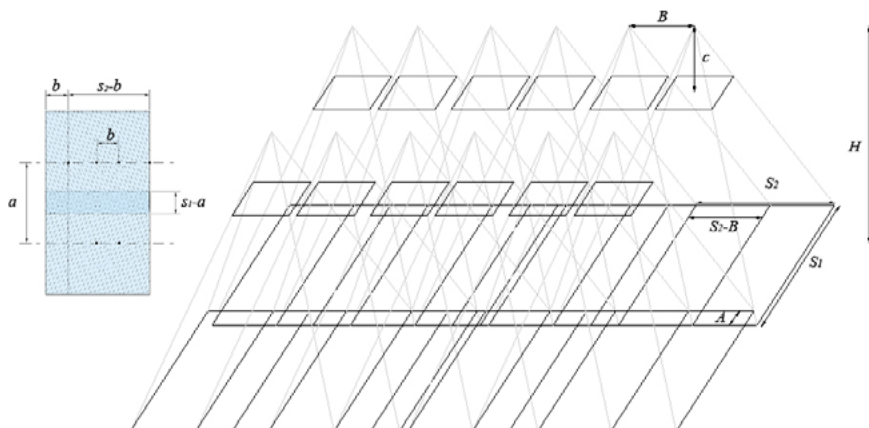


Figura 157. Disposición de fotografías para el cálculo del total de fotografías.

El número de fotos por pasada “ n_p ” será:

$$n_p = \frac{L_p}{B} + 1$$

Ec. 27: Número de fotos por pasada

El número de pasadas “ n_q ”:

$$n_q = \frac{L_q - S}{A} + 1$$

Ec. 28: Número de pasadas

Finalmente, el número de fotos total será:

$$N^{\circ} \text{ fotos total} = n_p \times n_q$$

Ec. 4: Número de fotos totales

De este número total dependerán algunos aspectos de otras fases tales como el volumen de información que necesitaremos para almacenar todas las fotografías, el número de puntos de apoyo y de control en campo. Por ello, no se ha de planificar ni en exceso ni en defecto, puesto que los costes verdaderos del proyecto, podrían diferir de los estimados por una mala planificación.

CAPÍTULO 7

FUTURO DE LA FOTOGRAMETRÍA; LiDAR Y FOTOGRAMETRÍA POR SATÉLITE

1. LiDAR

Hemos indicado en capítulos anteriores que el LiDAR¹⁹ se hace necesario en algunos casos en los que se desea realizar MDS con mayor exactitud, ya sea porque queramos hacer una ortofoto verdadera o porque necesitamos un MDE o MDS de exactitudes mayores.

La técnica LiDAR hace referencia al sistema que utiliza la radiación electromagnética en las frecuencias ópticas del visible e infrarrojo cercano (*figura 158*), siendo capaz de realizar mediciones de distancia.

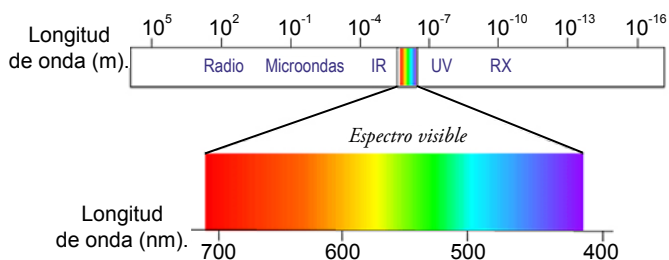


Figura 158. Espectro electromagnético.

El LiDAR aerotransportado es un sistema activo basado en un sensor que emite y recibe un pulso láser que se puede instalar en aviones o helicópteros. Esta tecnología está sustituyendo cada vez más a los métodos fotogramétricos para obtener MDS de alta precisión, porque consigue disminuir los costes y plazos de entrega, a la vez que se obtienen precisiones de unos 15cm en elevación y una mayor densidad de medidas.

¹⁹ Light Detection And Ranging

El funcionamiento del LiDAR consiste en un sensor de barrido que realiza la emisión de pulsos láser y mide el tiempo que tardan dichos pulsos en llegar a la superficie terrestre y volver hasta el sensor. Tiene el mismo funcionamiento que la medida de distancias de una estación total.

En el avión, además, se instala un GPS que le permite posicionarse en coordenadas (*figura 159*). Para aumentar la precisión en el posicionamiento del instrumento, se utiliza un GPS en tierra. Después de realizar el vuelo se combinan los datos GPS del avión con los del GPS en tierra, y se obtienen precisiones de 5 cm en la posición del instrumento. Se suele disponer también del sistema de navegación inercial al igual que en un avión fotogramétrico convencional.

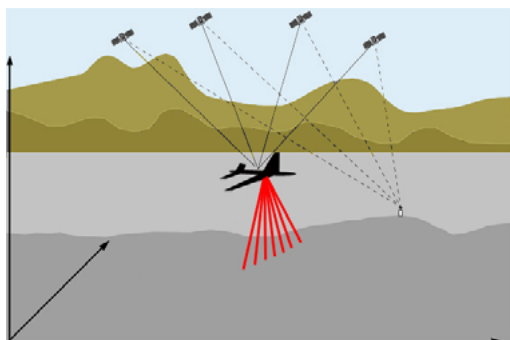


Figura 159. Funcionamiento del vuelo LiDAR.

En principio, todos los rayos láser salen en una única dirección apuntando hacia abajo, pero hay un espejo rotatorio que los desvía a ambos lados del avión con un ángulo de apertura configurable, de forma que se realiza un barrido de una determinada franja del terreno su anchura dependerá de la altura del vuelo.

Combinando toda esta información (distancia medida con el láser, ángulo del espejo que realiza el barrido, posición exacta del instrumento con GPS y sistema de navegación inercial), podemos obtener la medición de la altura del terreno con una precisión de 15 cm en Z.

Cabe distinguir el comportamiento diferente que adopta el terreno dependiendo de las características del mismo. Cuando el rayo láser llega al terreno se comporta de forma diferente. Véase *figura 160*:



Figura 160. Funcionamiento del LiDAR ante distintas superficies.

En una *superficie sólida* (edificios, suelo, etc.), el rayo se refleja sin ningún problema y vuelve al avión.

En el *agua* el rayo láser sufre una reflexión especular y no vuelve al avión, por lo que no se obtiene ninguna información, apareciendo un hueco sin datos que habrá que interpolar a partir de las alturas de alrededor o de otros datos batimétricos de los que se pueda disponer.

En el caso de *la vegetación*, el rayo choca en primer lugar con la copa del árbol. En este momento parte del rayo se refleja y vuelve al avión, pero al tratarse de una superficie no sólida, hay otra parte del rayo que atraviesa la vegetación hasta llegar al suelo y vuelve al avión. El sistema guarda las coordenadas y alturas de todos los pulsos recibidos.

1.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL LiDAR

La principal ventaja ya ha sido mencionada y es la elaboración de un MDS, que en este caso de una precisión decimétrica con un coste menor que por medios fotogramétricos convencionales.

Una de las ventajas de la tecnología LiDAR consiste en la posibilidad de medir, para cada pulso, el primer y el último de los rebotes que vuelven al avión. Esto permite medir la altura del terreno en zonas completamente cubiertas por la vegetación, lo cual no es posible con técnicas de medición clásicas como la fotogrametría.

La obtención del MDS es prácticamente directa. La única operación a realizar, en la mayor parte de los casos, es la orientación relativa de las pasadas del vuelo, o la georreferenciación a un sistema de referencia determinado.

Se pueden volar muchos más días al año. Al ser un sensor activo, no necesita la luz del sol y se puede volar de día, de noche o con nubes altas. Recordemos que en fotogrametría convencional necesitamos una altura del sol determinada y días completamente despejados.

Sin embargo, presentan a día de hoy, dos limitaciones: la primera es la captura de datos no pertenecientes a al terreno como la vegetación, edificaciones, cables de alta tensión, etc. El tratamiento que se emplea es el filtrado de los elementos no pertenecientes al terreno, para pasar del MDS al MDE; éste se realiza de forma manual mediante identificación y eliminación selectiva de los puntos pertenecientes a estos elementos. Actualmente se están desarrollando diversos algoritmos que permiten realizarlo de forma más automática.

La segunda desventaja es la falta de información en todo el espectro visible. No obtenemos una fotografía como tal, con lo que nos cuesta identificar los elementos del terreno. Esto es un inconveniente, porque, aunque el láser proporciona datos de intensidad de los rayos reflejados, es difícil identificar los elementos a los que corresponden. Por ello, resulta conveniente la combinación de estos datos con sensores fotográficos digitales, que proporcionan información en las bandas visibles.

Igualmente, el objetivo futuro, es combinar la información adquirida por ambos sensores: la procedente de LiDAR, que proporciona una elevada precisión geométrica, y la procedente de la fotografía aérea, que proporciona una información del terreno continua, además de una buena información métrica.

1.2. APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA LiDAR

Las principales aplicaciones en ingeniería civil, para las que se suele utilizar la tecnología LiDAR son:

- **Cartografía para estudios de inundaciones:** una de las principales aplicaciones es la realización de estudios de hidrológicos y de inundabilidad. Para este tipo de trabajos se necesitan mediciones muy precisas de las cotas del terreno. Hasta ahora, todos estos trabajos se realizaban por fotogrametría, lo que conllevaba un elevado coste y largos plazos de entrega. Con la tecnología LiDAR se pueden medir grandes extensiones con un menor coste y menor plazo de entrega. Además, se dispone de una medición de alturas por cada metro cuadrado del terreno, mientras que por fotogrametría clásica, en zonas planas, las curvas de nivel trazadas, pueden estar muy separadas y al interpolar el MDS no sería tan correcto.
- **Aplicaciones en zonas urbanas:** Otra de las principales aplicaciones de la tecnología LiDAR es la medición de zonas urbanas para planificación de redes de telecomunicaciones, detección de construcciones ilegales, planes de emergencia, aplicaciones de ingeniería y otras aplicaciones SIG (*Figura 161*).
- **Aplicaciones en el mantenimiento de líneas eléctricas:** Si instalamos el instrumento LiDAR en un helicóptero, de forma que se pueda volar más bajo y despacio, podemos medir con gran precisión las líneas de alta tensión, tal y como se muestra en la *figura 162*.

En este caso el primero de los rebotes corresponde con la altura de los cables y el último con la altura del suelo. De esta forma se puede localizar

los árboles que se acercan peligrosamente a los cables y que por lo tanto deben de ser talados, así como construcciones ilegales que estén a una distancia inferior a lo permitido.

Existen proyectos actuales de inventariado de tendidos eléctricos con el fin de que los helicópteros de emergencia (bomberos, 112) tengan cartografía precisa y puedan volar con mayor seguridad por la noche en caso de que se requiera.

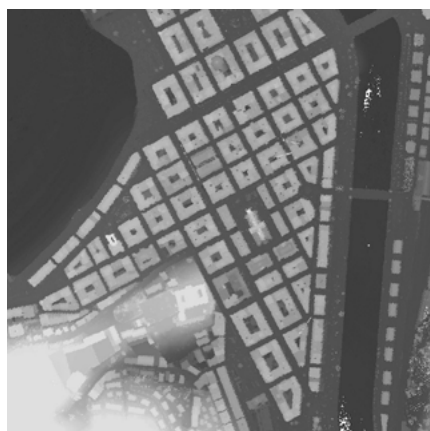


Figura 161.
Aplicación LiDAR
en zonas urbanas.
(fuente: Dielmo 3D S.L)

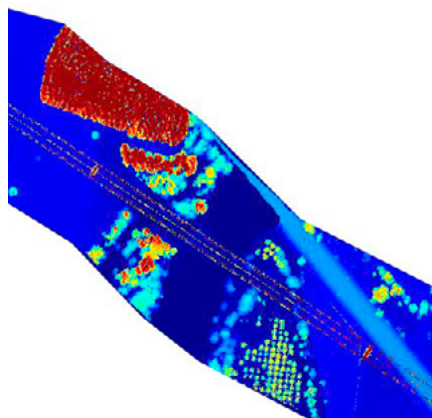


Figura 162.
Aplicación LiDAR
en el mantenimiento de
líneas eléctricas
(fuente: Dielmo 3D S.L)

- **Para proyectos de ingeniería:** Cartografía para proyectos de ingeniería civil: carreteras, líneas de ferrocarril, etc. Para mapas de ruido, inventario, estimación precisa de movimientos de tierras, visualización 3D y otras aplicaciones SIG.

2. FOTOGRAMETRÍA POR SATÉLITE

Hoy en día existe la posibilidad de realizar fotogrametría a partir de imágenes capturadas por sensores instalados en satélites.

La realización de fotogrametría mediante imágenes de satélite, tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Por ejemplo, los datos espaciales tienen una menor resolución espacial que los aéreos, cuestión lógica ya que la altura de vuelo es muy diferente. Esto impide que se usen para escalas de detalle, aunque se verá que es posible extraer información destinada a escalas desde 1:100000 hasta incluso 1:5000. Puede compensar este problema la amplia cobertura, la periodicidad de las tomas, la elevada resolución espectral y la disponibilidad en algunos casos de triple toma de datos estereoscópica (un barrido cenital y dos oblicuos).

La geometría de la fotogrametría mediante sensores espaciales, difiere de las tomas fotogramétricas convencionales y se asemejan a las tomas de las cámaras digitales lineales de las que se habló en el capítulo 3.

La estereoscopia es un requisito indispensable en las imágenes para poder obtener la coordenada Z o elevación del terreno. Las imágenes tomadas por algunos satélites son estereoscópicas debido a que realizan dos o tres barridos simultáneos: uno vertical y otro u otros oblicuos.

2.1. TIPOS DE GEOMETRÍA ESTEREOSCÓPICA

La geometría estereoscópica oblicua puede realizarse de dos formas: transversal o longitudinal.

En el caso de geometría estereoscópica transversal, las imágenes se obtienen desde dos órbitas consecutivas. Ésta geometría implica que el sensor tiene la capacidad de giro lateral (perpendicular a la trayectoria orbital). Este tipo de geometría fue la primera que se usó en datos espaciales y en concreto es la utilizada por el satélite SPOT. Otros satélites que usan este tipo de geometría en la estereoscopia son los CBERS, ADEOS, KOPSAT-1, RESOURCESAT. Su principal inconveniente es la diferencia temporal entre las imágenes, ya que el satélite puede emplear uno o más días en pasar por órbitas consecutivas y dicha diferencia afecta mucho a la radiometría de la imagen. Este hecho hace que exista una clara tendencia hacia las tomas con estereoscopia longitudinal.

La geometría estereoscópica longitudinal puede alcanzarse de diversas formas, tal y como se muestra en la *figura 163* y es función del número de sensores que disponga. Por ello, se la estereoscopia se puede alcanzar según:

- *Estereoscopia longitudinal de un único sensor*: el cual gira hacia delante o hacia atrás. Aunque estos sensores también tienen la posibilidad de giro lateral.
- *Estereoscopia longitudinal de dos sensores*: generalmente uno es cenital y el otro oblicuo.
- *Estereoscopia longitudinal de tres sensores*: uno cenital y los otros dos oblicuos, uno hacia delante y otro hacia atrás. En este caso se tiene triple estereoscopia por las combinaciones de sensores (atrás-cenital; adelante-cenital; adelante-atrás) y por tanto, opción de aumentar la fiabilidad del proceso.

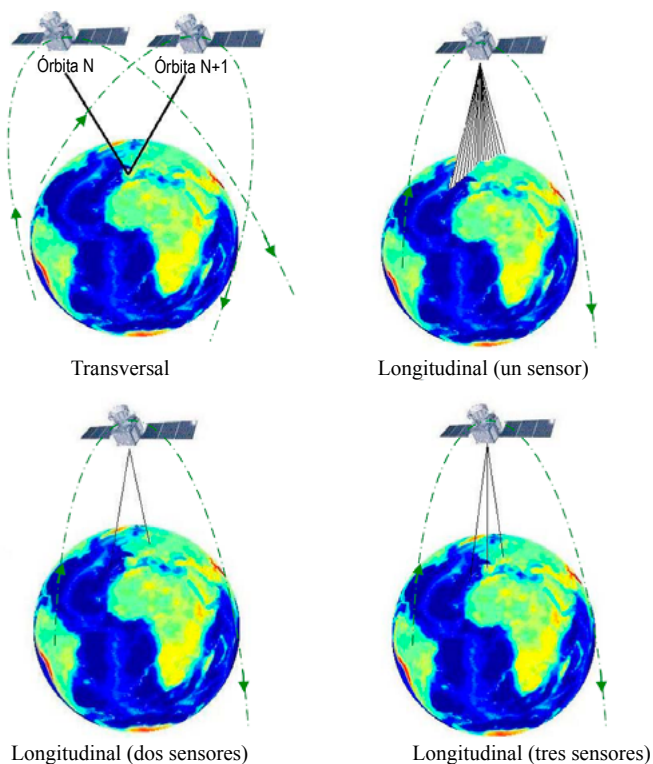


Figura 163. Tipos de estereoscopia satelital

Las ventajas o desventajas que puedan tener difieren únicamente en que, si toda la toma la realiza un único sensor, sólo hay unos parámetros de calibración y datos inherentes a la óptica del sensor. Sin embargo, el inconveniente es que los ángulos de toma pueden no ser los esperados puesto que se alcanzan con un movimiento giratorio del sensor. Por otro lado, las ventajas e inconvenientes de las tomas con más de un sensor, son las complementarias a las indicadas para las de único sensor. Así pues, la geometría de la toma está asegurada puesto que los sensores están montados y calibrados en cuanto a posición, pero el inconveniente surge que no son los mismos sistemas ópticos los que adquieren las dos o tres imágenes, dependiendo de si tenemos doble o triple estereoscopía.

2.2. SATÉLITES ESTEREOSCÓPICOS

El primer satélite con capacidad de tomar datos estereoscópicos fue el SPOT, después le han sucedido una larga lista, resumida en la siguiente tabla, en la que además de mostrarse la resolución espacial de cada uno de ellos, se muestra también la escala a la que se puede elaborar la cartografía final.

Sensor espacial	RE (m)	Escala Cart
QuickBird	0.7	1: 2400
EROS A	1.8	1: 25000
ES Ikonos Orbview 3	1	1: 10000
IRS P5	2.5	1: 5000
Spot 5	5	1: 25000
MOMS-2P	6	1: 25000
Kompsat 1	6.6	1: 25000
ADEOS	8	1: 50000
Aster	1.5	1:100000
Cbers	20	1: 50000

Tabla 8. Escalas cartográficas de satélites estereoscópicos

BIBLIOGRAFÍA

- ABAD REAL, P.: *Conceptos de Geodesia*. 2ª ed. Universidad de las Palmas de Gran Canaria: Vicerrectorado de Calidad e Innovación Educativa, 2005.
- BONNEVAL, H.: *Photogrammétrie générale*. 1ª ed. France: Eyrolles, 1972.
- TECHNICAL SUPPORT DEPARTMENT. RACUS: Accuracy control at various stages of photogrammetric processing in PHOTOMOD system. 2012, pp. 12. Disponible Online: <http://www.racurs.ru/?page=586>.
- REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Boletín Oficial del Estado: 2007.
- FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A.: La Proyección UTM. 2001, pp. 86. Disponible Online: <http://dspace.universia.net/handle/2024/494>.
- FRANCO REY, J.: *Nociones de topografía, geodesia y cartografía*. 1ª ed. Extremadura (España): Universidad de Extremadura, 1999.
- GARCÍA, J. C.: DielmoOpenLidar: Control de calidad de datos LIDAR y generación de productos finales. En Actas del congreso, III Jornadas de SIG Libre, pp. 14. 2009, Servei de sistemes D'informació Geogràfica I Teledetecció, Girona, España.
- GARCÍA LEÓN, J. y CUARTERO SÁEZ, A.: Comparación de los procesos de rectificación y ortoproyección mediante fotogrametría terrestre digital. En Actas del congreso, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, pp. 9. 2002, Santander, España.
- GARCÍA LERMA, J. L.: *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. 2ª ed. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- ASOCIACIÓN PROFESIONAL DEL CUERPO DE INGENIEROS GEÓGRAFOS: *Tema-rio del cuerpo de Ingenieros Geógrafos*. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento, 2008.
- GONZÁLEZ-MATESANZ, J. y DALDA-MOURÓN, A.: Modelos de transformación entre ED50 y ETRS89. En Actas del congreso, 5ª Setmana Geomàtica de Barcelona, pp. 8. 2004, Barcelona, España.
- GONZÁLEZ AGUILERA, D.: Apuntes del procesamiento avanzado de imágenes digitales. Open Course Ware: Universidad de Salamanca, 2010.
- GONZÁLEZ, R. y WOODS, R.: *Tratamiento digital de imágenes*. 1ª ed. Madrid: Editorial Díaz de Santos, S.A., 1996.
- JAUREGUI, L.: *Apuntes de Fotogrametría*. Universidad de los Andes, 2010. Disponible Online: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/>.
- LUIS RUIZ DE, J. M.: *Apuntes de fotogrametría*. Universidad de Cantabria, 2010. Disponible Online: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/topografia-y-geodesia-1/>.

- MAGDALENO MAS, F. y MARTÍNEZ ROMERO, R.: Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. En Ingeniería Civil, 2006, Vol. 142, pp. 1-15.
- MCGLONE, J. C. y otros.: *Manual of photogrammetry*. 1ª ed. EEUU: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- MENÉNDEZ, M. Á. y NÚÑEZ, V.: *El Uso de los Sensores Remotos en los Recursos Naturales*. Instituto de recursos naturales y Ecodesarrollo, 2009. Disponible Online: <http://ediblio.unsa.edu.ar/55/>.
- MORALES, M. R.: *Nociones de topografía y fotogrametría aérea*. 1ª ed. Granada: Editorial Universidad de Granada, 2004.
- OLAZABAL, M. J.: Aplicaciones de la fotogrametría terrestre en levantamientos para Ingeniería Civil. En Ciencia e Ingeniería, 2010, Vol. 19, n. 2, pp. 53-72.
- PÉREZ ÁLVAREZ, J. A.: Apuntes de fotogrametría III. En Univ. Extremadura, Mérida, 2001, Vol.
- QUIRÓS ROSADO, E. y CUARTERO SÁEZ, A.: Posibilidades estereoscópicas de los datos espaciales. En Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 2005, Vol. n. 5, pp. 65-76.
- RACUS: *Photomod, Manual del usuario*. 1ª ed. Moscú: RACUS, 2010.
- SANTAMARÍA PEÑA, J.: Integración de ortofotografía digital en sistema de información geográfica aplicación a la determinación de la superficie catastral rústica Universidad de la Rioja, 2001.
- SANTOS PÉREZ, L. J.: Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lidar, el posible futuro de la cartografía catastral urbana. En Catastro. Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas, 2005, Vol. 53, pp. 24.
- SCHENK, T. F.: *Fotogrametría Digital*. 1ª ed. Instituto Cartográfico de Cataluña, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING: *Asprs Accuracy Standards For Large-Scale Maps*. Annual reports of the ASPRS, 1990.
- SEVILLA DE LERMA, M. J.: Historias de Matemáticas. Introducción Histórica a la Geodesia. En GIE Pensamiento Matemático, 2012, Vol., pp. 1-63.
- SOBRINO SÁNCHEZ, J. A.: Introducción a la Fotogrametría. En Universidad Politécnica Madrid.
- DIRECCIÓN GENERAL DE ORDENACIÓN DEL TERRITORIO Y URBANISMO: *Pliego de Prescripciones técnicas para la elaboración de cartografía de la región Extremeña*. Gobierno de extremadura, 2011.

RECURSOS ONLINE

Instituto Geográfico Nacional (IGN): Datos Geodésicos. <http://www.ign.es/ign/layout/datosGeodesicos.do>.

Instituto Geográfico Nacional (IGN): Visor de datos cartográficos. <http://www2.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html>.

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

