

## TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS APLICADAS AL PATRIMONIO

---

**Guadalupe Durán Domínguez, Universidad de Extremadura. Escuela Politécnica,  
Avda. de la Universidad, 10071 Cáceres, [afoto@unex.es](mailto:afoto@unex.es)**  
**Javier de Matías Bejarano, Universidad de Extremadura. Escuela Politécnica,  
Avda. de la Universidad, 10071 Cáceres, [jmatias@unex.es](mailto:jmatias@unex.es)**  
**José Juan de Sanjosé Blasco, Universidad de Extremadura. Escuela Politécnica,  
Avda. de la Universidad, 10071 Cáceres, [jjblasco@unex.es](mailto:jjblasco@unex.es)**

---

### RESUMEN

---

Nuestro objetivo es mostrar las diferentes técnicas fotogramétricas aplicadas al Patrimonio de bienes muebles e inmuebles. Para ello, existe la posibilidad de análisis fotogramétrico, en la cual se emplea una sola fotografía (rectificación), dos fotografías (tomas normales o estereoscópicas) o se utilizan tres o más fotografías simultáneamente (tomas convergentes e inclinadas). En el caso de la rectificación se trata de un proceso fotogramétrico bidimensional  $(X, Y)$ , mientras que si existe «recubrimiento» entre las imágenes procedemos a un proceso fotogramétrico tridimensional  $(X, Y, Z)$ .

La técnica normalmente empleada es la fotogrametría de *tomas normales*, pero existe la posibilidad de *tomas convergentes*, donde las condiciones geométricas no son tan restrictivas como en el caso de las *tomas normales*. Pero, tienen el inconveniente que el proceso de restitución es más lento, puesto que no existe la posibilidad de trabajar de manera estereoscópica.

Además, de las anteriores técnicas, existe la «rectificación», la cual puede emplearse para el estudio de elementos planos (fachadas lisas, cuadros,...).

En definitiva, con la aplicación de la técnica fotogramétrica se persiguen los objetivos:

1. Producción cartográfica a gran escala (1/10, 1/50, 1/100,...), con errores inferiores, incluso al centímetro. Una vez está ejecutada la cartografía, puede hacerse mediciones de distancias, superficies, volúmenes, ejecución de perfiles,... En un proceso posterior, es posible obtener la reproducción o réplica del original con gran exactitud.
2. Análisis de detalle métrico sobre las fotografías originales. Las fotografías recogen «toda» la información del objeto, por ello es posible hacer estudios de detalle de las patologías de los bienes muebles o inmuebles. De esta manera, puede advertirse el estado de ciertos deterioros y alteraciones frente a una labor de conservación o restauración. Incluso, puede hacerse un seguimiento a lo largo del tiempo, de manera que será efectiva también su utilización en conservación preventiva (Matteini, 2001).



## 1. METODOLOGÍA FOTOGRAMÉTRICA GENERAL

---

### 1. 1. Conceptos fotogramétricos

De manera sencilla, puede decirse que la técnica fotogramétrica consiste en transformar la información bidimensional  $(x,y)$  suministrada por las fotografías en información espacial o tridimensional  $(X,Y,Z)$  del objeto fotografiado. Para ello, es necesario aplicar el denominado ‘método general de la fotogrametría’, donde se resuelven los procesos de: orientación interna, relativa y absoluta.

Una característica fundamental para la aplicación del ‘método general de la fotogrametría’ es que la cámara fotográfica empleada debe estar calibrada, por tanto, hay un conocimiento exhaustivo de sus parámetros internos: la distancia principal o focal, las coordenadas del punto principal y la función de distorsión del sistema de lentes.

Antes de comenzar cualquier trabajo hay que definir los errores máximos permitidos, ya que esto condicionará los procesos de cálculo posteriores. De esta manera, el error máximo cartográfico o tolerancia está expresado por:

$$\text{Tolerancia} \leq 0,2 \cdot E$$

Siendo,  $E$  el denominador de la escala cartográfica. Y el valor de  $0,2$  (en milímetros) es el denominado ‘límite de percepción visual’. Por tanto, para una cartografía a escala  $1/100$  el error máximo permitido es de 2 cm.

Por tanto, en el caso de emplear la técnica fotogramétrica, la precisión de la cartografía dependerá en gran medida de:

1. La distancia del centro de proyección de la cámara fotográfica al objeto.
2. Conocimiento fidedigno del certificado de calibración de la cámara.
3. Distancia focal de la cámara (teleobjetivo, angular normal, gran-angular, supergran-angular).
4. El tamaño del píxel (cámara digital o escáner) de la imagen digital.
5. Precisión del apoyo topográfico-geodésico de campo para dar escala al objeto.

Para desarrollar la técnica fotogramétrica es necesario disponer de fotografías «con recubrimiento» del objeto, esto es, el objeto fotografiado debe aparecer en al menos dos imágenes para observarlas posteriormente con visión estereoscópica (tomas normales) o sin estereoscopia (tomas convergentes e inclinadas) (Wolf, 1974).

Por tanto, según la geometría de las fotografías, se podría realizar la siguiente clasificación (Karara, 1980):

1. Tomas normales: Las direcciones de las tomas fotográficas son paralelas y perpendiculares a la base fotogramétrica (**Figura 1.a.**).

2. Tomas convergentes e inclinadas: Las direcciones de las tomas fotográficas convergen. Esto hace que no sean perpendiculares a la base (**Figura 1.b.**).

Además, se define ‘fotogrametría de objeto cercano’ a la realización de la toma fotográfica con una distancia hasta el objeto menor a 200 m. y en general, este es el caso que se produce en la ejecución de cartografía de estructuras muebles e inmuebles mediante la técnica fotogramétrica (Wolf, 1974).

Si el objeto a analizar es plano, podemos hacer una simple fotografía y proceder a una transformación proyectiva bidimensional de coordenadas o *rectificación*. Como posteriormente veremos, esta es una técnica muy simple que en ciertos casos es muy práctica.

## **1. 2. Toma de datos de campo**

### **1. 2. 1. Obtención de las fotografías digitales**

Las fotografías de los acervos se tomaron con una cámara analógica (Rollei semimétrica 6006) y negativo Fujifilm Superia de 100/21” ISO. Para realizar el tratamiento informático de las fotografías se hace necesario su escaneado. Para la elección de la resolución de escaneado se tuvo en cuenta: la precisión requerida en el producto final, la escala de la imagen fotográfica, el tamaño de información de la imagen digital y la capacidad de almacenamiento del ordenador. El escáner fotogramétrico empleado fue el Vexcel UltraScan 5000, cuya alta precisión geométrica y radiométrica está demostrada (Gruber y Leberl, 2000).

Actualmente, existen cámaras digitales económicas y con grandes resoluciones como la Canon EOS 5D de 13 megapíxeles y con el formato completo de 35 mm.

### **1. 2. 2. Apoyo fotogramétrico**

Para el desarrollo de la fotogrametría tridimensional, al menos son necesarios tres puntos, con coordenadas tridimensionales  $(X, Y, Z)$ , distribuidos homogéneamente en toda la zona de recubrimiento de los fotogramas. Aunque en la práctica se dispone de una gran cantidad de puntos de apoyo por cada par de fotografías.

En nuestro caso, para la asignación de coordenadas a los puntos de apoyo y para el cálculo de errores del apoyo se tuvo en cuenta las características técnicas de la estación total «sin prisma» Topcon GPT-7005i con las siguientes características técnicas: Sensibilidad: 90<sup>CC</sup>, Aumentos: 30 X, Apreciación: 5<sup>CC</sup>, y error en distancia de 2 mm 2 ppm, y se ha utilizado el método de radiación desde una estación. Con ello, se dispone de las coordenadas de los puntos con errores máximos de 4 mm.

Las prestaciones de esta estación topográfica son:

1. Imagen del ocular en una pantalla gráfica.
2. Registro fotográfico del punto medido sin necesidad de hacer croquis.
3. Posibilidad de visuales muy inclinadas.
4. Verificación de los puntos con la medición en pantalla (**Figura 2**).

Por otra parte, para el desarrollo de la fotogrametría bidimensional, son necesarios al menos cuatro puntos de apoyo, con coordenadas bidimensionales  $(X, Y)$  distribuidos homogéneamente en toda la fotografía. Como entendemos que el objeto fotografado es plano (fachada exterior de un edificio, pintura mural,...) y tiene la misma coordenada  $Z$ ; por tanto, sólo es necesario conocer dos de sus coordenadas.

## **2. FOTOGRAMETRÍA NORMAL**

---

Es bien conocido que la mayoría de la cartografía se realiza mediante fotogrametría, por ello a continuación se hace un breve estudio del 'método general de la fotogrametría'. Este método es posible desarrollarlo disponiendo del conjunto de fotografías «con recubrimiento» y los puntos de apoyo fotogramétricos. Una vez orientadas las fotografías es posible hacer el proceso de restitución, con el cual se registran las coordenadas terreno u objeto  $(X, Y, Z)$  de aquellos puntos que definen el elemento a representar. Para la realización del 'método general de la fotogrametría' es necesario seguir las siguientes fases (Domingo, 1985):

1. Orientación interna: Correcciones de las deformaciones producidas en el proceso fotogramétrico terrestre, como son, las deformaciones propias de la película en proceso de revelado y la distorsión del sistema de lentes del objetivo. Para esta fase es fundamental el certificado de calibración de la cámara.
2. Orientación relativa: En esta fase se obtienen las coordenadas modelo, la cual es un sistema relativo de coordenadas, donde su origen está en el centro de proyección izquierdo. Para orientar el modelo se deben situar los centros de proyección y los planos imagen en la misma posición espacial que en el momento de realizarse las tomas fotográficas.
3. Orientación absoluta: En esta fase se escala el modelo de la fase anterior (orientación relativa), y además se gira el modelo y se traslada a su posición verdadera en el espacio. Este proceso se ejecuta mediante una transformación tridimensional de semejanza, en la que participan activamente los puntos de apoyo con sus coordenadas objeto o terreno.

Para el desarrollo de la técnica normal es necesario utilizar restituidores analógicos (en la actualidad, estos instrumentos están obsoletos), analíticos (formato de las fotografías analógicas) o digitales (fotografías digitales). En la actualidad, los aparatos empleados son los restituidores digitales, principalmente por las prestaciones que tienen (modelización tridimensional, ortofotos,...). En nuestro caso se ha empleado el restituidor digital *Photopol*. El inconveniente es que son instrumentos donde su coste económico es elevado (superior a los 15.000 euros). No ocurre lo mismo con programas informáticos que ejecutan la *técnica fotogramétrica convergente e inclinada*, pero en este caso las prestaciones son menores y la restitución no es estereoscópica, lo cual hace que su manejo sea lento y aburrido.

### **3. FOTOGRAMETRÍA CONVERGENTE E INCLINADA**

---

El cálculo fotogramétrico de objeto cercano con tomas convergentes puede hacerse con el empleo de distintos programas: *Pictran*, *Photomodeler*, *Close-Range Digital Workstation (CDW)*, ... En nuestro caso, hemos empleado el programa *CDW*, el cual tiene la particularidad que al menos son necesarias tres fotografías convergentes «con recubrimiento» del objeto (Sanjosé, 2003).

El ‘método general de la fotogrametría’ seguido por el programa *CDW* para aplicar la técnica fotogramétrica de objeto cercano es (Sanjosé, 2002):

1. Para la orientación interna se procede a la medición de las denominadas ‘cruces *reseau*’, las cuales forman una malla de 121 cruces, distribuidas por toda la imagen.
2. Identificación y medida de las coordenadas *imagen* y *objeto* de los mismos puntos en todos los fotogramas, estos puntos se denominan ‘homólogos’.
3. Después de orientar las fotografías se procede a la restitución de los puntos más significativos.

La precisión del producto fotogramétrico de *objeto cercano* está condicionada por el número de fotogramas, la posición (convergencia) de los fotogramas en el espacio y el número de puntos de apoyo.

### **4. LA RECTIFICACIÓN FOTOGRAMÉTRICA**

---

La rectificación fotogramétrica hay que aplicarla a elementos planos, como fachadas, paredes, cuadros,... Para ello, se considera que el objeto tiene en toda su superficie la misma coordenada *Z* o profundidad. Se considera el eje *Z* como el eje perpendicular al plano de la fachada.

Las ecuaciones que resuelven el método de la rectificación es la transformación bidimensional proyectiva. Inicialmente, cuando se hace la fotografía, el eje óptico de la



cámara no es perpendicular al plano de la fachada, esto es la fotografía está inclinada. Mediante el doble juego de coordenadas planas (fotografía, objeto) es posible aplicar esta transformación, donde el resultado final es una fotografía, en la cual el eje óptico es perpendicular al plano del objeto.

Las expresiones de la transformación bidimensional proyectiva son:

$$X = \frac{a_1 x + b_1 y + c_1}{a_3 x + b_3 y + l}$$

$$Y = \frac{a_2 x + b_2 y + c_2}{a_3 x + b_3 y + l}$$

Para aplicar estas fórmulas deben conocerse, al menos las coordenadas de cuatro puntos de apoyo. Con el doble juego de coordenadas  $(x,y)$ ,  $(X,Y)$  de estos cuatro puntos pueden calcularse los ocho parámetros de transformación  $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2)$ . Una vez calculados estos parámetros, se pueden obtener las coordenadas sobre el sistema de referencia del resto de los puntos medidos sobre el sistema fotográfico.

Como ya se ha expresado anteriormente, estas ecuaciones suponen que la coordenada  $Z$  del sistema de referencia es conocida y constante al estar situados los puntos sobre un mismo plano. En el caso de considerar puntos que no estén contenidos en dicho plano, los valores de las coordenadas planimétricas del objeto  $(X,Y)$  que se obtengan, tendrán un error proporcional al error de la  $Z$  considerada.

Aunque cualquier programa de edición de imagen nos permitiría hacer una transformación de las líneas de la imagen, los resultados devueltos no son científicamente correctos, ya que la referencia es puramente visual. Existen diversos programas fotogramétricos específicos que realizan este proceso de rectificación, entre ellos es posible destacar: *Photomodeler*, *Photopol*, *Asrix*,...

En este caso, utilizaremos *Asrix (Digital Image Rectifier)* (1) como herramienta de rectificación. Este *software* toma como datos de entrada la imagen a rectificar y las *coordenadas terreno* de al menos cuatro puntos reales del objeto bidimensional. Como datos de salida, el programa nos dará la imagen rectificada, en donde se pueden hacer medidas con valores métricos (Karras, 2001).

## 5. RESULTADOS

---

Tanto en el caso de utilizar *fotogrametría normal* como *convergente e inclinada* el objetivo es producir cartografía tridimensional, y ello se obtiene mediante la fase de la restitución fotogramétrica, con la cual se determinan las coordenadas terreno de todos aquellos puntos que definen el objeto.

Al igual que sucede en cualquier otro tipo de documento cartográfico, en un levantamiento arquitectónico de detalle resulta de vital importancia el conocer la exactitud posicional del mismo para poder realizar *a posteriori* una correcta toma de decisiones sobre las actuaciones a ejecutar en base a dicha cartografía. Tal es el caso de emplear el levantamiento arquitectónico para posteriores trabajos de restauración. Si el grupo de expertos desconoce la exactitud posicional real del levantamiento, las decisiones que adopten podrán estar basadas en concepciones erróneas.

Se exponen distintas actuaciones (fotogrametría de tomas normales) que se han realizado en zona histórica de Cáceres (**Figura 3** y **4**). Para conocer la exactitud posicional de la cartografía, se han tomado al menos 20 puntos de apoyo homogéneamente distribuidos sobre el monumento; de esta manera se han utilizado una gran cantidad de ellos para el proceso de orientación absoluta y se ha comprobado el ajuste con el resto de los puntos. El resultado del ajuste siempre ha estado por debajo de los 3 cm.

Por otra parte, la aplicación de la rectificación es muy sencilla y son diversos los trabajos llevados a cabo con esta técnica. A continuación, se muestra un ejemplo sobre un lienzo (**Figura 5.a.**). Para ello es importante una buena toma de datos de campo porque cualquier error puede provocar distorsiones no reales, y las medidas de la fotografía rectificadas no serán fiables. Una vez obtenida una buena rectificación mediante el proceso mencionado, y dando escala al modelo, podemos hacer mediciones (cálculo de superficies, distancias,...) con errores lineales inferiores a los 2 milímetros (**Figura 5.b.**). Además, al tener la fotografía original rectificadas de la obra, nos ayuda en cualquier proceso en que se vea involucrada, como una restauración, donde podemos procesar no solo las medidas de la estructura icónica, sino también de los deterioros físicamente observables, según sea la resolución de la imagen de toma, con conocimiento detallado del estado de situación.

## 6. CONCLUSIONES

---

La fotogrametría en general, y en sus versiones de *caso normal* y *caso convergente e inclinado* es un método rápido y eficaz de análisis de estructuras tridimensionales (edificios, monumentos, estatuas,...). Las condiciones geométricas de las fotografías de las *tomas convergentes e inclinadas* no son tan restrictivas como las impuestas en la fotogrametría con *tomas normales*, pero el desarrollo del proceso de restitución es lento, puesto que no tiene visión estereoscópica.

Los productos cartográficos obtenidos empleando la técnica fotogramétrica son más variados que los producidos por otros medios como son los geodésicos y topográficos, los cuales recogen una cantidad de puntos limitados al tiempo de recogida de información en el terreno.

Si el objeto que se quiere analizar es plano puede aplicarse la técnica de la rectificación, con resultados gráficos de precisión.

Conociendo el valor de la exactitud posicional de la cartografía, la toma de decisiones se realizará sobre un documento gráfico de calidad contrastada y adecuada al posterior trabajo que se desea realizar sobre el objeto, por ejemplo, su restauración.

Este tipo de investigaciones tiene gran interés sobre el Patrimonio ya que nos permite obtener documentación que nos sirve para reproducir el objeto con un margen de error mínimo. También puede ser útil para localizar y estudiar deterioros y alteraciones durante un proceso de restauración, como pérdidas de volumen, o para contrastar antes y después de cualquier proceso. Se amplía la eficacia si se hacen varias restituciones mediante su monitorización, observando las modificaciones que se producen.

## NOTAS

(1) Descargas desde <http://nickerson.icomos.org/>

## FIGURAS

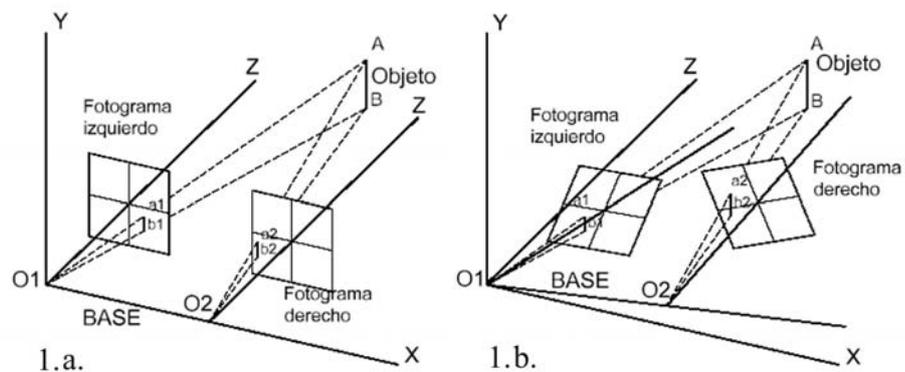


Fig.1: Geometría de las tomas fotográficas terrestres. a. Tomas normales. b. Tomas convergentes o inclinadas

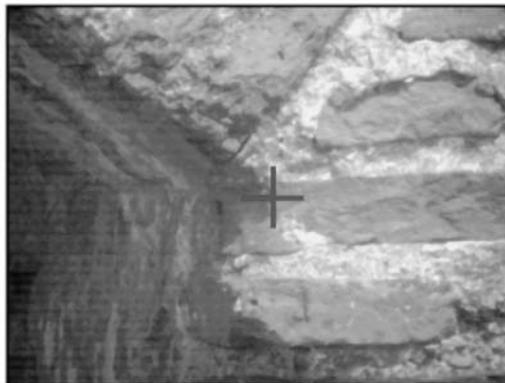


Fig.2: Punto de apoyo mostrado en la pantalla de la estación

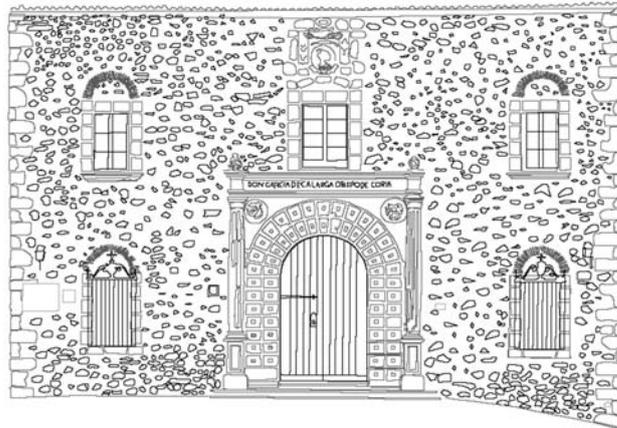


Fig.3: Cartografía del Palacio Episcopal

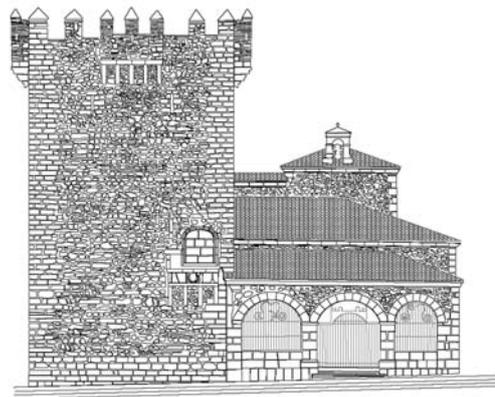


Fig.4: Cartografía de la Torre Bujaco



Fig.5: Descanso en la huida a Egipto. Cuadro atribuido a Juan de Sevilla (s.XVII). Convento de Santa Paula, Sevilla. a. Fotografía original. b. Resultado de la rectificación



## BIBLIOGRAFÍA

---

DOMINGO, L., *Apuntes de Fotogrametría*, Escuela de Ingeniería técnica en Topografía, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1985.

GRUBER, M.; LEBERL F., *High quality photogrammetric scanning for mapping*, Journal for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 55. 2000.

KARARA, H.M., *Non topographic photogrammetry*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Virginia, 1980.

KARRAS, G.E. *et al.* «Simple calibration techniques for non-metric cameras», *CIPA International Symposium*, Potsdam, 9/2001, p. 39-46.

MATTEINI, M., *Ciencia y restauración*, Ed. Nerea, Junta de Andalucía, Sevilla, 2001.

SANJOSÉ, J.J., *Apuntes de Fotogrametría analítica*, Escuela Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura. Cáceres, 2002.

SANJOSÉ, J.J. *Estimación de la dinámica de los glaciares rocosos mediante modelización ambiental y técnicas fotogramétricas automáticas*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. [Tesis doctoral]

WOLF, P. *Elements of photogrammetry: UIT air photo Interpretation and Remote Sensing*. Mac Graw-Hill, Auckland (Australia), 1974.

ICOMOS. Cipa 2001 International Symposium, <http://www.cipa.icomos.org/>, 20/2/2007.

ICOMOS. Nickerson Associates Designed Building Systems Ltd., <http://www.nickerson.icomos.org/>, 19/2/2007.

## CURRÍCULUM VITAE

---

### **Guadalupe Durán**

Lic. en Bellas Artes (Conservación y restauración). Directora del Aula de fotografía de la Uex en Cáceres.

### **Javier de Matías**

Ing. en Informática. Becario FPI en el departamento de Sistemas informáticos y telemáticos de la Uex.

### **José Juan de Sanjosé**

Doctor en Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Prof. en el dpto. de Expresión Gráfica de la Uex.