

Introducción a la Fotogrametría digital en Ingeniería Civil..... 1

1 Introducción..... 1

2 Conceptos básicos. 1

2.1 Ventajas en el uso de las imágenes como fuente de información..... 1

2.2 Principios fundamentales en Fotogrametría..... 2

2.3 Escala de una fotografía..... 4

2.4 Identificación de puntos homólogos: de la visión estereoscopía a la correlación de imágenes. 5

2.5 Otros conceptos fotogramétricos. 6

2.6 Sistemas de coordenadas empleados..... 8

2.7 Cámaras usadas en Fotogrametría. 9

2.8 Aplicaciones fotogramétricas sencillas. 11

2.8.1 Altura de un detalle vertical en una fotografía aislada. 11

2.8.2 Cálculo del desnivel entre dos posiciones en un modelo estereoscópico. 12

3 Método General de la fotogrametría 13

4 Cálculo de la orientación externa en un modelo..... 15

5 Georeferencia de modelos fotogramétricos. 17

5.1 Métodos indirectos..... 18

5.2 Métodos directos..... 19

6 Fotogrametría multimagén convergente..... 22

7 Otros productos fotogramétricos. 25

8 Parámetros básicos para definir un vuelo fotogramétrico aéreo destinado a la obtención de cartografía. 27

9 Documentación adicional. Proyecto de vuelo fotogramétrico..... 28

10 Documentación adicional. Datos básicos de un certificado de calibración. 29

11 Documentación adicional. Fotos capturadas de D. Leonardo torres Quevedo..... 30



Tabla de ilustraciones

Ilustración 1.- Rango de longitudes de onda habitualmente en Fotogrametría cartográfica.	2
Ilustración 2.- Izquierda: modelización de un haz perspectivo. Derecha: arriba, modelización de un objetivo fotográfico convencional (óptico) como un punto. Abajo: moderna cámara digital.	3
Ilustración 3.- Necesidad de dos haces perspectivos para reconstruir una imagen. Modelo fotogramétrico.....	4
Ilustración 4.- Concepto de escala en una fotografía.	5
Ilustración 5.- Ejemplo de un bloque fotogramétrico en Santander.	8
Ilustración 6.- Sistemas de coordenadas de referencia fundamentales usados en Fotogrametría.	9
Ilustración 7.- Cámara digital matricial. VexcelUltracamX. (www.gtbi.net)	10
Ilustración 8.- Especificaciones de la cámara digital UltracamX. (www.gtbi.net)	10
Ilustración 9.- Imágenes multispectrales capturadas. ((www.gtbi.net))	11
Ilustración 10.- Determinación del altura de un detalle vertical.	12
Ilustración 11.- Paralaje estereoscópico para un punto.	12
Ilustración 12.- Relación entre el paralaje (P), distancia focal (f), base (B) y la distancia de la línea de vuelo al punto (Z).	13
Ilustración 13.- Ecuación de coplanaridad.	16
Ilustración 14.- Ecuación de colinealidad.....	17
Ilustración 15.- Fundamento de la aerotriangulación (http://www.ign.es/ign/resources/acercaDe/aig/A2.pdf)	18
Ilustración 16.- Ejemplo de reseñas fotogramétricas para el apoyo del vuelo que se ha adjuntado de Santander.	19
Ilustración 17.- Combinación de los sistemas GNSS e IMU. (Apuntes Fotogrametría Digital, Univ. Jaén)	21
Ilustración 18.- Sistema ADS40, Leica GeoSystem (Apuntes Fotogrametría Digital, Univ. Jaén).	21
Ilustración 19.- Cámara Ultracam Osprey . (http://www.microsoft.com/en-us/ultracam/UltraCamOspreySpecs.aspx)	22
Ilustración 20.- Flujo de trabajo a partir de múltiples imágenes convergentes.	25
Ilustración 21.- Diferencia conceptual entre una imagen aérea y una ortoimagen.	26
Ilustración 22.- Flujo de trabajo para la obtención de una ortofoto.	27
Ilustración 23.- Gráfico de vuelo en Santander.	28
Ilustración 24.- Planificación del vuelo.	29
Ilustración 25.- Características de la imagen pancromática.	30
Ilustración 26.- Posición del punto principal de autocolimación respecto al centro fiducial.	30
Ilustración 27.- Fotografías capturadas en campo (Canon Eos 5D, objetivo 50 mm).....	31

Introducción a la Fotogrametría digital en Ingeniería Civil.

1 INTRODUCCIÓN.

La Fotogrametría constituye sin lugar a dudas la metodología preferida para la obtención de cartografía, debido a su favorable relación entre coste y tiempo necesario para su obtención frente a las metodologías topográficas clásicas expuestas con anterioridad, reservándose en un caso genérico estas últimas metodologías para levantamientos de gran precisión en zonas pequeñas, para complementar a la Fotogrametría cuando esta no pueda obtenerse en algunas zonas del territorio o cuando la Fotogrametría resulte imposible – por causas de plazo de obtención, habitualmente - .

A continuación se va a proceder a exponer los conceptos básicos en los que se fundamentan los diferentes métodos fotogramétricos. Se expondrán también los distintos procedimientos existentes para dotar de la métrica precisa a los productos obtenidos a partir de las fotografías, enumerándose también otros productos cartográficos derivados que se generan habitualmente.

2 CONCEPTOS BÁSICOS.

2.1 Ventajas en el uso de las imágenes como fuente de información.

El uso de fotografías o imágenes como fuente documental a partir de la cual se extrae información espacial tiene claras ventajas sobre otras metodologías de captura información:

- Se obtiene una representación completa y objetiva del objeto o superficie sobre la que se trabaja.
- La captura de información en campo es muy rápida, incluso para grandes extensiones.
- Si se precisa extraer información adicional en el futuro, no es necesario volver a campo a obtenerla, ni siquiera que exista el objeto.
- Permite obtener información espacial de localizaciones a las que incluso no es fácil el acceso físico.

Indicar finalmente que los sensores digitales que se emplean en la actualidad son capaces de codificar información electromagnética prácticamente en cualquier longitud de onda, usando

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



diferentes bandas. Las imágenes que se utilizan habitualmente en Ingeniería Civil para usos cartográficos o de documentación geométrica se reducen al espectro visible.

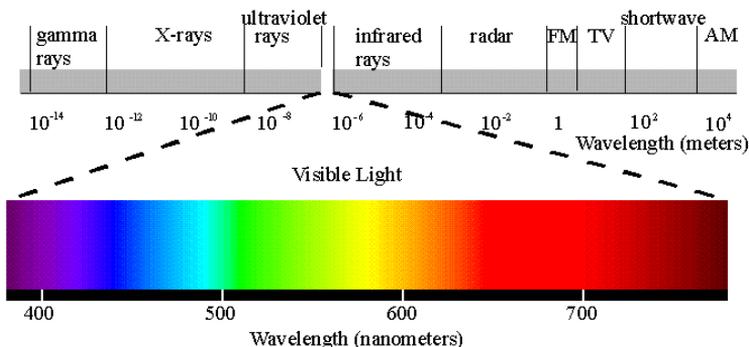


Ilustración 1.- Rango de longitudes de onda habitualmente en Fotogrametría cartográfica.

2.2 Principios fundamentales en Fotogrametría.

Uno de los componentes básicos en Fotogrametría lo constituyen las fotografías, evidentemente. Conceptualmente, una fotografía se puede considerar el registro de una perspectiva cónica de un objeto o superficie. Se definen los siguientes elementos fundamentales, que constituyen un haz perspectivo:

- Vértice del haz (V). Consistiría en el centro ideal del objetivo fotográfico en el cual se concentra toda la información capturada por el mismo y se proyecta en el plano de la fotografía. Puede ser un punto físico e incluso no existir, como ocurre con algunas de las modernas cámaras digitales.
- La proyección del vértice del haz sobre el plano de la fotografía se denomina punto principal (P), y su posición es clave en Fotogrametría.
- La distancia la que se encuentra el vértice del haz del punto principal (P) se denomina focal, o focal equivalente. Habitualmente se expresa en mm.

Idealmente, la energía que se codifica en cada pixel de una fotografía se materializa a partir de un rayo perspectivo que en el exterior de la cámara viaja desde cada punto de la superficie terrestre hasta el centro del objetivo, y que continua en el interior de la cámara hasta llegar a ser registrado en la imagen.

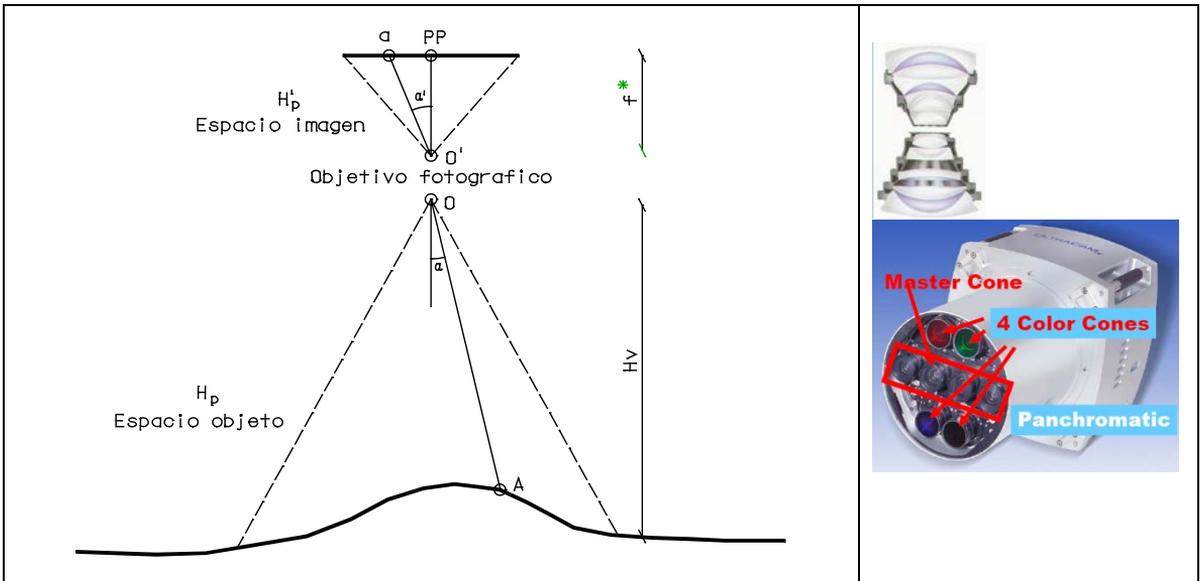


Ilustración 2.- Izquierda: modelización de un haz perspectivo. Derecha: arriba, modelización de un objetivo fotográfico convencional (óptico) como un punto. Abajo: moderna cámara digital.

De forma genérica, no es posible reconstruir un objeto fotografiado a partir de un único haz perspectivo o fotografía, salvo que se efectúen hipótesis concretas o se emplee algún otro tipo de información adicional.

Para poder reconstruir el objeto fotografiado, se precisa disponer al menos de la imagen del mismo desde dos puntos de vista diferentes, y que cumpla además una serie de condiciones que se expondrán con posterioridad; es decir, se necesitan al menos dos haces perspectivos V y V' . A los rayos perspectivos que intersectan en un mismo punto de la superficie se les denomina rayos homólogos. A las posiciones de la fotografía que corresponden a estos rayos homólogos se las denomina puntos homólogos, y su identificación en ambas fotografías es otra de las claves en Fotogrametría. Al conjunto de las dos imágenes correspondientes a dos puntos de vista diferentes del mismo objeto se le denomina modelo, y constituye la unidad de trabajo del proceso fotogramétrico.

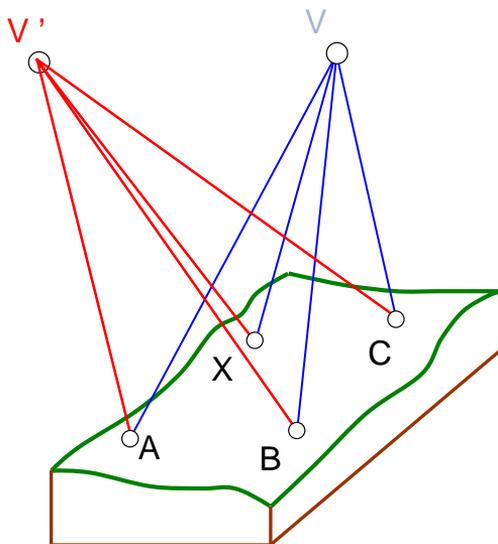


Ilustración 3.- Necesidad de dos haces perspectivos para reconstruir una imagen. Modelo fotogramétrico.

Al conjunto de los parámetros que permiten definir con precisión un haz perspectivo se les denomina datos internos. Al conjunto de los parámetros que permiten ubicar cada haz perspectivo en el espacio en la misma posición en la que fué tomado, respecto a un cierto sistema de referencia en el terreno, se les denomina datos externos.

2.3 Escala de una fotografía.

En primer lugar, es evidente que una fotografía no posee una escala, ya que es una perspectiva cónica de una cierta superficie. Sin embargo la definición de la escala de una fotografía, tal como se va a efectuar a continuación, permite caracterizar a la misma.

Si se denomina f a la distancia focal, y H a la altura o distancia a la que fue tomada la fotografía sobre la superficie o hasta el objeto de interés, se puede definir la siguiente relación tal como se observa en la figura siguiente, en la que se deben introducir estas magnitudes de forma coherente dimensionalmente.

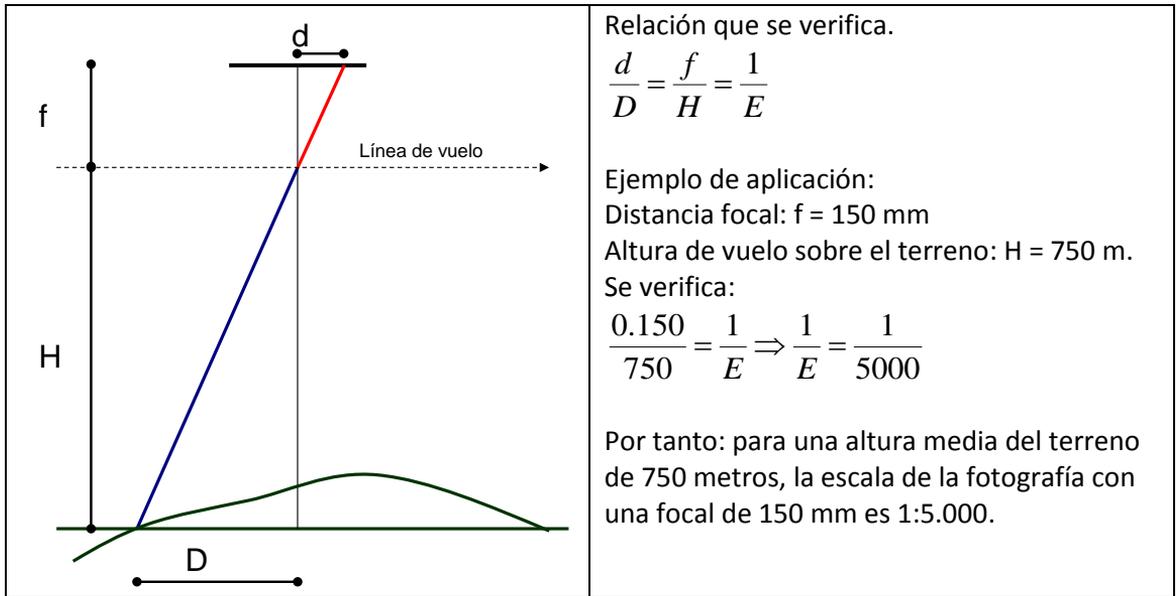


Ilustración 4.- Concepto de escala en una fotografía.

Sin considerar en una primera aproximación el efecto de la perspectiva, la distorsión del objetivo y la curvatura de la superficie terrestre (supuesto se esté fotografiando una superficie), es evidente que tan sólo aparecerán a la “escala” de la fotografía aquellos objetos situados a la altura media del vuelo, apareciendo representados a escalas mayores objetos situados más próximos a la cámara y a escalas menores los situados a mayor distancia de la altura media. En el diseño de un proyecto fotogramétrico se debe intentar que la escala en un modelo fotogramétrico sea lo más homogénea posible, para obtener las precisiones esperadas en esta metodología.

2.4 Identificación de puntos homólogos: de la visión estereoscopia a la correlación de imágenes.

El diccionario de la lengua española define un estereoscopio como un “*Aparato óptico en el que, mirando con ambos ojos, se ven dos imágenes de un objeto, que, al fundirse en una, producen una sensación de relieve por estar tomadas con un ángulo diferente para cada ojo*”. Los seres humanos tenemos la capacidad, en visión binocular, de apreciar el relieve – más bien de saber discernir que objetos están relativamente entre sí a mayor o menor distancia –, debiendo observar simultáneamente dos imágenes de un cierto objeto que cumplan unas ciertas condiciones: cada ojo debe ver sólo su perspectiva, y los rayos perspectivos para un mismo objeto se deben interceptar bajo un ángulo relativamente pequeño, dicho de otra forma, el giro relativo entre las dos imágenes no debe ser muy elevado.

Esta cualidad de la vista humana, convenientemente explotada, constituye el procedimiento de obtención manual de puntos homólogos en un modelo fotogramétrico: un operador, con el instrumento de visión estereoscópica adecuado, identifica puntos homólogos en cada uno de los haces de un modelo, permitiéndose el cálculo y registro de la posición correspondiente.

El carácter totalmente digital que tiene la Fotogrametría en la actualidad le permite aprovechar algoritmos existentes de tratamiento de imágenes. En particular, en distintas fases del proceso fotogramétrico se intenta que algoritmos automáticos, que no requieran de la intervención de un operador, encuentren detalles o entidades homólogas puntuales, lineales o superficiales, en dos o más imágenes. Este tipo de técnicas, que funciona adecuadamente en determinados terrenos o zonas, no tiene resultados satisfactorios de forma genérica; pero se emplean habitualmente en la mayoría de las tareas susceptibles de ser automatizadas, que se enumerarán con posterioridad.

2.5 Otros conceptos fotogramétricos.

A continuación se va a proceder a definir otros términos y conceptos fotogramétricos necesarios, concretando para un conjunto de imágenes cuyo objetivo es la producción de cartografía, que se supone se han tomado desde una aeronave que vuela sobre la zona de trabajo.

- Base (B). Es la distancia real entre los puntos principales de dos fotografías consecutivas, medido en la dirección de vuelo.
- Recubrimiento longitudinal (p%). Representa la longitud superpuesta entre dos imágenes consecutivas en la dirección de vuelo, para que sean activas estereoscópicamente. Se expresa como el porcentaje respecto al ancho de la foto, y debe ser un valor próximo al 60%.
- Cuando la superficie de interés, a la escala de vuelo necesaria, no está totalmente contenida en un modelo fotogramétrico, se debe proceder a tomar más fotografías, constituyendo una pasada.
- A su vez, si la superficie no entra en una pasada, es necesario tomar pasadas parcialmente superpuestas, que constituyen un bloque. Estas pasadas deben tener un recubrimiento transversal (q%), que se expresa como un porcentaje del alto de la fotografía, y que debe garantizar que no queda territorio sin recubrir. Habitualmente se establece en un 20%. No tiene carácter estereoscópico.

A continuación se muestra el gráfico de un vuelo realizado el verano del año 2013 para obtener cartografía de detalle de la zona portuaria y del campus universitario. En el apartado 9 se entrega más información de la planificación prevista para un vuelo.

	<p>Bloque fotogramétrico compuesto por 5 pasadas, numeradas correlativamente de P.001 a P.005. El recubrimiento longitudinal es $p=80\%$.</p>
	<p>Detalle de la pasada P0005. Constituida por seis imágenes, numeradas del 0017 al 0022, con recubrimiento longitudinal $p=80\%$.</p>
	<p>Detalle de la pasada P0005. Se muestran únicamente las fotos activas estereoscópicamente, que tienen un recubrimiento $p=60\%$ (0017,0019 y 0021), que definen los modelos 0017-0019 y 0019-0021. Se ha indicado la zona que activa. Nota: para facilitar la identificación de las fotos, se han desplazado transversalmente.</p>

Ilustración 5.- Ejemplo de un bloque fotogramétrico en Santander.

2.6 Sistemas de coordenadas empleados.

El objetivo final es obtener un modelo espacial de un objeto o de una superficie, respecto a un cierto sistema de referencia preestablecido. La metodología fotogramétrica emplea y relación entre sí tres sistemas de coordenadas básicos, tal como se enumeran a continuación.

<p>marcas fiduciales</p> <p>se toma como el sentido de vuelo positivo</p>	<p>Sistema de coordenadas fotografía o sistema de coordenadas imagen. Sistema de coordenadas 2d que permite identificar la posición de un pixel en la misma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Origen: punto principal. • Eje X: sentido coincidente con la dirección de vuelo. • Eje Y: el correspondiente en un sistema dextrógiro.
	<p>Sistema de coordenadas terreno. Sistema de coordenadas en el que se referencia el proyecto, coincidente con el sistema de referencia oficial: (X,Y,Z). Al conjunto de los seis parámetros que definen la posición en el espacio de un haz perspectivo se les denomina orientación externa, y que para la imagen 1 al margen serían los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posición del vértice del haz: (X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1}) • Giros precisos para hacer coincidir el sistema de referencia terreno con un sistema ligado a la imagen (u_1, v_1, w_1), que se definen la figura. A estos giros se les denomina habitualmente omega, Phi y Kappa, correspondientes a los giros de los ejes (X, Y, Z), respectivamente

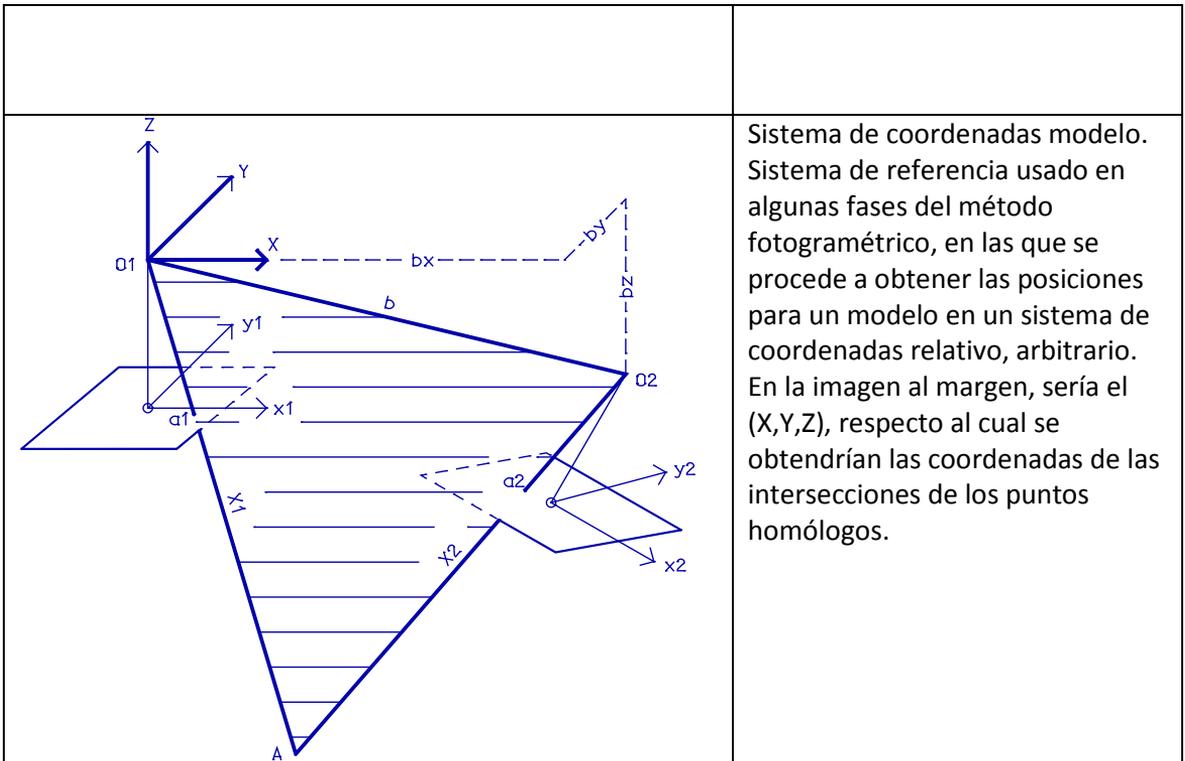


Ilustración 6.- Sistemas de coordenadas de referencia fundamentales usados en Fotogrametría.

2.7 Cámaras usadas en Fotogrametría.

Es habitual efectuar la siguiente clasificación:

- Según el soporte utilizado para la captura: digitales o analógicas (utilizan una película, que posteriormente será necesario digitalizar en escáneres especiales).
- Según la precisión: métricas, semimétricas o no métricas.
- Según su disposición: aérea o terrestre.

Centrándonos en las aéreas utilizadas habitualmente en el ámbito de la ingeniería, indicar que se usan cámaras digitales. Estas se clasifican a su vez:

- Según el espectro de la información capturada: monocromáticas o multiespectrales.
- Según el procedimiento de captura: sensores matriciales o lineales.

La resolución geométrica que se exige a estas cámaras, con tamaños de pixel inferiores a 12.5 micras (40 lp/mm), usando amplios formatos (la dimensión habitual de una fotografía aérea analógica es de 230x230 mm, que supone 18400 x 18400 pixeles), no puede ser capturada en

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



las condiciones de trabajo empleando una única matriz de sensores, existiendo las dos tecnologías indicadas con anterioridad.

Las cámaras que emplean sensores matriciales proceden a emplear para obtener una única imagen entre 8 y 12 sensores matriciales diferentes, que se combinan para obtener una única imagen, a la que se calcula una focal equivalente virtual.



Ilustración 7.- Cámara digital matricial. VexcelUltracamX. (www.gtbi.net)

La cámara indicada en la figura anterior captura, con los 4 conos pancromáticos disparados de forma sincronizada nueve imágenes que se combinan para conseguir una única imagen a la máxima resolución, que se colorea con las imágenes obtenidas con los 4 conos de color, siendo sus características principales las indicadas en la tabla siguiente.

Tamaño de la imagen	14430 x 9420 pixeles
Tamaño del pixel	7.2 micras
Tamaño de una imagen	435 Mb, sin compresión
Intervalo de disparo mínimo	1.35 sg

Ilustración 8.- Especificaciones de la cámara digital UltracamX. (www.gtbi.net)

Es habitual la obtención directa de tres tipos de imágenes, que se muestran en la figura siguiente.

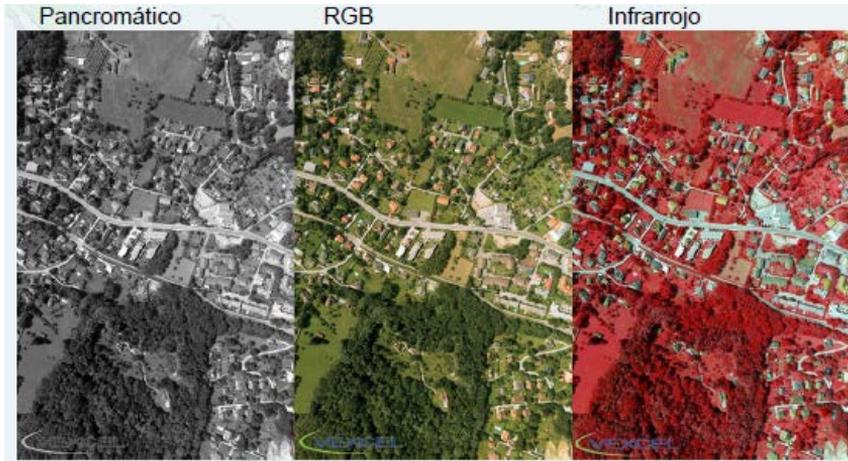


Ilustración 9.- Imágenes multispectrales capturadas. (www.gtbi.net)

2.8 Aplicaciones fotogramétricas sencillas.

A continuación se procede a exponer dos aplicaciones elementales que permiten obtener altitudes o desniveles efectuando mediciones sencillas en imágenes.

2.8.1 Altura de un detalle vertical en una fotografía aislada.

A continuación se proporciona la expresión que permite determinar la altura de un objeto vertical, en la hipótesis de que la base del objeto se sitúe a la altura media del terreno.

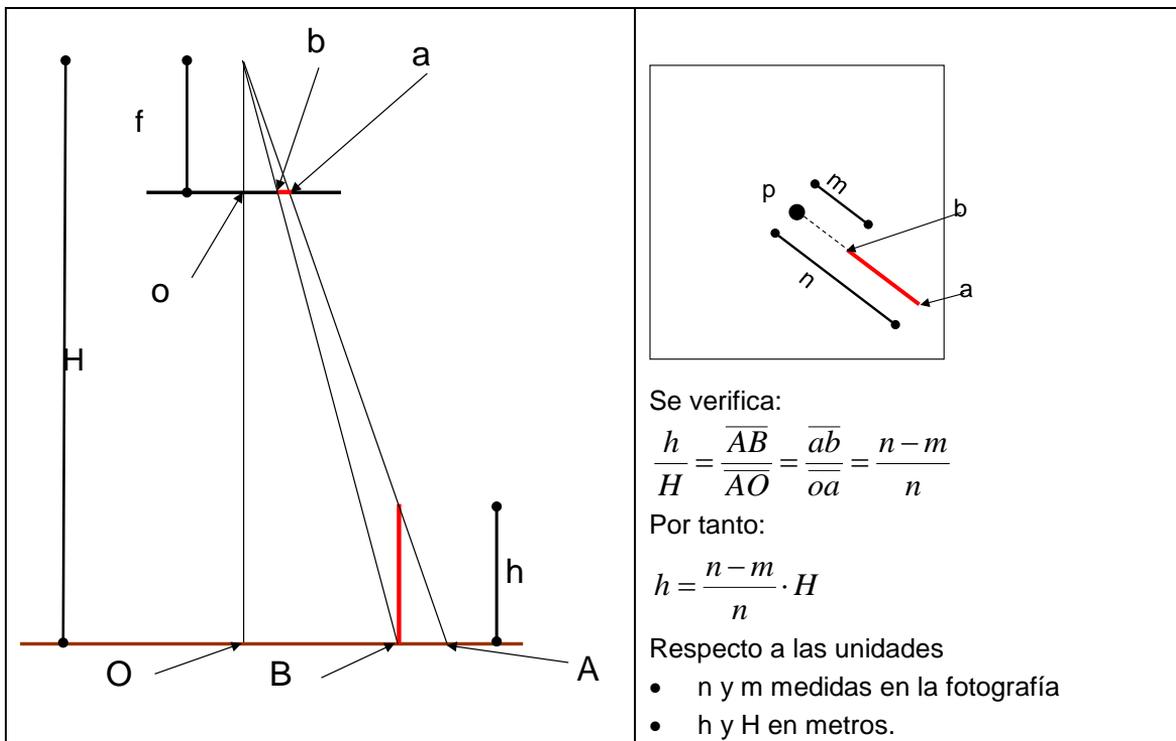


Ilustración 10.- Determinación del altura de un detalle vertical.

2.8.2 Cálculo del desnivel entre dos posiciones en un modelo estereoscópico.

Se denomina paralaje estereoscópico al desplazamiento aparente en la posición de un objeto fijo en un punto homólogo de las dos imágenes de un par fotogramétrico.

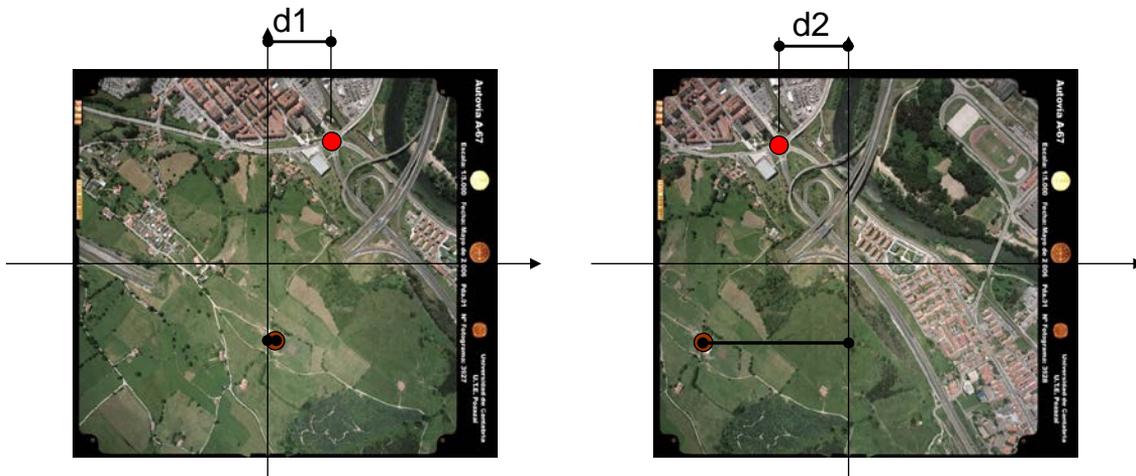


Ilustración 11.- Paralaje estereoscópico para un punto.

Su determinación es inmediata, según se observan la figura siguiente.

$$\frac{Z}{f} = \frac{B}{P} \Rightarrow Z = \frac{f}{P} \cdot B$$

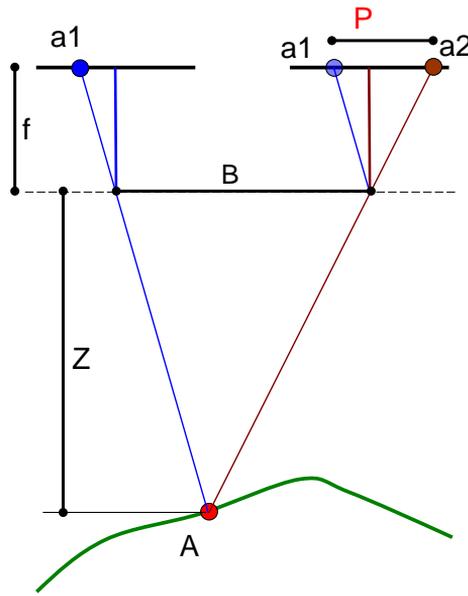


Ilustración 12.- Relación entre el paralaje (P), distancia focal (f), base (B) y la distancia de la línea de vuelo al punto (Z).

3 MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA

Como se ha expuesto con anterioridad, la Fotogrametría pretende extraer datos posicionales precisos de un objeto o una superficie a partir de dos o más fotografías. Al proceso de reconstrucción de los haces perspectivas de las dos imágenes, colocándolos de la misma forma relativa que cuando fueron tomados, y de obtener la intersección de los rayos homólogos, se le denomina restitución. A los instrumentos utilizados para conseguir este objetivo se les denomina de forma genérica restituidores, o estaciones fotogramétricas digitales.

La restitución de un par fotogramétrico se efectuará en las siguientes etapas básicas, en la que deben distinguirse aquellas tareas destinadas a la obtención de los parámetros de orientación del modelo (1 y 2) de las que tienen como objetivo la propia explotación (3, 4 y 5):

1. Orientación interna (OI) una vez se ha procedido a realizar.

El objetivo de esta fase es reproducir el haz perspectivo que constituye cada fotografía aisladamente. En esta fase se procede a determinar y aplicar una serie de correcciones (corrección al centro fiducial, distorsiones del objetivo, correcciones atmosféricas del ángulo

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



de incidencia del rayo perspectivo en el objetivo, corrección por esfericidad) a las fotocoordenadas medidas en el sistema de referencia imagen.

Los datos característicos de la cámara se recogen en un documento denominado certificado de calibración de la cámara, que la caracteriza geométrica y radiométricamente y que a modo de ejemplo se adjunta en el apartado 10.

2. Orientación externa (OE).

Su objetivo es conocer la posición de las imágenes en el instante en el cual fueron tomadas respecto al sistema de coordenadas terreno. Existen distintas metodologías para conseguir este objetivo, pero el resultado final del mismo deberá ser conocer los parámetros de la orientación externa de cada imagen en un modelo, ya enumerados anteriormente y formados por tres coordenadas y tres giros: (X_0, Y_0, Z_0) , (ω, ϕ, κ) .

Para conseguir este objetivo se procede a identificar puntos homólogos en el modelo, y a establecer su relación con la posición en el sistema de referencia terreno de los mismos. Observar que en esta fase la Fotogrametría exige incorporar información precisa de las coordenadas terreno para algunos puntos, quedando subordinada a la incorporación de estas posiciones para poder dotar de métrica adecuada al modelo. Existen diferentes metodologías para proceder a esta fase, denominada de forma genérica georeferencia del modelo, que se expondrán posteriormente

3. Identificación de puntos homólogos.

Una vez se ha procedido a realizar las orientaciones interna y externa, ya se está en condiciones de proceder a la explotación del modelo fotogramétrico. En esta fase se procederá a identificar los puntos homólogos en las dos imágenes del mismo, utilizando cualquiera de los procedimientos expuestos anteriormente (estereoscópica o correlación).

4. Cálculo de coordenadas terreno para el punto identificado.

A continuación, aplicando los parámetros de la orientación interna se procede a obtener sus coordenadas imagen corregidas. A partir de las mismas aplicándose la orientación externa se procede al determinar sus coordenadas terreno tridimensional.

5. Registrar y codificar la posición calculada.

Finalmente, se procede a registrar y codificar adecuadamente la posición correspondiente al punto observado, repitiéndose este proceso a partir de la fase tercera durante la explotación.

Destacar los siguientes aspectos básicos de la restitución fotogramétrica:

- La restitución se efectuará siempre modelo a modelo, para todos los modelos existentes en un bloque fotogramétrico.
- Cada modelo deberá ser orientado individualmente.
- En Ingeniería Civil, para las escalas habituales, la identificación de los puntos homólogos se efectúa estereoscópicamente por parte de un operador, capturando manualmente vértice a vértice todos los que sea preciso para definir, con el detalle suficiente, las entidades que incorpora una base cartográfica convencional, como las que han sido manejados hasta el momento por el alumno. Tan solo en terrenos regulares, es habitual proceder a la interpolación de algunas curvas a partir de la captura de curvas de nivel que se considere significativas – en las que el operador se ha debido “posar” sobre el terreno a una altitud constante, continuamente-.

4 CÁLCULO DE LA ORIENTACIÓN EXTERNA EN UN MODELO.

En esta fase, las metodologías clásicas fotogramétricas parten del conocimiento de las coordenadas imagen en cada una de las dos fotografías de un modelo, así como de las coordenadas terreno para un conjunto de puntos homólogos, habitualmente 6 o más en cada modelo, convenientemente distribuidos, para proceder a determinar los datos de la orientación externa. Habitualmente se procede a obtener las coordenadas terreno de los puntos necesarios mediante métodos indirectos, usando técnicas topográfico – geodésicas.

Se impone la combinación de 2 condiciones geométricas. La primera, denominada coplanaridad, que obliga a que los vértices de los haces perspectivos del modelo y los puntos homólogos en cada imagen para cada punto estén contenidos en un plano.

Si se denomina X_1 , X_2 a los vectores que definen los rayos homólogos para un cierto punto A en las imágenes 1 y 2, respectivamente, y B al vector base entre las mismas imágenes, se deberá verificar que su producto vectorial mixto es nulo.

$$(X_1 \wedge X_2) \cdot B = 0$$

Las coordenadas de cada vector, en el sistema de referencia terreno, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \bar{B} &= [X_{02} - X_{01}, Y_{02} - Y_{01}, Z_{02} - Z_{01}] = [b_x, b_y, b_z] \\ \bar{X}_1 &= [X_{A1}, Y_{A1}, Z_{A1}] = [X_A - X_{01}, Y_A - Y_{01}, Z_A - Z_{01}] = [X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'}] \\ \bar{X}_2 &= [X_{A2}, Y_{A2}, Z_{A2}] = [X_A - X_{02}, Y_A - Y_{02}, Z_A - Z_{02}] = [X_{A''}, Y_{A''}, Z_{A''}] \end{aligned}$$

Por tanto, la ecuación final que expresa la condición de coplanaridad queda como se indica a continuación:

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



$$\Delta = \begin{vmatrix} X' & Y' & Z' \\ X'' & Y'' & Z'' \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = 0$$

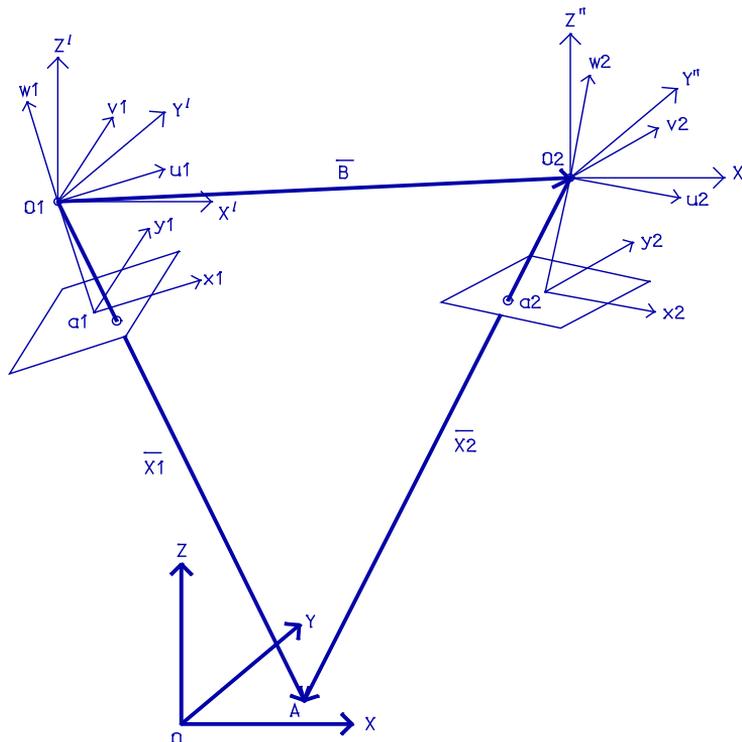


Ilustración 13.- Ecuación de coplanaridad.

Por otra parte, se verificará que el centro de la perspectiva, el punto en la imagen y el correspondiente punto en el terreno deberán estar alineados. La expresión que recoge la condición anterior se denomina colinealidad, y relaciona las fotocoordenadas de un punto en ambas imágenes, los 12 parámetros de orientación externa de ambas imágenes y las coordenadas terreno del punto.

$\begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ w_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f^* \end{bmatrix} = K \cdot A^T \cdot \begin{bmatrix} X_A - X_0 \\ Y_A - Y_0 \\ Z_A - Z_0 \end{bmatrix}$	<p>A: matriz de giro (ω, ϕ, κ) (x,y): coordenadas imagen. (X,Y): coordenadas terreno</p>
--	--

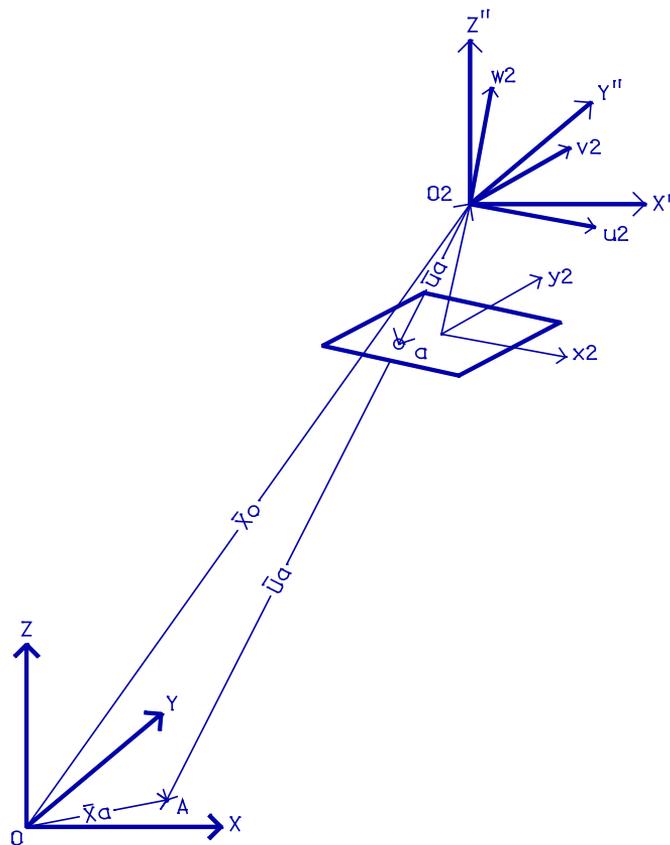


Ilustración 14.- Ecuación de colinealidad.

5 GEOREFERENCIA DE MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS.

La dependencia de los métodos fotogramétricos de conocer algunas posiciones terreno para un conjunto finito y muy concreto de puntos se puede realizar de formas muy diversas.

Clásicamente, se ha efectuado de forma indirecta, en el sentido que se deben identificar y dotar de coordenadas terreno a posiciones en campo para algunos puntos que se puedan identificar con claridad en la fotografía, y a partir de los mismos, usando el procedimiento indicado anteriormente, determinar la orientación externa de cada imagen modelo a modelo. Actualmente las aeronaves que se emplean para estos trabajos incorporan sensores adicionales a la cámara fotogramétrica que son capaces de determinar directamente los datos precisos para conseguir la orientación externa, con precisión suficiente para ciertos tipos de proyectos. A continuación se indican y enumeran las características más relevantes de las dos metodologías indicadas.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



5.1 Métodos indirectos.

Tratan de obtener las coordenadas terreno para un conjunto de puntos en cada modelo, en principio seis, distribuidos regularmente en los extremos del mismo. Si bien esta situación podría ser posible en bloques fotogramétricos de muy pocos modelos, no lo es cuando el número de modelos es elevado, debido al coste, temporal y económico, que tienen los trabajos de campo necesarios.

Por esta causa, es habitual aprovechar las cualidades métricas de los modelos fotogramétricos para a partir del conocimiento de las coordenadas terreno en un número mínimo de puntos del bloque, distribuidos adecuadamente, obtener coordenadas terreno para todos los puntos restante de los modelos que lo integran. A este proceso se le denomina aerotriangulación, y es una metodología ampliamente utilizada.

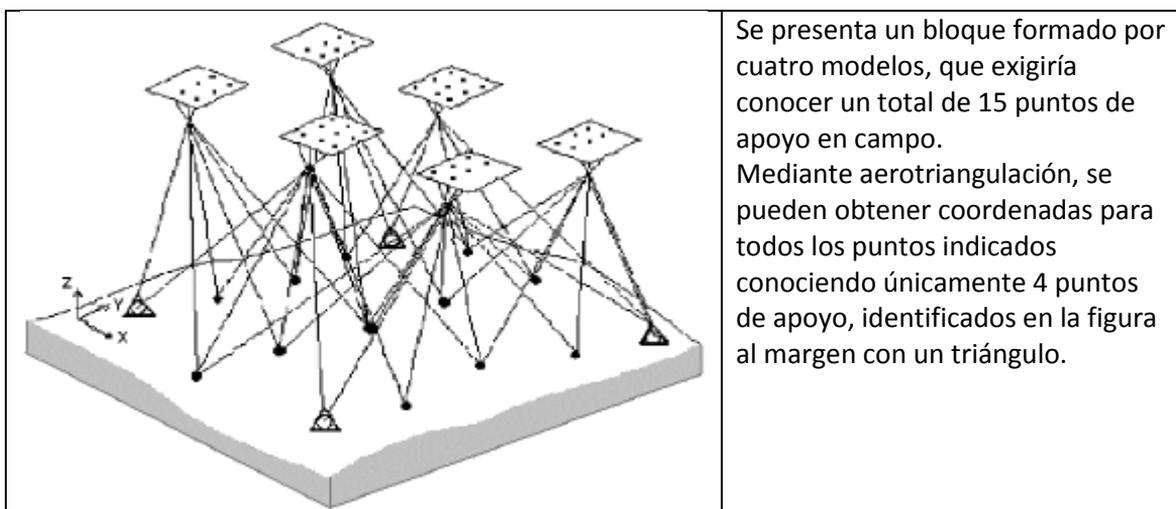


Ilustración 15.- Fundamento de la aerotriangulación (<http://www.ign.es/ign/resources/acercaDe/aig/A2.pdf>)

A los puntos a los que se les dota de coordenadas terreno se les denomina en Fotogrametría puntos de apoyo. Estos puntos, a los que se les confía la bondad de la métrica de todo el trabajo fotogramétrico, deben cumplir una serie de condiciones:

- En la fotografía, debe estar perfectamente identificados.
- En campo, deberá poderse identificar de forma clara, ser plenamente accesible y, por supuesto, encontrarse en la misma ubicación que cuando se tomó en la imagen.

Para cada punto de apoyo, es habitual la realización de una reseña fotogramétrica, que consiste en un croquis que identifica sin ambigüedad el punto observado, habitualmente observado mediante técnicas GNSS, marcándose también en alguna imagen.

<p>PUNTO DE APOYO 2682a</p> <p>Descripción: Cambio color pavimento. Cota suelo.</p> <p>Pinchado en: - Fotograma 0068 - Pasada 2</p>	
<p>X = 436968.732 Y = 4812817.741 Z = 5.365</p>	
<p>Croquis</p> 	<p>Fotografía</p> 
<p>PUNTO DE APOYO 3031</p> <p>Descripción: Equina jardín. Cota suelo acera.</p> <p>Pinchado en: - Fotograma 0003 - Pasada 3</p>	
<p>X = 434841.431 Y = 4808742.274 Z = 3.284</p>	
<p>Croquis</p> 	<p>Fotografía</p> 

Ilustración 16.- Ejemplo de reseñas fotogramétricas para el apoyo del vuelo que se ha adjuntado de Santander.

5.2 Métodos directos.

La evolución e integración que han experimentado tanto los sistemas de navegación GNSS – usándose para la gestión, control del vuelo y obtención de las coordenadas de los centros de los haces perspectivas capturados por las cámaras digitales – como los sistemas inerciales INS-IMU – que observan con precisión los giros de la cámara -, posibilitan la obtención directa de los parámetros de la orientación externa, no siendo preciso complementar estos datos con



datos de apoyo de campo para algunos tipos de proyectos, o reduciendo el número de puntos de apoyo significativamente en caso de no obtenerse con la suficiente precisión.

Un receptor GNSS permite, observando según técnicas relativas en postproceso, la determinación de posiciones con precisiones inferior al decímetro, imposibles de conseguir por otros procedimientos, pero ni está diseñado para evaluar magnitudes angulares, ni las que se podrían obtener a partir de varios receptores GNSS que se colocasen próximos en la aeronave serian suficientemente precisas.

Por su parte, el sistema IMU permite el registro de las variaciones angulares, con elevada precisión, pero la posición que puede obtener se deteriora con el tiempo rápidamente.

El uso de ambos sensores se complementa, como se resume en la tabla siguiente y se muestra a continuación, sincronizándose con el disparo de la cámara.

Característica	GNSS	IMU
Principio de medida	Distancia y tiempo	Variación inercial
Depende de	Constelación satélites	Independiente
Proporciona	Posición (XYZ) y tiempo (t)	Posición (XYZ), velocidad y orientación (W,F,K)
Evolución del error en el tiempo	Alta en un intervalo pequeño, pero pequeña en el tiempo	Muy pequeña en un intervalo pequeño, pero crece sin parar en el tiempo
Frecuencia de cálculo	Baja (< 2hz)	Muy alta (>100 Hz)
Errores posibles	Perdida de las condiciones de observación y de la posición	Sesgos y derivas
Precisión	Depende de la distancia a la referencia. 10 mm + 1 ppm	

Tabla 1.- Caracterización de los sensores GNSS e IMU en la georeferencia directa.

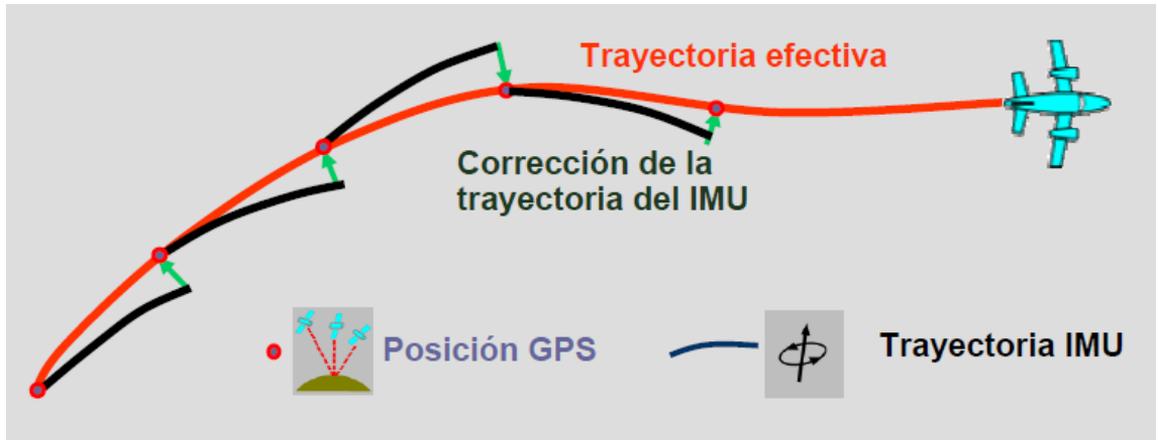


Ilustración 17.- Combinación de los sistemas GNSS e IMU. (Apuntes Fotogrametría Digital, Univ. Jaén)

Por tanto, el hecho de que en la actualidad las aeronaves destinadas a la captura de imágenes fotogramétricas dispongan de sensores GNSS-IMU posibilita la georeferencia directa, eliminando o reduciendo la necesidad del apoyo topográfico.

Para los vuelos destinados a la obtención de cartografía de detalle en ingeniería civil, es habitual la realización de un apoyo fotogramétrico mínimo, reducido a las esquinas del bloque. La integración del apoyo fotogramétrico, los datos GPS e IMU se efectúa de nuevo mediante la técnica de aerotriangulación.

Indicar finalmente que es necesaria la puesta a punto del sistema, así como la calibración e inicialización adecuada de los sensores antes de cada vuelo fotogramétrico

Sistema ADS40

1. Sensor SH40 con:
 - Objetivo DO64
 - IMU
2. Unidad de control CU40 con:
 - Control POS posición y orientación
3. Sistema almacenamiento MM40
4. Interfaz operador OI40
5. Sistema navegación GI40
6. Montura PAV30

Ilustración 18.- Sistema ADS40, Leica GeoSystem (Apuntes Fotogrametría Digital, Univ. Jaén).

6 FOTOGRAMETRÍA MULTIMAGEN CONVERGENTE.

El carácter íntegramente digital de la Fotogrametría ha posibilitado el uso de técnicas estudiadas en otras disciplinas, en particular el tratamiento digital de la imagen, reconocimiento de objetos y técnicas de visión artificial en el campo de la robótica, desarrollándose algoritmos que a diferencia de los expuestos anteriormente, necesitan que el objeto o superficie de trabajo aparezca en un elevado número de fotografías, al menos en 3. Este nuevo conjunto de fotografías, de forma genérica, ya no responde a una configuración que permita su visión estereoscópica por lo que la identificación de los puntos homólogos deberá hacerse bien de forma automática mediante correlación de imágenes, bien manualmente identificando un operador cada punto homólogo en todas y cada una de las imágenes, individualmente.

La comercialización de cámaras que capturan simultáneamente a la imagen cenital, como se ha hecho hasta la fecha, varias imágenes oblicuas está posibilitando el desarrollo real de estas nuevas metodologías. A continuación se muestra una de las cámaras de esta nueva tecnología existentes en el mercado.

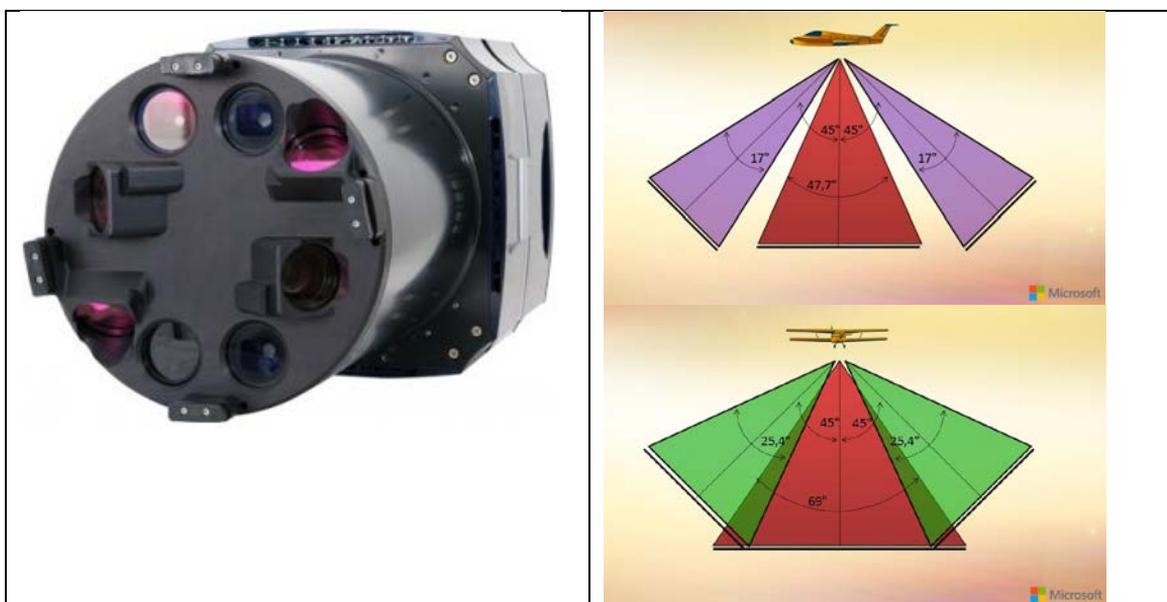
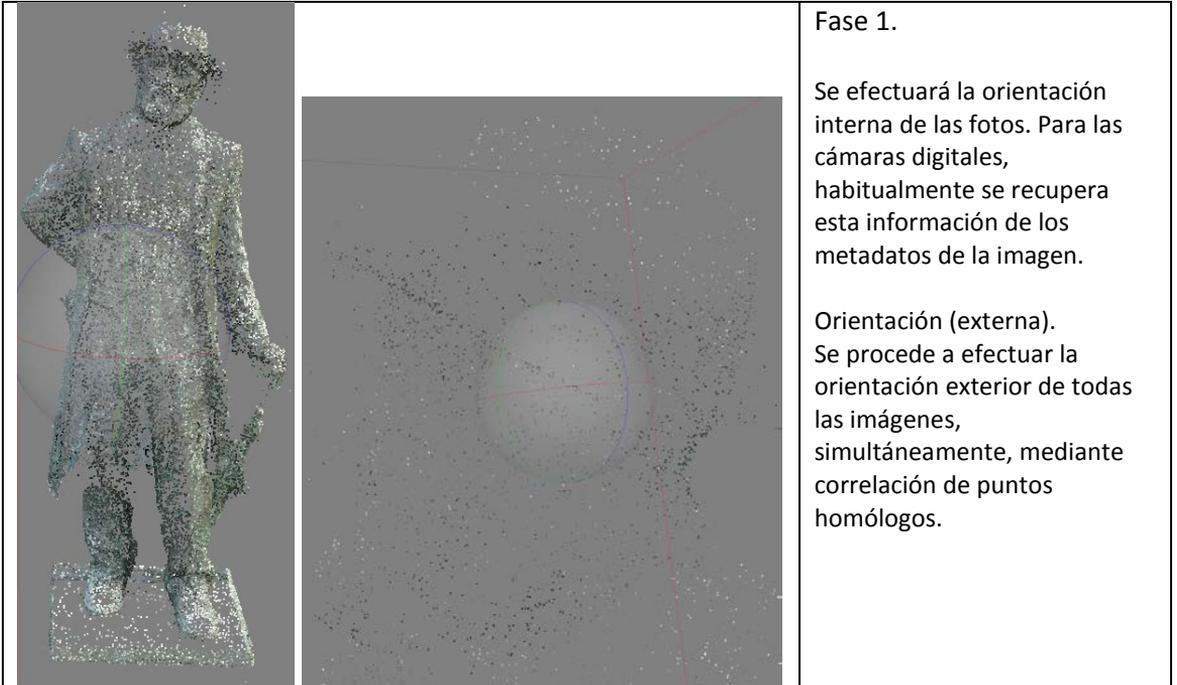
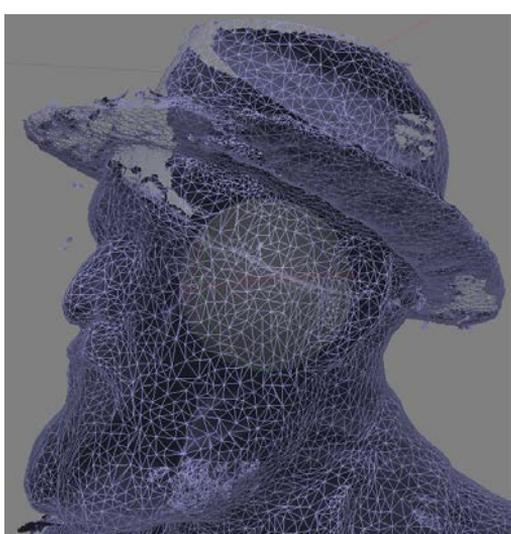


Ilustración 19.- Cámara Ultracam Osprey . (<http://www.microsoft.com/en-us/ultracam/UltraCamOspreySpecs.aspx>)

Este tipo de técnicas también se aplica en fotogrametría terrestre de objeto cercano, con aplicaciones en el campo de ingeniería civil, patrimonio, arqueología,...

A continuación y a modo de ejemplo se comenta el proceso de obtención de un modelo tridimensional preciso de la escultura del investigador Leonardo torres Quevedo, que se ubica en la plaza de la ciencia del campus de Santander en la Universidad de Cantabria. La toma de datos se ha efectuado con una cámara réflex digital no métrica, comercial. En total se han tomado 32 fotografías que se adjuntan en el apartado X de la memoria. Indicar que se ha procedido a una edición mínima del producto obtenido de forma prácticamente automática.



		<p>Fase 2.</p> <p>Para las posiciones calculadas de las imágenes, se procede a obtener nuevamente por correlación una nube de puntos muy densa.</p>
		<p>Fase 3.</p> <p>Apoyándose en los puntos de la fase anterior se procede a definir una malla, de elementos triangulares, que ya constituye un modelo del objeto de trabajo.</p>

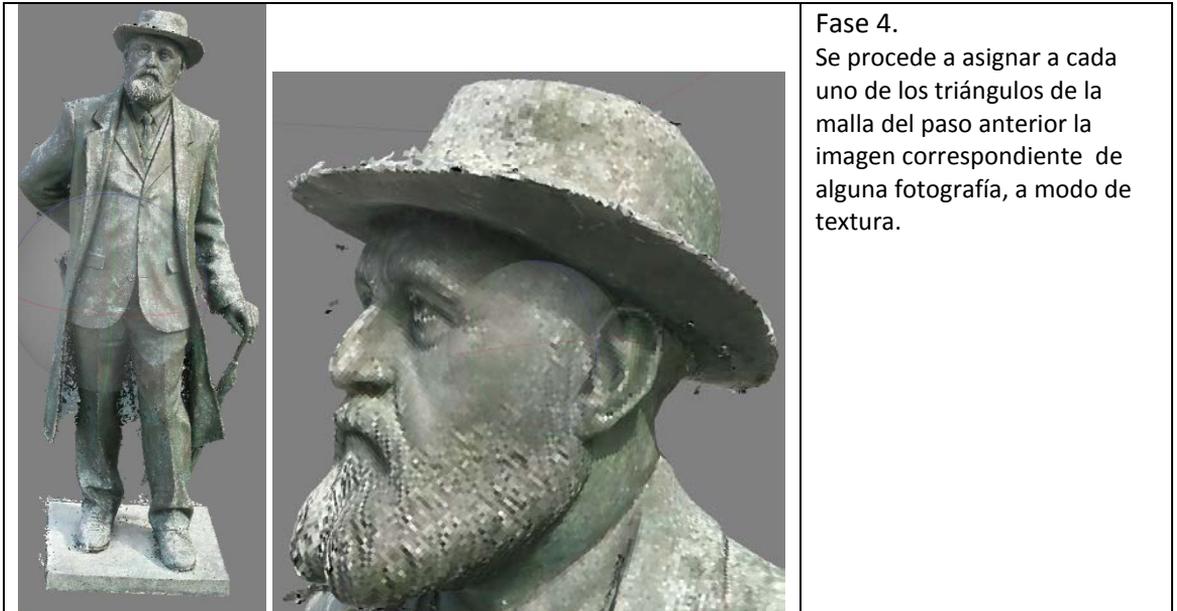


Ilustración 20.- Flujo de trabajo a partir de múltiples imágenes convergentes.

7 OTROS PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS.

Una vez que se ha procedido a efectuar las orientaciones del bloque, además de la restitución destinada a la obtención de cartografía es habitual la generación de otros productos de interés también cartográfico:

- Modelos digitales de elevaciones.

Para la obtención de modelos digitales de elevaciones correspondientes al terreno es muy habitual el proceso de obtención de una nube de puntos automática mediante procesos de correlación. Las posiciones automáticas así obtenidas, se editan de forma manual por un operador, y combinándose con líneas de rotura, también capturadas de forma manual por un operador fotogramétrico, definen un modelo habitualmente de malla de triángulos a partir del cual mediante interpolación se obtiene el MDE con la resolución espacial deseada. Esta ha sido la metodología empleada para la obtención de los MDE que se ha obtenido en el Centro Nacional de Información Geográfica para su uso en las prácticas de clase. En la actualidad para la obtención de estos modelos se tiende a usar como dato original información procedente de vuelos LIDAR, si existen.

- Ortofotos digitales.

También llamadas ortofotografías o ortomapas, y que como ya se ha expuesto con anterioridad, son imágenes aéreas que se han rectificado para que tengan un carácter métrico, evidentemente en planimetría.

Autores:

Javier M^a. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20140401



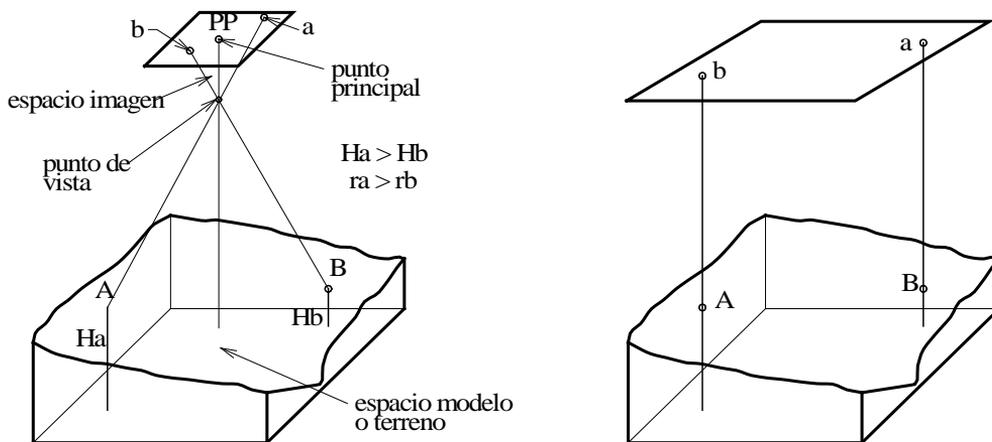


Ilustración 21.- Diferencia conceptual entre una imagen aérea y una ortoimagen.

Para poder obtener una ortofoto a partir de una imagen aérea se necesitan los siguientes datos: orientación interna y externa de la imagen, y el modelo digital de terreno correspondiente a la zona representada en la imagen.

Fotogramétricamente, se resuelve aplicando la ecuación de colinealidad. El modelo de terreno que habitualmente se emplea corresponde a la superficie natural del mismo, no procediéndose a la rectificación de los objetos situados sobre el terreno – habitualmente denominados microrelieve, como son edificaciones, árboles, torres,... -, que únicamente por tanto serán correctos a nivel de suelo, manteniendo la imagen que aparece en la fotografía. Indicar que existe la metodología para rectificar rigurosamente el microrelieve, generándose las denominadas ortofotografías verdaderas, pero que no es habitual su obtención, debido al mayor coste y complicación que supone la captura de todas las imágenes necesarias.

El flujo de trabajo preciso para obtener una ortofoto es sencillo. Se fija en primer lugar las características de la ortofoto que se quiere obtener, definiendo en consecuencia unas celdas, de posición conocida, inicialmente vacías. Para cada celda se obtiene su valor como se indica a continuación

1. Se obtiene la elevación correspondiente a la celda del MDT.
2. Usando la ecuación de colinealidad, se procede a la definición del rayo que pasa por el punto terreno de la fase anterior.
3. Se obtiene, para el rayo perspectivo anterior, el punto correspondiente en la imagen, obteniéndose el tono de la misma.
4. Se asigna este color a la ortofoto. Se interpola como resulte necesario, y se continúa con un nuevo pixel vacío.

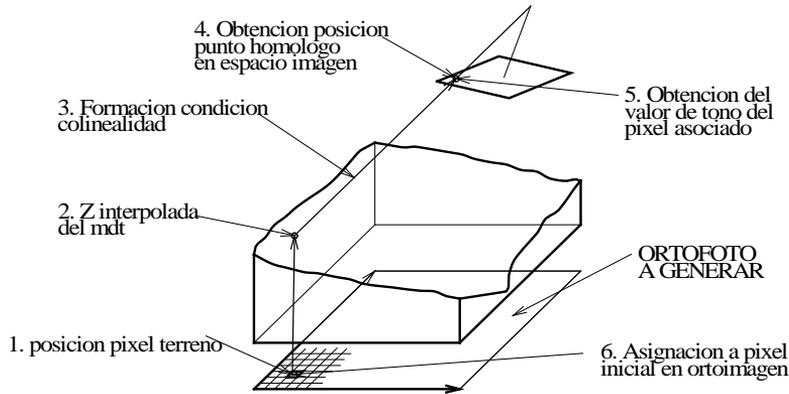


Ilustración 22.- Flujo de trabajo para la obtención de una ortofoto.

8 PARÁMETROS BÁSICOS PARA DEFINIR UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO AÉREO DESTINADO A LA OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍA.

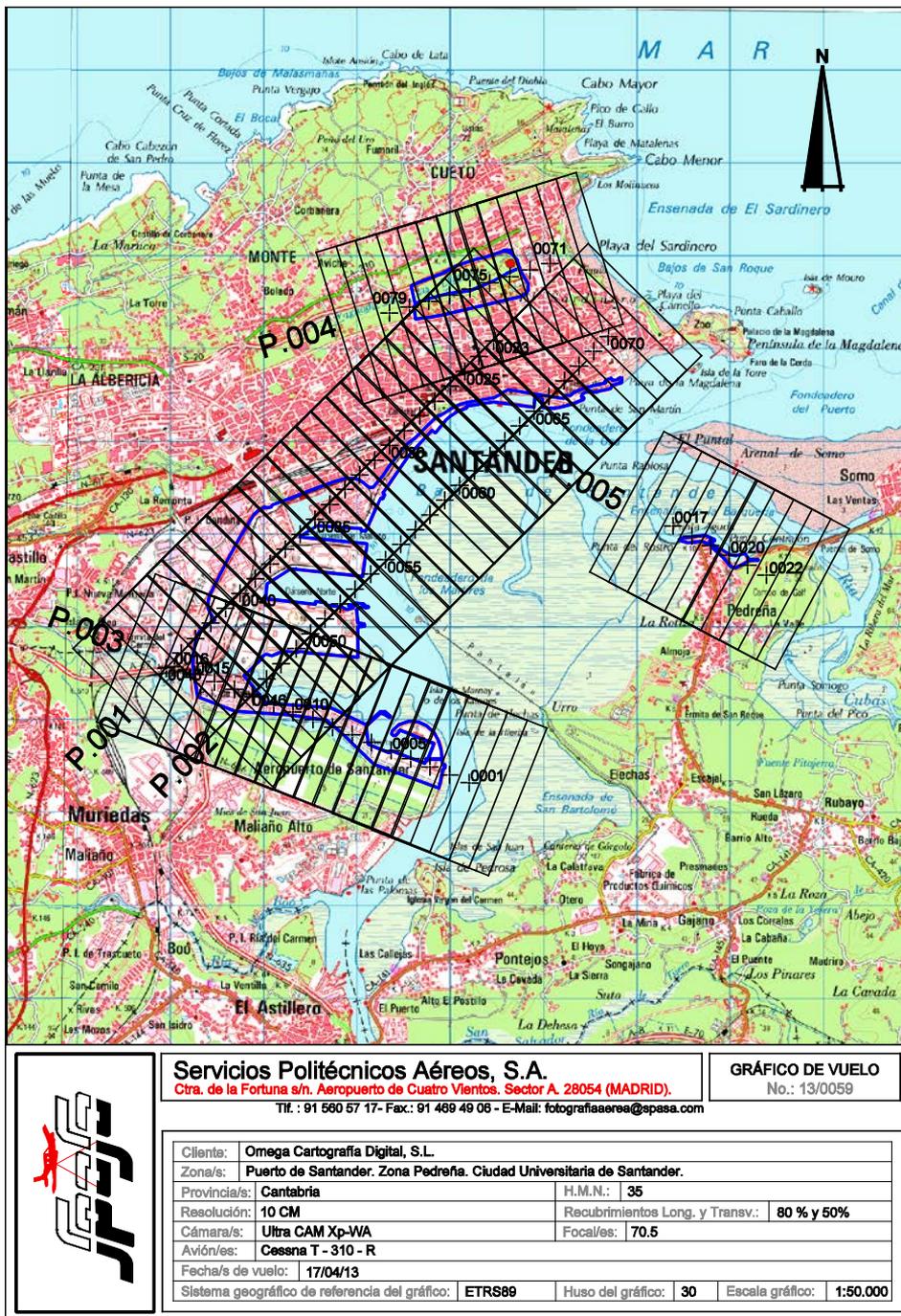
En la tabla siguiente se procede a indicar esquemáticamente los datos básicos a partir de los cuales se puede proceder a la definición completa de un vuelo fotogramétrico.

Recubrimiento transversal	20%								
Recubrimiento longitudinal	60% para obtención de cartografía, 80% si se desean generar ortoimágenes, usando los pares alternos para los modelos fotogramétricos.								
Escala de la fotografía	La que resulte para poder obtener un tamaño de píxel en el terreno (GSD, ground simple distance) conforme a la relaciones siguientes. <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>E mapa a obtener</th> <th>GSD (cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:500</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>1:1.000</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>1:5.000</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	E mapa a obtener	GSD (cm)	1:500	7	1:1.000	10	1:5.000	25
E mapa a obtener	GSD (cm)								
1:500	7								
1:1.000	10								
1:5.000	25								
Altura de vuelo	La que resulte utilizando la expresión básica de la fotogrametría que relaciona la escala de vuelo (obtenida anteriormente), la focal de la cámara (dato del proyecto, disponible por la empresa de vuelo) y la altura de vuelo.								

Tabla 2.- Datos básicos para proceder a la definición de un vuelo fotogramétrico.

A partir de los datos anteriores, se puede estimar la configuración del bloque fotogramétrico necesario.

9 DOCUMENTACIÓN ADICIONAL. PROYECTO DE VUELO FOTOGRAMÉTRICO.



Servicios Politécnicos Aéreos, S.A.
 Ctra. de la Fortuna s/n. Aeropuerto de Cuatro Vientos. Sector A. 28054 (MADRID).
 Tlf.: 91 560 67 17- Fax: 91 469 49 06 - E-Mail: fotografiasaerea@spasa.com

GRÁFICO DE VUELO
 No.: 13/0059

Cliente: Omega Cartografía Digital, S.L.	
Zona/s: Puerto de Santander. Zona Pedreña. Ciudad Universitaria de Santander.	
Provincia/s: Cantabria	H.M.N.: 35
Resolución: 10 CM	Recubrimientos Long. y Transv.: 80 % y 50%
Cámaras/s: Ultra CAM Xp-WA	Focal/es: 70.5
Avión/es: Cessna T - 310 - R	
Fecha/s de vuelo: 17/04/13	
Sistema geográfico de referencia del gráfico: ETRS89	Huso del gráfico: 30
Escala gráfico: 1:50.000	

Ilustración 23.- Gráfico de vuelo en Santander.

Gráfico, sobre Google earth, en el que se indica la trayectoria prevista de vuelo (rojo: toma de fotografías; verde: vuelo de aproximación y vuelo entre tomas) para el bloque.



Ilustración 24.- Planificación del vuelo.

10 DOCUMENTACIÓN ADICIONAL. DATOS BÁSICOS DE UN CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN.

A continuación se proporcionan los datos relevantes del certificado de calibración el vuelo efectuado en Santander expuesto anteriormente, correspondientes a la cámara UltraCamXp-Wide-Angle, Serial Number UC-SXp-wa-30416083.

Panchromatic Camera

Large Format Panchromatic Output Image

Image Format	long track	67.860mm	11310pixel
	cross track	103.860mm	17310pixel
Image Extent		(-33.93, -51.93)mm	(33.93, 51.93)mm
Pixel Size		6.000µm*6.000µm	
Focal Length	ck	70.500mm	± 0.002mm
Principal Point (Level 2)	X_ppa	0.000 mm	± 0.002mm
	Y_ppa	0.180 mm	± 0.002mm
Lens Distortion	Remaining Distortion less than 0.002mm		

Ilustración 25.- Características de la imagen pancromática.

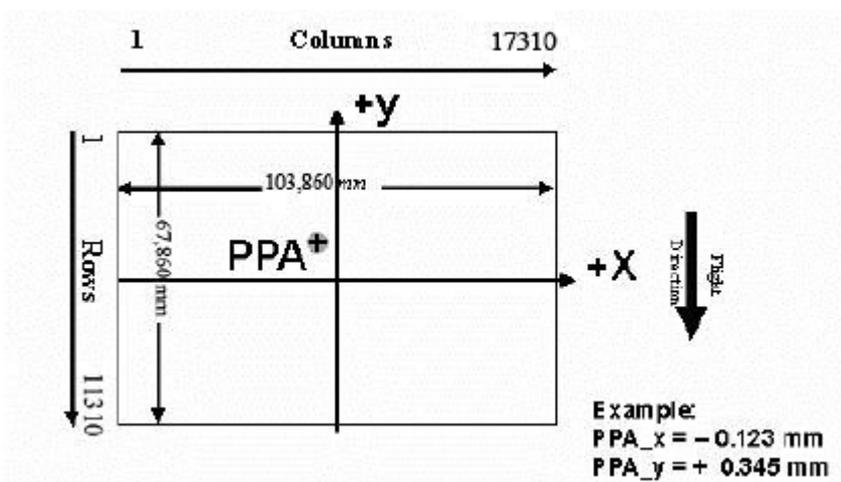


Ilustración 26.- Posición del punto principal de autocolimación respecto al centro fiducial.

11 DOCUMENTACIÓN ADICIONAL. FOTOS CAPTURADAS DE D. LEONARDO TORRES QUEVEDO.

A continuación se presenta una hoja de contactos de las fotos capturadas de la escultura del investigador D. Leonardo torres Quevedo.

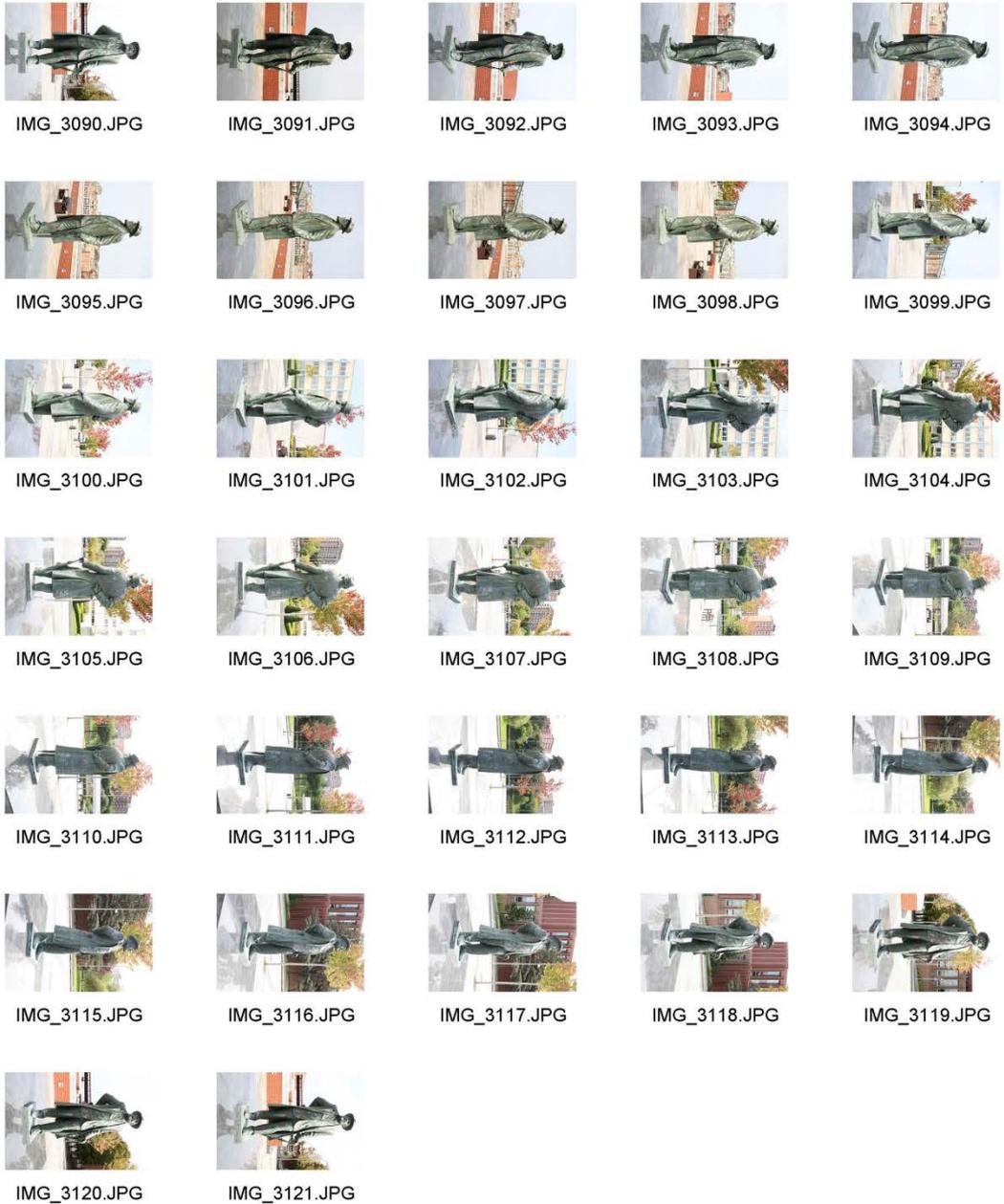


Ilustración 27.- Fotografías capturadas en campo (Canon Eos 5D, objetivo 50 mm)