

INDICE

- a. Evolución de la Fotogrametría
 - Fotogrametría analítica
 - Fotogrametría digital
 - Cámaras digitales de gran formato
- b. El Método General de la Fotogrametría clásica
- c. El Método General de la Fotogrametría como Proceso Operativo
 - Modelo funcional
 - Modelo estocástico
 - Esquema de la Fotogrametría Digital y Analítica
- d. Caracterización de la Fotogrametría Analítica y Digital

Evolución de la Fotogrametría

Como se ha señalado en el capítulo 1 de la asignatura “Cámaras” la progresiva digitalización de la Fotogrametría puede contemplarse bajo tres etapas:

PRIMERA: FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA.

En 1943 aparece el primer ordenador. Durante las décadas de los cuarenta y de los cincuenta, autores como Church, Smith y Brown, siguiendo los trabajos de Finsterwalder, desarrollan modelos matemáticos para resolver el método fotogramétrico. Se obtienen observaciones sobre mono y estereocomparadores que constituyen el “input” en modo “off-line” para los algoritmos programados en las grandes computadoras. El campo de aplicación es, básicamente, la aerotriangulación.

En 1957 Helava diseña el primer restituidor analítico basado en la alimentación “on line” de datos para los algoritmos programados y por la realimentación recíproca desde el ordenador hacia los portaplacas de manera que se hace factible emular la capacidad operativa de los restituidores analógicos. Los restituidores analíticos empiezan a estar comercialmente disponibles en el mercado fotogramétrico a partir de 1975 y gozan de una gran expansión durante la década de los ochenta en la que fuerzan la “extinción” de sus predecesores.

La llegada de la etapa analítica representa, ante todo, la inversión de la tendencia convergente de la época anterior. La simbolización abstracta de todos los parámetros geométricos de la Fotogrametría representa, ante todo, la eliminación de restricciones físicas. Podemos hablar de:

Libertad de toma

La toma fotográfica no tiene por qué ser estereoscópica y, en consecuencia, ajustada o próxima al Caso Normal. Cualquier toma puede ser resuelta matemáticamente siempre que exista intersección, siempre que sea posible disponer de dos puntos de vista. Con este planteamiento se pierde la potencia de la visión estereoscópica pero se gana en libertad de acción en campo.

Libertad de restitución

Los restituidores siguen siendo una gran ayuda pero no son ya imprescindibles. Basta con programar los algoritmos y explotar la potencia de cálculo de los ordenadores para poder obtener coordenadas 3D volcables a cualquier CAD. Caben, en cualquier caso, soluciones híbridas que estimulan la inventiva y la vertiente plurifacética de la Fotogrametría.

Libertad de cámaras y películas

Los errores imputables a la cámara (distorsión radial y tangencial) y a las películas (deformación) pueden ser modelizados matemáticamente y pueden, en consecuencia, ser tan grandes como se quiera. En consecuencia, disminuye la dependencia de materiales de alta calidad. Por otra parte, la independencia alcanza al propio carácter métrico de las cámaras. Puesto que sus parámetros internos no tienen por qué ser conocidos ya de antemano (para ser materializados físicamente, como se hacía en los restituidores analógicos) cabe incorporar al proceso fotogramétrico cámaras no calibradas, cámaras sin marcas fiduciales con focal desconocida.

Incorporación de otros datos

Tanto en aérea como en terrestre, datos procedentes de cualquier fuente (distancias medidas, condiciones geométricas o físicas, datos procedentes de otros medios, ...) pueden incorporarse sencillamente al método fotogramétrico con la consiguiente ganancia en la robustez y en la libertad del proceso.

Desarrollo de Terrestre

La informatización beneficia los métodos donde mayor libertad cabe, esto es, en la Fotogrametría terrestre. Esta disciplina se aproxima bastante al usuario como lo demuestra la proliferación de programas de este estilo en los que no se aplica la visión estereoscópica, prevaleciendo la libertad de toma.

Ajuste de observaciones

El planteamiento matemático de los modelos fotogramétricos permite el empleo de datos sobreabundantes y, en consecuencia, la aplicación de técnicas de ajuste estadístico. La ventaja de ello es que puede llevarse a cabo un análisis sistemático de los errores cometidos y de la propagación de estos desde las observaciones iniciales hasta los resultados finales. La calidad métrica queda cuantificada en estimadores de la precisión y la fiabilidad.

Salida “blanda”

Aunque expresada aquí en último lugar, pues desde el punto de vista de los fundamentos geométricos resulta menos decisiva, esta particularidad (“softcopy”) de los soportes informáticos es la más importante (hasta hacerse imprescindible) desde el punto de vista práctico. Hoy, la Cartografía es, antes que ninguna otra cosa, un fichero digital con datos geométricos. Cualquier trabajo fotogramétrico desarrollado debe ser volcado en un formato gráfico que verifique determinados estándares del mercado cartográfico de manera que dicho producto pueda ser modificado, editado, actualizado, combinado con otros soportes, integrado en un Sistema de Información Geográfica, ...

SEGUNDA: FOTOGAMETRÍA DIGITAL

El paso de la Fotogrametría analítica a la digital, de la ampliación de la digitalización geométrica a la (geométrica y) radiométrica, ha sido gradual y comienza a desarrollarse a partir del lanzamiento de los primeros satélites, que enviaban imágenes con píxeles de 80 metros sobre el terreno. Hoy, los satélites KVR-1000, Ikonos y Quickbird, con resoluciones mejores que 1 metro, abren las puertas a las escalas grandes. Son cuatro décadas dedicadas a la conquista

operativa de la resolución. El gran desarrollo de los soportes multimedia, de algoritmos que permiten alcanzar precisión subpíxel y de algoritmos de compresión de imagen permitieron que en el Congreso de la ISPRS de 1996 se diera por definitivamente abierta la era digital.

La revolución del soporte digital implica:

Acceso a las imágenes

No sólo a la geometría de las imágenes, como hasta ahora, sino a la propia naturaleza gráfica (y no sólo gráfica, sino de cualquier banda del espectro electromagnético) de las mismas. Esto implica, sobre todo que las imágenes se pueden “tocar”, se pueden remuestrear de forma sencilla y sin involucrar problemáticos procesos químicos. Ello implica toda una gama de acciones que, hoy por hoy, permanece abierta, en constante evolución. Puede señalarse:

- Mejora gráfica de las imágenes, con procesos tales como ajuste del brillo, del tono y otras acciones específicas del procesado de imágenes (compresión, ampliación, reducción, inversión de tonos, ...) .
- Extracción geométrica de información, con acciones como detección de líneas, de objetos (por ejemplo, marcas fiduciales), o procesos de simplificación de las imágenes (binarización, eskeletonizado, ..)
- Procesos fotogramétricos propiamente dichos, sobre todo, correspondencia automática en diversos niveles que conduce a la identificación de puntos (u objetos) homólogos y, en definitiva, a la automatización de la orientación relativa y a la automatización de diversos procesos cartográficos (generación de perfiles o de Modelos Digitales del Terreno, ...) o, al menos, a la facilitación de soportes de ayuda como son las líneas epipolares o la epipolarización de las imágenes. De forma especial debe incluirse aquí los procesos de remuestreo que implican correcciones geométricas: rectificación de imágenes y generación de ortofotos.
- Extracción semántica de información, como paso esencial para la cartografía automática, nivel que se adentra ya en la cuestión de la Inteligencia Artificial y la visión robótica.

Reformulación de disciplinas

La libertad que alcanza a la Fotogrametría tiene un precio: ya no se puede conservar “pura”. Es la hora del “mestizaje”, de las soluciones híbridas, de las interrelaciones, de la fusión (y a veces de la confusión), de la interdisciplinariedad y de la multidisciplinariedad. Tenemos así una nueva serie de relaciones que se desprenden de los procesos recién enumerados, fundamentalmente:

- Con la Teledetección, compañera inseparable de la Fotogrametría Digital. Las fronteras son borrosas y función de los criterios empleados. Pueden enunciarse criterios como la diferenciación entre el procesado métrico y el procesado interpretativo o la diferenciación entre plataformas de barrido bidimensional y tridimensional pero más interesantes y provechosos son los planteamientos híbridos.
- Con el Procesado Digital de Imágenes, que representa el paso previo, la mejora de la imagen o la preparación de la imagen para la aplicación de procesos de carácter fotogramétrico o cartográfico. Las tareas híbridas son múltiples, por ejemplo, cuando se emplea la correlación orientada a objeto o se emplean algoritmos piramidales para automatizar la Orientación Relativa.

- Con los Sistemas de Información Geográfica, en los que puede considerarse ya, como parte constituyente, la existencia de niveles (layers) que contengan la información cartográfica (el “vectorial”) además de la correspondiente ortofoto (el “raster”).
- Con la Inteligencia Artificial, con aspectos como la visión robótica que involucra al vídeo y a la extracción e interpretación de objetos en tiempo real. Relacionado con lo anterior, se sitúa la cuestión de los sistemas expertos y los sistemas de integración de datos procedentes de múltiples fuentes. Igualmente, a medio camino entre lo cartográfico y lo informático, se sitúan las posibilidades de realidad virtual y de animación de imágenes.

Muerte de los restituidores

Ya no son necesarios los restituidores (como hardware): ya no son necesarios los portaplacas, los codificadores, los servomotores, los dispositivos de visualización y de iluminación. La Fotogrametría “queda reducida” a un simple programa, se hace software. Si se quiere emplear el recurso de la visión estereoscópica será necesario diseñar un dispositivo que la permita pero esto no es realmente necesario. Cualquier programa de procesamiento de imágenes o de CAD permite visualizar un fotograma y de emplear anaglifos (por ejemplo) para visualizar tridimensionalmente un par de fotogramas y, además, permite contar píxeles, es decir, permite medir. Sólo queda por tanto, implementar el modelo matemático que transformará estas medidas, estas coordenadas instrumentales en coordenadas del objeto.

Cabe hablar de dos rasgos más, recíprocamente paradójicos, probablemente los que más confieren unas señas de identidad a la situación actual de la Fotogrametría, los que más reflejan la situación de reestructuración que se vive. Se trata de la aspiración de automatización que preside la mayor parte de la investigación actual y de la progresiva aproximación al usuario.

TERCERA: CÁMARAS DIGITALES DE GRAN FORMATO

Desde el punto de vista de los fundamentos teóricos hay poca diferencia entre esta etapa y la anterior pues ambas parten del mismo punto (la imagen digital) y terminan en el mismo punto (la cartografía digital). Sin embargo, desde un punto de vista práctico y comercial, las diferencias son enormes, hasta el punto de que podemos decir que las posibilidades abiertas por esta nueva etapa tienen un alcance y repercusión mayores que los de las etapas precedentes. A partir de 2000, con la entrada en escena de las cámaras de Leica y de ZI, se abre la puerta a lo que hasta ese momento ha sido una entelequia: la fabricación de cámaras digitales para crear imágenes capaces de competir con las imágenes analógicas de gran formato, es decir, la fabricación de cámaras digitales para crear imágenes de 12000 x 12000 píxeles. Sin embargo, no es sino hasta 2004 cuando se produce un salto cualitativo en la aceptación de las nuevas cámaras cuya comercialización se dispara a partir de este año.

Las consecuencias de esta nueva etapa son las siguientes:

Desaparece la imagen analógica

Y desaparecen, con ella, las limitaciones asociadas con el almacenamiento, el transporte y la conservación. No hay ya deterioro o deformación de las imágenes ni se requieren de especiales condiciones espaciales y ambientales para preservar los datos. Ya no se depende de más procesos físicos que los correspondientes a la generación de la imagen en el CCD y su correspondiente almacenamiento, visualización y procesamiento de acuerdo con los métodos propios del Procesado de Imágenes. Desaparecen, en consecuencia, fuentes de error que se traducen en

una mayor calidad geométrica y radiométrica del documento. Por otra parte, aumenta el número de imágenes que se puede obtener, lo que implica el aumento del número de redundancias y, en consecuencia, la mejora de la calidad estadística del proceso.

Mayor resolución radiométrica y espectral

Se dispone de mayor profundidad de color lo que se traduce en mayor calidad, en mejoras de los procesos de matching y en la posibilidad de volar bajo condiciones de iluminación más desfavorables. Asimismo, el proceso de toma implica la adquisición de imágenes pancromáticas y también de imágenes en el canal del azul, del verde, del rojo y del infrarrojo cercano. Ello se traduce en la posibilidad de aprovechamiento articulado de las clásicas técnicas fotogramétricas y de teledetección.

Desaparece el escáner

En la medida en que el punto de partida es una imagen en formato digital desaparece el mayor “cuello de botella” de la etapa anterior: el escáner fotogramétrico. Por una parte, la precisión exigible en todo proceso fotogramétrico requería unos equipos de digitalización tremendamente estables y, en consecuencia, caros y delicados. Por otra parte, el tamaño de la imagen requería unos tiempos de escaneado de los que dependía todo el flujo de producción.

Aparecen nuevos conceptos de cámaras:

Puesto que no es viable, hoy por hoy, la cámara de 12000 x 12000 píxeles, las soluciones tecnológicas pasan, bien por la cámara barredora (12000 x 1), bien por la cámara modular (6000 x 6000 x 4, aproximadamente). En el primer caso, es necesario introducir el triple sensor que permite la intersección de rayos homólogos y, en el segundo, es necesario introducir procesos de fusión de imágenes de manera que a partir de imágenes de menor dimensión es posible formar una mayor, equivalente de las imágenes analógicas escaneadas. En cualquier caso, aparecen nuevos conceptos que amplían el horizonte clásico de la Fotogrametría.

Aparece el sensor múltiple

La cámara barredora exige la presencia del sistema GPS + IMU. Por otra parte, las tendencias de procesamiento fotogramétrico se orientan hacia el empleo articulado de las técnicas de aerotriangulación y de orientación externa directa (ISO). Como en el caso anterior, el escenario fotogramétrico se ve ampliado por esta nueva cuestión.

Cambia el concepto de calibración

En primer lugar, por el propio concepto de imagen digital. En la época anterior imagen y cámara son conceptos distintos pues la imagen se corresponde con la película. No todas las películas se posicionan de forma exactamente igual sobre la cámara y, lo que es más, una vez formada la imagen ésta sigue procesos de deformación que la alejan del modelo inicial de la cámara. En consecuencia las imágenes analógicas requieren de unos “testigos” (marcas fiduciales) que indican la geometría de la cámara sobre la película. Sin embargo, en el caso de las cámaras digitales, la imagen recoge fielmente la propia geometría de la cámara con lo que ya no es necesario el empleo de marcas fiduciales.

En segundo lugar, los nuevos conceptos de imágenes (ya sea de barrido, ya sea modular) exige incorporar nuevas estrategias de calibración que contemplen la generación de imágenes equivalentes a las clásicas desde productos iniciales diferentes.

En tercer lugar, la presencia del sensor múltiple exige incorporar estrategias que den cuenta de las relaciones entre los tres elementos.

Mientras que en la calibración de la cámara en sí siguen teniendo gran relevancia los procesos de calibración en laboratorio, en la calibración de los nuevos aspectos adquieren cada mayor importancia los procesos de calibración “in situ”.

Posibilidades de automatización y de cartografía en tiempo real

Los distintos aspectos mencionados se traducen en el hecho de que se abren las puertas a la automatización total del proceso y, aún más, a la posibilidad de automatización en tiempo casi real, de manera que es posible la generación de algunos productos cartográficos nada más aterrizar el avión.

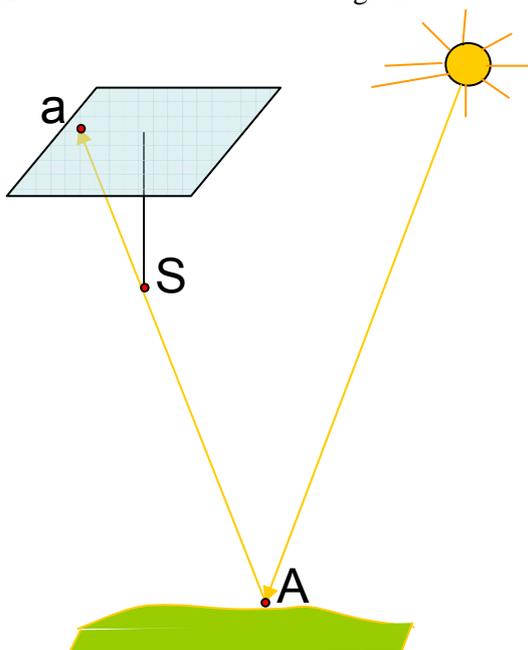
Estas tres revoluciones implican profundos cambios en la Fotogrametría hasta el punto de que en algunos aspectos puede resultar irreconocible para quien la contemple desde un punto de vista clásico. Sin embargo, los aspectos fundamentales, la geometría subyacente, permanece esencialmente intacta. Por ello, se lleva a cabo, a continuación un breve repaso de conceptos básicos que conforman el cuerpo de la Fotogrametría desde sus inicios.

El Método General de la Fotogrametría

El Método General de la Fotogrametría clásica fue formulado en los años sesenta por Bonneval para el contexto específico de la Fotogrametría Analógica Aérea Estereoscópica. El Método se basa en el concepto de haz perspectivo (gerbe perspective), en su formación y en su reconstrucción.

Haz perspectivo es el conjunto de semirrectas que unen la superficie de un objeto tridimensional con un centro de proyección o punto de vista. Una imagen fotográfica es una forma de registro de un haz perspectivo.

El Método General de la Fotogrametría se articula en dos pasos:

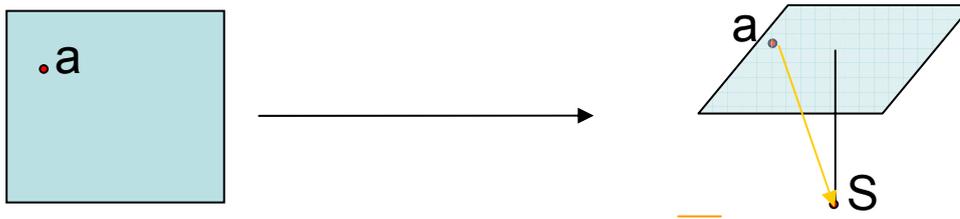


Proceso de toma fotográfica: el haz perspectivo queda registrado en la imagen fotográfica: en este proceso, cada rayo de luz procedente del objeto (A) atraviesa la lente de la cámara (punto de vista, S) y forma una imagen (registro del haz) sobre la película o el CCD situados en el plano focal (a).

Se trata de un proceso bien definido: conocida la posición de A, conocida la posición de S y conocida la geometría y orientación de la cámara se puede calcular la posición del punto imagen (a) sobre la misma.

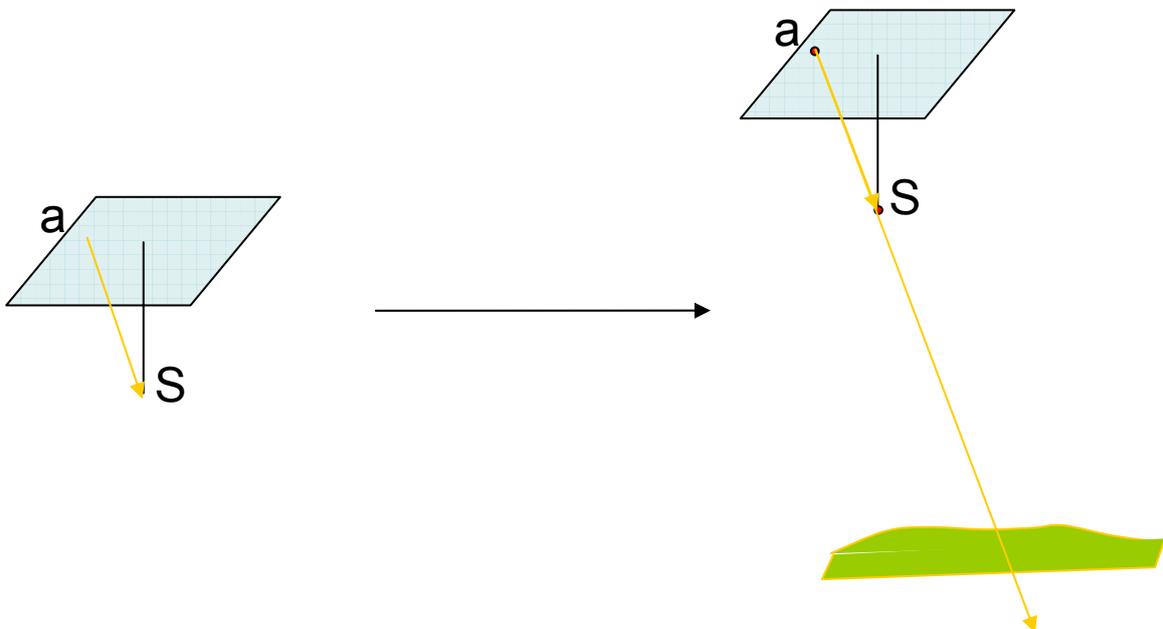
Proceso de reconstrucción de la superficie del objeto: dada la imagen y dado un punto identificado sobre la misma (a), se trata de determinar (dar coordenadas) el punto correspondiente sobre la superficie del objeto. Este proceso se lleva a cabo a través de los siguientes cuatro pasos:

- 1) Orientación interna: reconstrucción de la forma del haz perspectivo o lo que es lo mismo reconstrucción de la cámara con la que se obtiene la imagen. El punto imagen a queda referido al punto de vista S , es decir, se determina el vector aS .



- 2) Orientación externa: reconstrucción de la posición y orientación del haz perspectivo respecto del objeto. Esta reconstrucción puede hacerse en dos pasos:

- Orientación Relativa: los haces perspectivos (cuando hay más de uno) se orientan entre sí.
- Orientación Absoluta: los haces perspectivos, una vez orientados entre sí, se sitúan respecto del objeto.

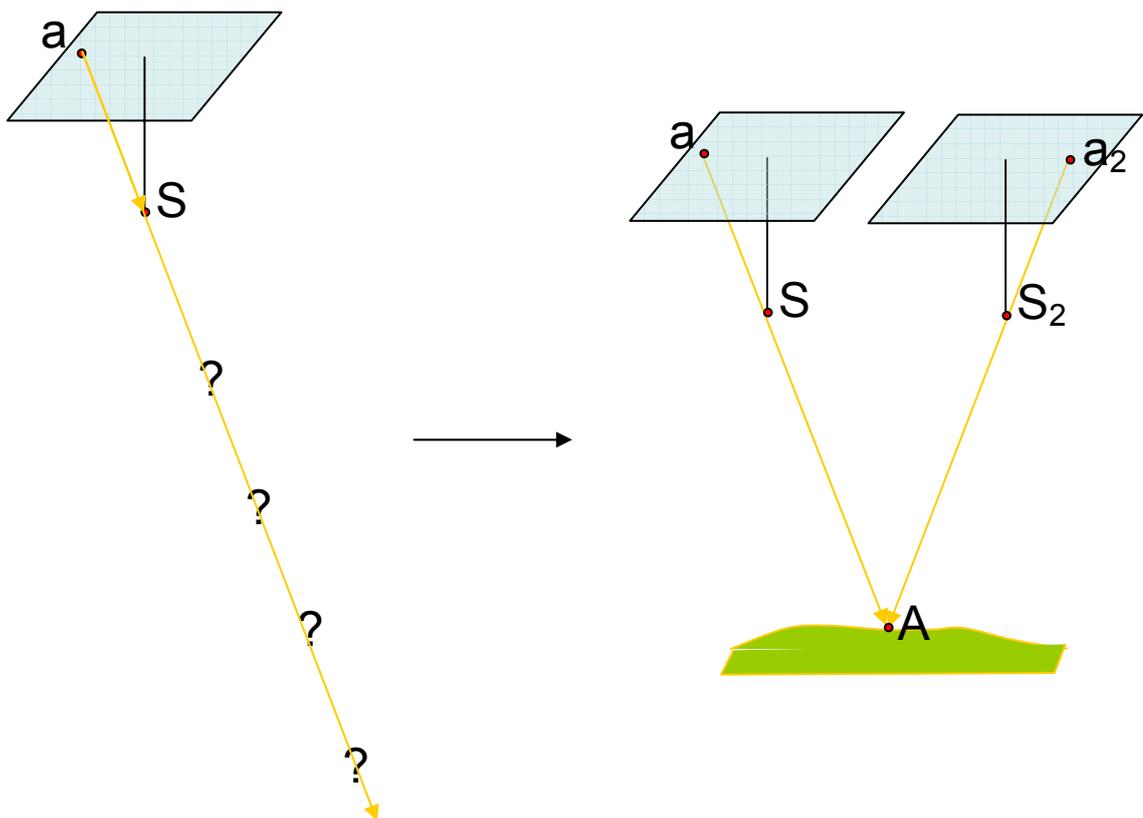


3) Identificación de rayos homólogos.

Las orientaciones internas y externas del apartado anterior abren el camino a la reconstrucción del objeto pues a partir de este instante puede situarse la cámara en el espacio tridimensional en el momento en que se tomó la imagen. De esta manera, el vector S_a , que puede reconstruirse tras la orientación interna, puede situarse en el espacio en relación con el objeto. Sin embargo, esto no nos permite reconstruir el punto A pues, aunque sabemos que este se encuentra sobre el vector aS , no sabemos, sin embargo a qué distancia a lo largo del mismo se encuentra.

Ello nos lleva a la necesidad de emplear un segundo punto, homólogo del primero, situado sobre una segunda imagen. Si se ha llevado a efecto la orientación interna y la orientación externa de esta imagen, se verificará que el punto objeto A se encuentra simultáneamente sobre los dos vectores los dos vectores aS y a_2S_2 .

Tradicionalmente, la identificación de puntos homólogos se ha realizado mediante la visión estereoscópica con la ayuda de la marca flotante en un modelo libre de paralaje (orientado). De ahí, la importancia que este paso tiene en el conjunto del Método General de la Fotogrametría.

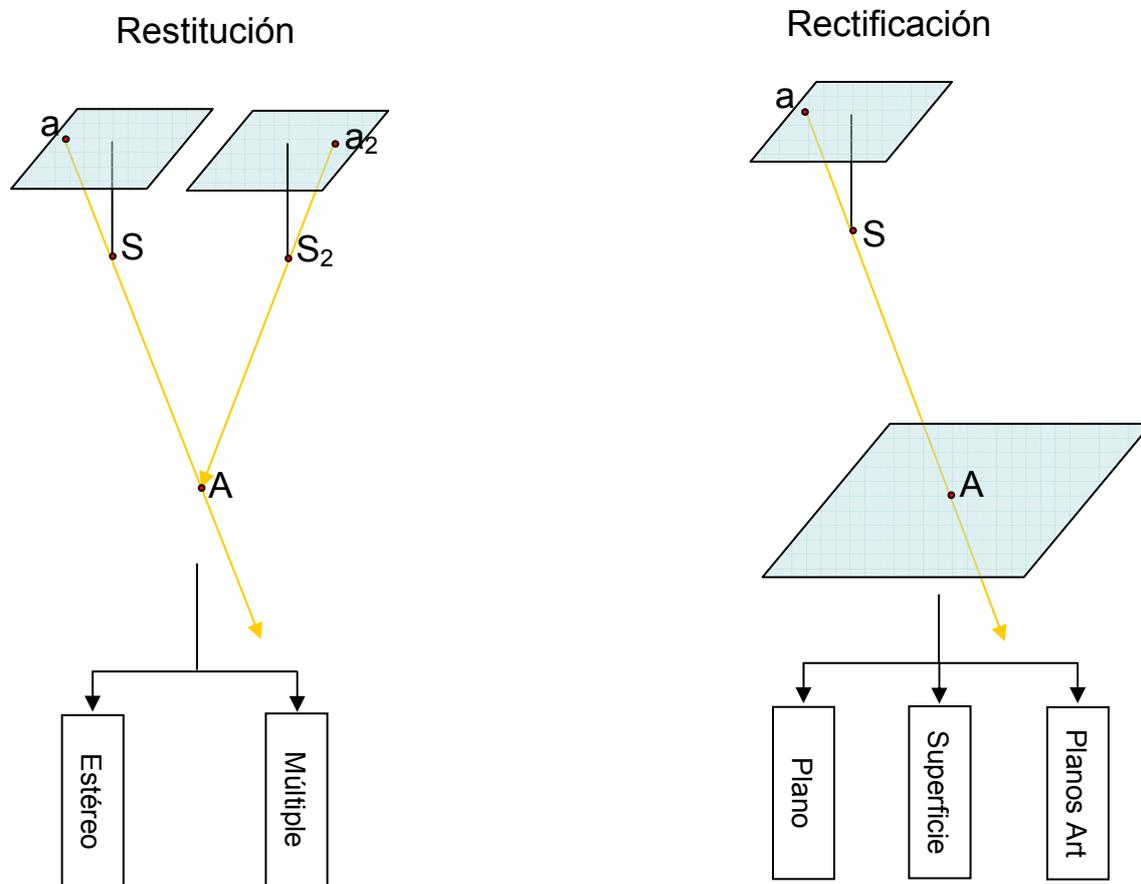


- 4) Representación del punto objeto: una vez identificado los puntos homólogos queda tan sólo proceder a la representación del punto objeto, homólogo de los dos primeros. En la época analógica, este proceso era costoso pues implicaba desarrollar sofisticados procedimientos de transmisión mecánica desde el restituidor propiamente dicho a la mesa de dibujo. En la etapa digital, se trata de un proceso trivial pues las rectas aS y a_2S_2 han quedado determinadas en el paso anterior y tan sólo resta calcular la intersección de las mismas para obtener las coordenadas 3D del punto buscado.

Matización al Método General de la Fotogrametría:

Cuando nació en los años sesenta el método General de la Fotogrametría, este estaba muy condicionado por el procedimiento entonces empleado de forma completamente masiva: el procedimiento analógico estereoscópico aéreo. La evolución experimentada desde entonces hace necesaria la siguiente matización:

En el paso 3) del Método, identificación de puntos homólogos, debe decirse, en primer lugar que puede resolverse sin el concurso de la visión estereoscópica. Para ello se emplea la identificación singular, en cada una de las imágenes, de los puntos homólogos. Al proceder así, se pierde la potencia de la visión estereoscópica pero se gana la posibilidad de involucrar a tantas imágenes como se quiera (robusteciendo así la configuración de toma) y se gana asimismo la posibilidad de implantar una red de toma más flexible que la impuesta por las exigencias de la toma estéreo.



En segundo lugar, y más importante, debe decirse que no es estrictamente necesario involucrar una segunda imagen. Puede trabajarse con una sola imagen siempre que se pueda imponer una restricción que elimine la ambigüedad comentada anteriormente relativa a la localización del punto objeto a lo largo del vector aS .

Una forma muy habitual en Fotogrametría Terrestre (arquitectónica) de plantear esta restricción es forzando a que el punto del objeto esté contenido en un plano (p.e el plano de una fachada) o bien en una superficie conocida (cilindro, esfera, cono o cuádrlica en general) o bien en una serie articulada y conocida de planos (como por ejemplo los distintos planos verticales y ortogonales entre sí de un edificio).

Esta segunda serie de soluciones al paso 3 del Método General de la Fotogrametría quedan recogidas bajo la categoría de la Rectificación Fotogramétrica (frente a la Restitución Fotogramétrica) que se caracteriza, en cualquier caso, por el hecho de que el objeto se recupera como un modelo bidimensional.

El Método General de la Fotogrametría como Proceso Operativo

En el apartado anterior se ha pasado revista al Método General de la Fotogrametría desde el punto de vista de su fundamentación geométrica. Ahora bien, también puede abordarse esta cuestión desde el punto de vista operativo, esto es como el conjunto de pasos que deben recibir los datos iniciales (input) para alcanzar los datos finales (output). En este sentido el Método General de la Fotogrametría bien puede describirse como el procedimiento que permite transformar las coordenadas observadas o coordenadas instrumentales, (adquiridas mediante el instrumento de medida) en coordenadas objeto o coordenadas terreno que dan soporte a la cartografía.

Bajo esta perspectiva, las diferentes orientaciones que constituyen los pasos 1 y 2 del Método General de la Fotogrametría se constituyen en los distintos pasos intermedios que deben darse entre el principio y el final.

Esta visión del Método General de la Fotogrametría no resulta demasiado afortunada si se pretende aplicar a los aspectos clásicos de la Fotogrametría Analógica Estereoscópica pues en ella los pasos 3 y 4 del Método, relativos a la exploración estereoscópica y a la representación cartográfica de la misma, tenían un peso considerable. Pero sí es especialmente apropiada para los casos de la Fotogrametría Analítica y Digital pues en ellos se trata de aplicar unos determinados procesamientos numéricos a unos datos de entrada (input) para obtener los datos de salida (output). Esos procesamientos numéricos se articulan en torno a las orientaciones.

Así la Orientación Interna puede considerarse como el proceso que permite transformar las coordenadas instrumentales en fotocoordenadas; la orientación relativa, el que permite transformar las fotocoordenadas en coordenadas modelo; la orientación absoluta, el que permite transformar las coordenadas modelo en coordenadas terreno; la orientación externa, el que permite transformar las fotocoordenadas en coordenadas terreno; finalmente el proceso de autocalibración es el que los abarca a todos ellos contemplando la transformación global desde las coordenadas instrumentales a las coordenadas terreno.

Para cada una de estas orientaciones o procesos, llamaremos coordenadas de entrada a los datos que han de ser transformados y coordenadas de salida a los datos resultado de dicha transformación. El Método General de la Fotogrametría, entendido como proceso operativo es así un encadenamiento de transformaciones en el que las coordenadas de salida de una determinada fase actúan como coordenadas de entrada en la siguiente.

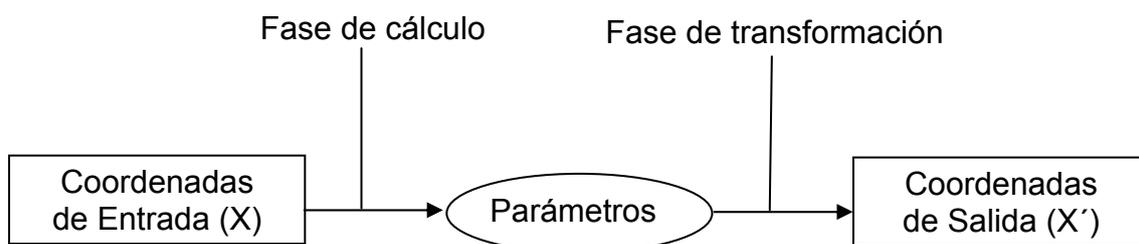
A su vez, cada uno de estos pasos parciales, cada una de estas transformaciones parciales, puede siempre descomponerse en dos pasos operativos con características diferenciadas.

Las coordenadas de entrada se relacionan con las coordenadas de salida a través de un modelo funcional (matemático) basado en las relaciones geométricas que se pueden establecer entre los sistemas cartesianos de ambos tipos de datos. Pues bien, el primero de los pasos operativos (y el realmente significativo) consiste en determinar los parámetros que establecen la relación específica entre los datos de entrada y los datos de salida. Llamaremos a esta fase, fase de cálculo y se caracteriza por:

- Son datos conocidos las coordenadas de entrada y las coordenadas de salida; al menos, una muestra de las mismas lo suficientemente grande como para poder determinar los parámetros en cuestión.
- Son incógnitas, datos a determinar, los parámetros del modelo funcional que relaciona las coordenadas de entrada con las coordenadas de salida.
- Es un paso que puede llegar a ser complejo, en función de la complejidad del modelo matemático que se plantee. La mayor dificultad está relacionada con la matriz de rotación 3x3 que relaciona la distinta orientación de dos sistemas cartesianos en el espacio. Esta matriz de rotación es lineal expresada en nueve términos pero no lineal expresada en función de los tres ángulos elementales que la constituyen. En esta medida, suele ser necesario tener que proceder a la linealización del modelo de cara a su solución. Y en esta misma medida, es muy conveniente que este proceso se resuelva con datos sobreabundantes de manera que pueda procederse a la aplicación de ajustes de carácter estadístico. Es decir, cuanto mayor sea la muestra de datos con coordenadas de entrada y salida conocidas, mejor.

El segundo de los pasos operativos (y casi trivial, una vez determinado el primero) consiste en transformar las coordenadas de entrada en las coordenadas de salida a través de los parámetros de transformación determinados en el paso anterior. Llamaremos a esta fase, fase de transformación y se caracteriza por:

- Se aplica sólo tras la resolución de la fase anterior, es decir, tras el conocimiento de los parámetros que permiten establecer la relación concreta entre los datos de entrada y los datos de salida. En esta medida, suele ser una fase bastante sencilla, que no requiere una linealización previa y que tampoco suele requerir datos sobredeterminados.
- Son datos conocidos las coordenadas de entrada así como los parámetros que relacionan ambos sistemas.
- Son datos a calcular las coordenadas de salida.



Por otro lado, como ya se ha apuntado, en la mayor parte de estos procesos (en todos los que hay sobreabundancia de datos) cabe distinguir entre dos modelos que deben aplicarse articuladamente:

El modelo funcional:

Establece la relación matemática o geométrica entre los datos. Se basa en la hipótesis de que los elementos de la realidad verifican determinadas condiciones geométricas, tales como colinealidad, coplanaridad, perpendicularidad, paralelismo, simetría, etc., expresables

matemáticamente. Responde a una idealización de la realidad pero que permite establecer predicciones prácticas dentro de determinado orden de precisión.

El modelo funcional, por excelencia, del Método General de la Fotogrametría Analítica y Digital es la condición de colinealidad que establece la alineación entre el punto imagen, el punto de vista y el punto objeto. Es el modelo básico que permite relacionar el documento original (la imagen) con el documento de destino (el objeto). Este modelo se completa con la condición de coplanaridad, que es una extensión de la condición de colinealidad al caso de dos imágenes en las que hay que identificar puntos homólogos. Este modelo establece que los dos puntos de vista, los dos puntos imagen homólogos y el punto correspondiente en el objeto pertenecen a un solo plano.

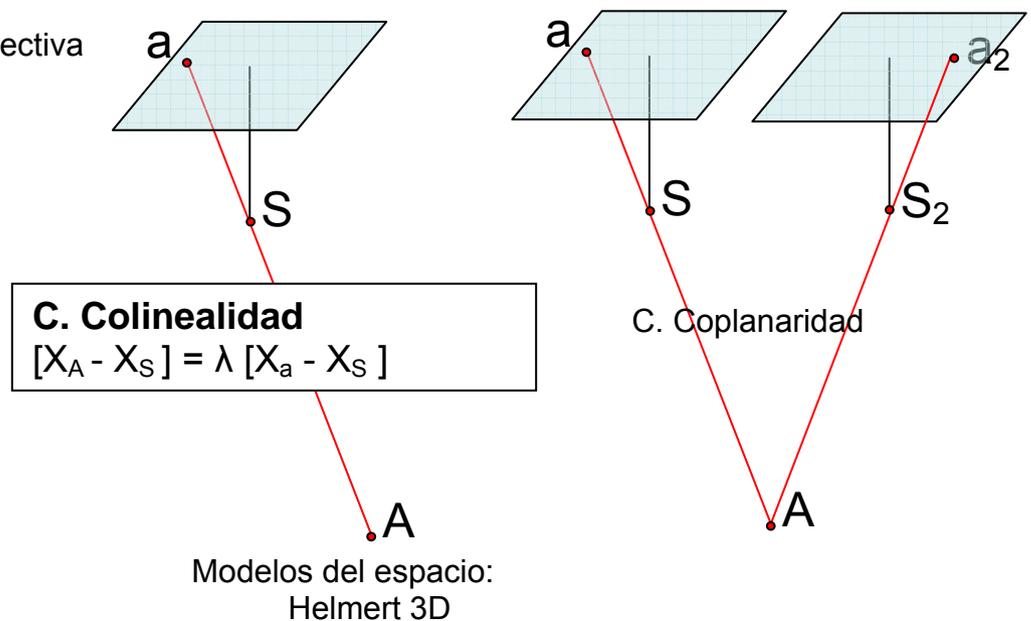
Estos dos modelos básicos se completan con otros que permiten llevar a efecto transformaciones en el plano (contexto de la imagen) y en el espacio (contexto del objeto).

Modelos del plano:

Helmert 2D

T. Afín

T. Proyectiva



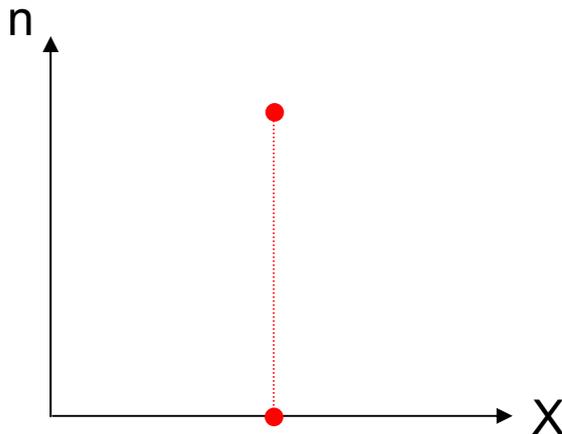
El modelo estocástico:

Este modelo da cuenta de la insuficiencia del modelo funcional. Es decir, da cuenta del hecho de que al plantear el modelo funcional se asume una idealización pues ni los objetos de la realidad pueden someterse a restricciones geométricas perfectas ni, mucho menos, podemos medir dichos objetos con precisión infinita. El modelo estocástico establece la hipótesis de que cada vez que medimos, cada vez que llevamos a cabo una acción de carácter métrico cometemos un determinado error. Se asume asimismo que:

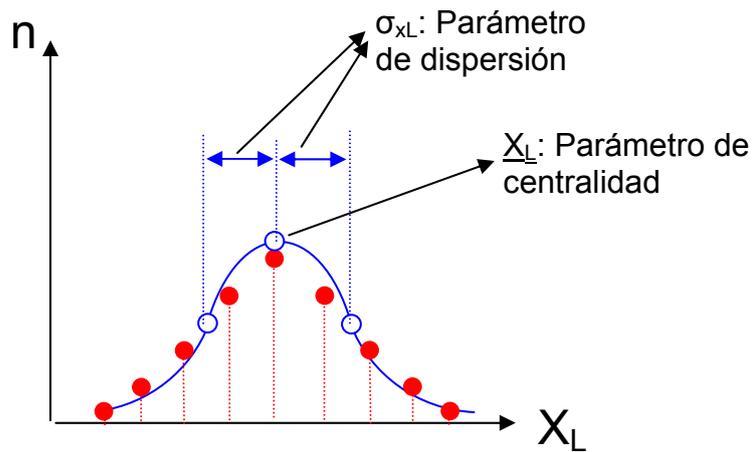
- a) Si consiguiéramos eliminar el error de la medida esta alcanzaría su valor ideal es decir cumpliría el modelo funcional. Se debe cumplir que $X = X_L + V$, con X , valor ideal que verifica el modelo funcional; X_L , valor medido; V , corrección al valor real para que alcance el valor ideal.

- b) Los errores cometidos en la medida V y, en consecuencia, las propias medidas X_L , se comportan de acuerdo con un cierto modelo: se distribuyen de acuerdo con cierto sistematismo en torno a un valor central o promedio.
- c) Como consecuencia de los dos aspectos anteriores, se asumirá que el valor medio en torno al que se agrupan las distintas medidas realizadas es el valor ideal con el que podemos plantear el modelo funcional. En consecuencia, se asume que el valor promedio de los errores es cero.
- d) Se asume que la dispersión de la población de medidas (o de los errores) coincide con la desviación standard respecto de su valor medio. Es decir, aunque los errores no son directamente determinables, sí puede determinarse la desviación standard de los mismos.
- e) El modelo estocástico más empleado en Fotogrametría, así como en toda la Ingeniería Geomática, es el criterio de mínimos cuadrados que establece que la composición cuadrática y ponderada de los errores asociados a la solución del modelo funcional que aceptaremos como “mejor”, debe ser mínima. $V^T W V = \text{minimo}$. Con V , los errores que deben minimizarse y W los pesos de las correspondientes medidas. Estos pesos se calculan como inversamente proporcionales a las varianzas (cuadrados de las desviaciones Standard).

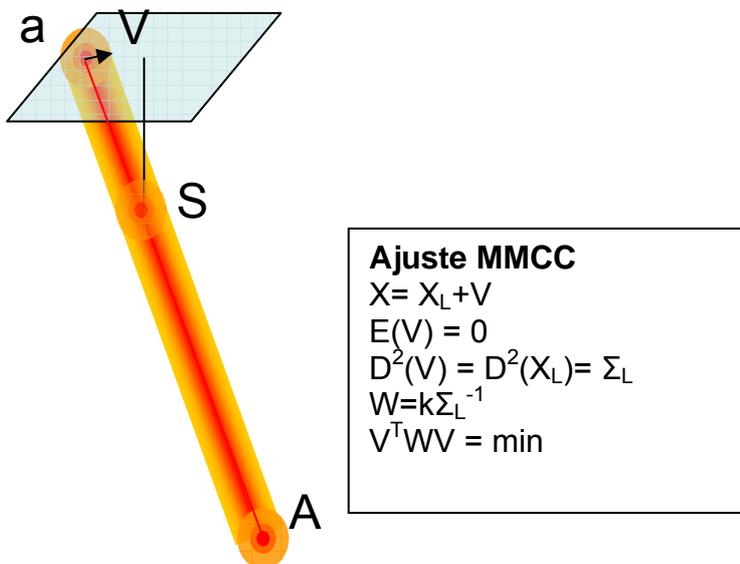
Así, si sólo consideramos el modelo funcional, estamos manejando certezas: si medimos n veces una misma magnitud obtendremos la misma medida n veces.

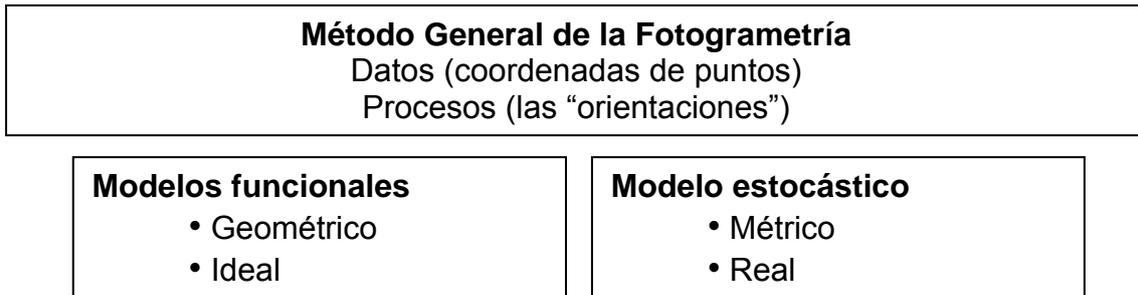


Pero si consideramos el modelo estocástico, estamos manejando incertidumbres: si medimos n veces una misma magnitud obtendremos una distribución de valores. Esta distribución de valores, sin embargo, no es completamente aleatoria pues se distribuye en torno a un valor central y presenta una determinada simetría.



En el caso de la condición de colinealidad, vista en el apartado precedente, el modelo estocástico añade, respecto de lo dicho en el modelo funcional, que ni el punto imagen ni el punto de vista ni el punto del objeto tienen entidad real (no existen como puntos) ni, en consecuencia, lo tiene la recta que los une. Los tres “puntos” son, más bien, poblaciones que se “densifican” en torno a un valor central de manera que podemos emplear dicho valor más probable para imponer la condición geométrica de colinealidad.





Esquema de la Fotogrametría Digital y Analítica

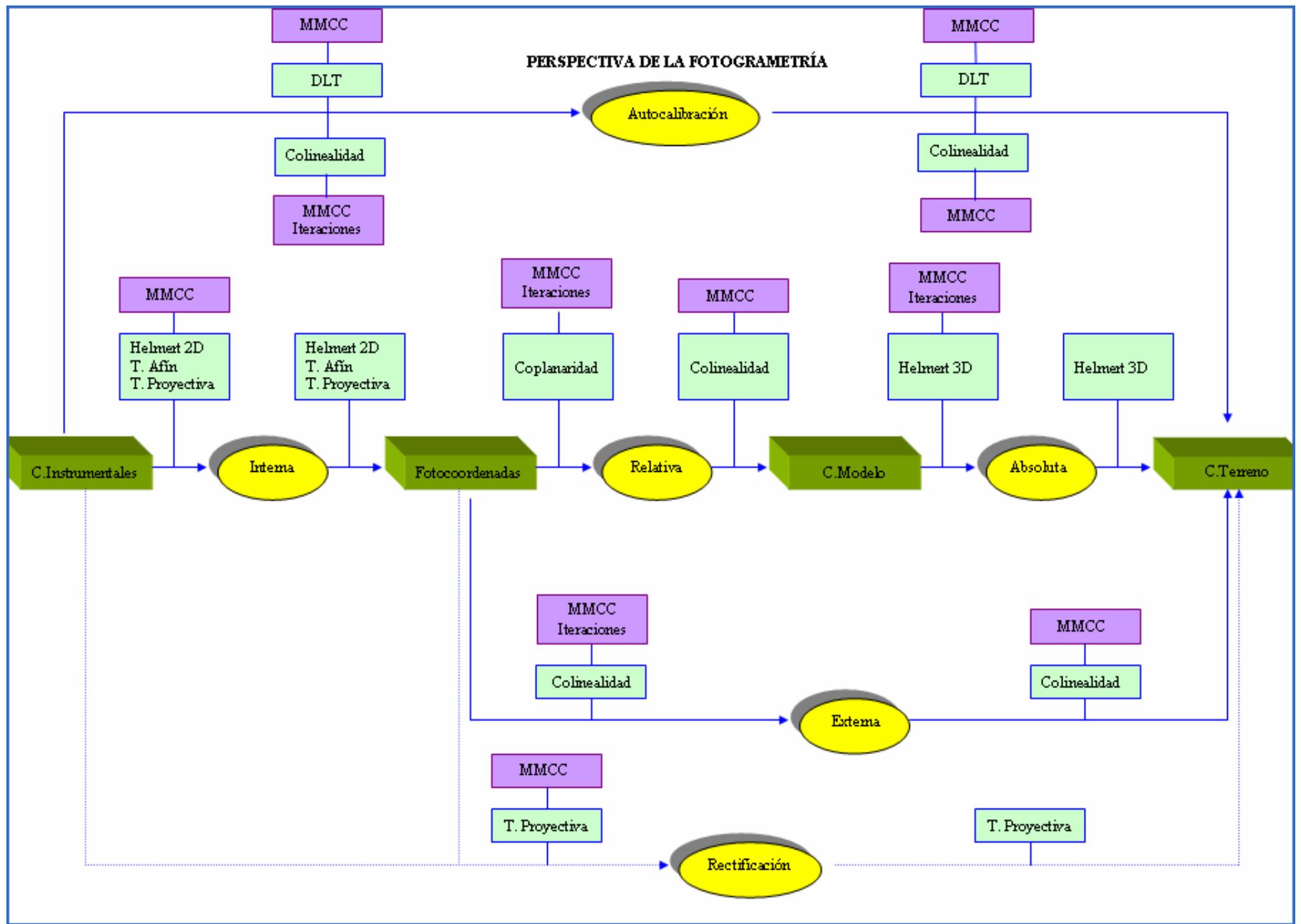
En el cuadro de la página siguiente aparece esquematizado el Método General de la Fotogrametría Digital (y Analítica).

En los recuadros sólidos verdes aparecen los diversos datos (las coordenadas que deben ser procesadas)

En los óvalos amarillos aparecen los diversos procesos (las orientaciones que establecen el paso de unos tipos de coordenadas a otros).

En los recuadros en azul claro se indica el modelo funcional que permite resolver, bien la fase de cálculo, bien la fase de transformación asociada a cada proceso.

En los recuadros en color morado se indica si el modelo en cuestión requiere de una estrategia de mínimos cuadrados (MMCC) o, en su caso, de una estrategia iterativa puesto que el modelo original no puede linealizarse sencillamente y debe recurrirse al desarrollo en serie de Taylor.



Caracterización de la Fotogrametría Analítica y Digital

Una forma de establecer una diferencia entre la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital es en base al nivel de automatización que una y otra incorporan. Para analizar las diferencias en este sentido, analizaremos las tareas que un operador de Fotogrametría debe llevar a cabo. Estas son:

- 1) Búsqueda: una imagen fotogramétrica contiene una vasta cantidad de información (en torno a 120 millones de píxeles) en la que hay que moverse para localizar una amplia variedad de información (desde marcas fiduciales hasta líneas de ruptura).
- 2) Identificar: debe poderse atribuir una identidad a las diversas entidades que aparecen en la imagen.
- 3) Medir: una vez identificada un determinado objeto, este debe ser medido.
- 4) Procesar: una vez obtenida la medida, esta debe ser procesada según el Método General de la Fotogrametría de manera que pueda alcanzarse una descripción métrica del objeto en el sistema cartográfico pertinente.

En la etapa analítica la automatización se aplica tan sólo a partir de los puntos 3 y 4. Por una parte, la tarea de medir se encuentra en gran medida automatizada y resulta una cuestión trivial una vez realizada la búsqueda y la identificación de la información pertinente: el operador no tiene más que identificar el elemento en cuestión mediante el índice de medición y presionar algún dispositivo. El software se “encarga” entonces de registrar las coordenadas instrumentales asociadas a la posición del índice de medición. A partir de aquí, el procesamiento de las medidas realizadas queda recogido en algoritmos de cálculo que permiten obtener de forma automática los resultados finales.

Debe indicarse también que, en esta época existe una cierta automatización de ciertas tareas muy elementales de búsqueda. El programa es capaz de localizar, por ejemplo, la posición aproximada de las marcas fiduciales una vez medidas las dos primeras o de eliminar el paralaje vertical una vez resuelta la orientación relativa, lo que es equivalente de calcular la recta epipolar.

Estas tareas son, sin embargo, triviales comparadas con las que se espera de la etapa digital pues ésta aspira a la automatización total, tanto de la tarea de búsqueda como de la tarea de identificación.

Búsqueda: en relación con la vastedad de la búsqueda asociada a la tarea fotogramétrica debe indicarse que lo más importante es poder establecer restricciones de manera que se pueda acotar dicha tarea. Algunas de las restricciones más importantes son las relacionadas con:

- La imposición del caso normal para la situación de imágenes estereoscópicas: el conocimiento de que las imágenes son aproximadamente paralelas entre sí y respecto de la base y que se encuentran separadas por una magnitud conocida aproximadamente de antemano facilita enormemente la búsqueda de los elementos más determinantes del proceso fotogramétrico: los puntos homólogos.
- Una vez resuelta la orientación es posible calcular rectas epipolares que representan el lugar geométrico donde debe encontrarse el punto homólogo de uno seleccionado como referencia en otra imagen.

- Si además se dispone de información acerca de la distribución del relieve es posible establecer intervalos de búsqueda sobre la recta epipolar.

Identificación: la tarea de identificación se corresponde con la tarea de matching o de emparejamiento de información. Esta identificación o matching tiene diversos niveles:

- El más elemental es el correspondiente a la comparación de los atributos más simples de la imagen: los niveles de gris de los píxeles de un determinado entorno. Es el más sencillo de implementar pero también es el más limitado en cuanto a las posibilidades cartográficas que ofrece.
- Un nivel más complejo es el asociado con la comparación de determinadas características (geométricas y/o topológicas) extraídas de la imagen
- El nivel más complejo es el que se corresponde con la llamada correspondencia semántica en la que los elementos crudos de la imagen son contrastados con patrones que permiten la atribución de una determinada identidad a los elementos de la imagen.

Se comentan a continuación algunos rasgos de las tareas de búsqueda e identificación en relación con determinados datos que son tratados en el Método fotogramétrico (ver cuadro en la página 21). Tenemos, por una parte, las tres orientaciones clásicas con sus típicos datos de referencia: las marcas fiduciales en la orientación interna; los puntos de Von Gruber en la orientación relativa; los puntos de apoyo en la orientación absoluta. Tenemos, además, la tarea de restitución dividida en tres grupos, en función de de la asequibilidad de la automatización:

- En primer lugar la restitución masiva, correspondiente a la generación de un modelo digital de elevaciones (ráster) y de una ortofoto. Este tipo de restitución se caracteriza por el hecho de que no es necesario discriminar la información en función de su naturaleza. Todos los puntos a procesar tienen el mismo valor cartográfico.
- En segundo lugar, se incluye la restitución restringida, correspondiente a la generación de un modelo digital del terreno (con líneas de ruptura) o a la generación de un modelo digital de superficies (con edificios). La característica de este tipo de restitución es que es necesario discriminar determinada información de carácter geométrico. En el primer caso, hay que extraer bordes altimétricos o líneas de ruptura. En el segundo, hay que extraer también los bordes que conforman el volumen del edificio o bien proceder a algún tipo de modelización paramétrica que permita la identificación global del mismo. Esta situación se caracteriza por el hecho de que una vez extraída esta información, puede procederse como en el caso anterior, es decir, al procesamiento masivo de la información contenida en las imágenes.
- Finalmente, se considera la restitución selectiva que se corresponde con la compilación cartográfica en la que, además, de una tarea métrica debe realizarse una tarea interpretativa por la que se confiere una determinada identidad (río, carretera, casa, ...) a los elementos de la imagen.

Bajo la columna de “Búsqueda” del cuadro de la página siguiente se establecen distintas calificaciones para los tipos de datos que aparecen en la columna correspondiente:

- Local: cuando los datos se encuentran localizados en una determinada zona de la imagen.
- Extendida: cuando los datos se encuentran distribuidos por el conjunto de la imagen.

- Precisa: cuando se dispone de mucha información a priori acerca de la localización de los datos.
- Regular: cuando los datos se aproximan a un patrón regular de distribución sobre a imagen.
- Irregular: cuando no existe información de ningún tipo sobre la distribución de los datos sobre la imagen.

Bajo la columna de “Identificación” aparecen los rasgos básicos que caracterizan la tarea de matching o correspondencia:

- Objeto 2D: se trata de establecer la correspondencia entre los niveles de gris de la imagen y un determinado patrón de referencia que describe la geometría y radiometría de la marca fiducial.
- Imagen: se trata de identificar puntos homólogos a partir de la comparación de los niveles de gris de sendos entornos de las imágenes
- Objeto 3D desconocido: alude a la posibilidad de seleccionar cualquier objeto de la realidad como punto de apoyo. Imagen singular hace referencia al croquis en el que se recoge la descripción gráfica de un punto de apoyo
- Bordes altimétricos (radiométricos) se refiere a la posibilidad de detectar líneas de ruptura con la posible facilidad añadida de que esta coincida con un borde radiométrico.
- Bordes. Modelización semántica se refiere a la posibilidad de identificar edificios, bien a través de los bordes que los conforman, bien a través de su identificación mediante modelos paramétricos.
- Objeto 3D variable se refiere a la identificación general de la información geográfica que debe ser compilada para formar parte del mapa.

Proceso	Datos	Búsqueda	Identificación
Orientaciones Interna	Fiduciales	Local Precisa	Objeto 2D
Relativa	Puntos Von Gruber Puntos de Paso	Extendida +Regular	Imagen
Absoluta / Externa	Puntos de Apoyo	Extendida +Irregular	Objeto 3D desconocido Imagen singular
Restitución masiva	MDE ráster	Extendida Precisa	Imagen
	Ortofoto	Extendida Precisa	No hay
Restitución restringida	MDT / TIN Líneas de ruptura	Extendida Irregular	Bordes altimétricos (radiométricos)
	MDS / Edificios	Extendida Irregular	Bordes Modelización semántica
Restitución selectiva	Elementos cartográficos	Extendida Irregular	Objeto 3D variable

Referencias bibliográficas

American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994. "Mapping and Remote Sensing. Tools for the 21 st Century". American Society of Photogrammetry. Leesburg.

American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996. "Digital Photogrammetry: an addendum to the Manual of Photogrammetry". Bethesda. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Atkinson, KB. 1997 "Close Range Photogrammetry and machine vision" Whitties Publishing. Bristol

Kasser, M; Egels, Y. 2002. "Digital Photogrammetry" London. Taylor & Francis

Kraus, 1997."Photogrammetry". Ümmler. Bonn

Lerma J.L. 2002. "Fotogrametría moderna, analítica y digital" Valencia. Servicio de Publicaciones de la UPV

Linder W. 2003. "Digital Photogrammetry. Theory and applications". Springer

Mikhail, E.M. Bethel, J.S. McGlone, J.C. "Modern Photogrammetry". 2001. New York. John Wiley & sons

Schenk, T. 1999 "Digital Photogrammetry. Vol I" Terrascience

Wolf, P.R. Dewitt, B.A. 2000 "Elements of photogrammetry" McGraw - Hill.

Warner, W.S. Graham, R.W. Read, R.E. "Small format aerial photography" Whittles publishing