

# SOBRE EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA MULTIMAGEN

ALONSO RODRÍGUEZ, Miguel Ángel  
CALVO LÓPEZ, José

Universidad Politécnica de Madrid  
Universidad Politécnica de Cartagena

The appearance of new technologies for architectural survey has brought along dramatic transformations. Among the new measuring techniques, the most remarkable is 3D laser scanning, which furnishes clouds of millions of points in a few minutes. At the same time and on a much more discreet way, a new photogrammetrical technique using several pictures has been developed. It uses a set of convergent photographs without using a stereoscopic system, just identifying pairs of points in a number of pictures, using just a camera, as simple or complex as wanted, by contrast with the encumbrance of laser scanners and total stations.

With this system it is possible for an architect to take a set of pictures of a building of his or her interest, fulfilling minimum requirements, that will furnish the necessary information to perform a measured survey of the building

Our paper analyzes this technique, its foundations and its accuracy. We shall deal with its distinctive features, its advantages and disadvantages, and compare it with other techniques. We shall also deal its past and future developments and its application, which is now unquestionable. We shall also present different kinds of surveys, carried on both with academic and professional purposes, hoping to reach a number of conclusions about the use of convergent photogrammetry for architectural survey representation.

Los orígenes de la fotogrametría se sitúan a mediados del siglo XIX: Sus fundamentos los estableció Aimé Laussedat y han quedado explicados con gran

claridad en la lámina que ilustra el levantamiento que realizó del fuerte de Vincennes en 1850. El procedimiento seguía conceptualmente los principios de la plancheta, técnica empleada en aquellos días para la producción cartográfica y mediante la cual se intersecaban puntos del terreno desde dos o más estaciones, para así determinar sus coordenadas (Blachut 1987). Laussedat establecía las direcciones, no en campo sino en gabinete, a partir de las proyecciones cónicas obtenidas en cada estación mediante el empleo, inicialmente, de una cámara clara (Kemp 1990), y a partir de 1861 usando la cámara fotográfica que diseñó, equipada con brújula, nivel y ocular para conocer la dirección principal de la toma. Debido a que el procedimiento es esencialmente gráfico y que sigue conceptualmente los principios de la plancheta se ha empleado el término fotogrametría gráfica, y también tipo plancheta, para referirse a esta solución fotogramétrica que se desarrolló y empleó a lo largo de la segunda mitad del XIX. Pero requiere de la identificación independiente en cada imagen de los puntos a levantar, lo que resulta sencillo en algunas aplicaciones como es la arquitectura pero, en cambio, para la realización de mapas topográficos la identificación de puntos menos reconocibles resulta más complicado (Gentil 1989).

Los orígenes de la visión estereoscópica algunos los remontan a Euclides pero fue con el desarrollo de la fotografía cuando los estereoscopos se popularizaron, llegando a ser objeto de juego y atracción de feria. A principios del siglo XX, en 1901, aparece un novedoso instrumento, el estereocompa-

rador de Pulfrich, un científico colaborador de la casa Zeiss, que combina la observación estereoscópica y una marca de medición flotante que permite la determinación precisa de las coordenadas de cualquier punto del modelo observado. Este instrumento, y su aplicación al levantamiento topográfico, con indudables fines militares, inaugura el desarrollo espectacular de la fotogrametría que se produce a lo largo de todo el siglo XX y cuyos hitos fundamentales podemos identificar con los restituidores analógicos, analíticos, de sobre mesa o pequeño formato y los sistemas digitales actuales. Es correcto afirmar que el siglo XIX fue el de la fotogrametría gráfica y el siglo XX ha sido el de estereoscópica.

A finales del siglo pasado resurgió el sistema de la fotogrametría gráfica en versión informatizada basado, no en la formación de un modelo visua, sino en la identificación monoscópica de puntos homólogos, como hacía Laussedat, que en las primeras versiones se realizaba mediante fotos de emulsión química sobre tableta digitalizadora; y en la actualidad emplean fotos digitales vistas en la pantalla del ordenador. Dos son las características principales de este sistema fotogramétrico, la identificación monoscópica de los puntos y el uso de fotos convergentes. Algunos autores designan este nuevo sistema fotogramétrico con el término fotogrametría infográfica, por su paralelismo con la fotogrametría gráfica, y en cambio otros prefieren el de fotogrametría convergente o de fotos cruzadas u oblicuas, por oposición a las imágenes de la fotogrametría estereoscópica.

Las imágenes que se emplean son fotos tomadas con cámaras digitales convencionales, que hayan sido calibradas para conocer la orientación interna y las deformaciones que el objetivo introduce en la teórica proyección cónica de la imagen fotográfica. Esta calibración es ahora muy sencilla y alejada de los complejos sistemas empleados en el pasado, realizados en laboratorio por técnicos especialistas (Alonso 2000). Se lleva a cabo mediante un sencillo programa de ordenador, y consiste en tomar una serie de fotos de un determinado patrón geométrico plano, normalmente basado en una cuadrícula de blancos y negros, e identificar sobre las mismas sus vértices, de manera que el programa compara la posición real en la imagen con la que teóricamente deberían de tener, que él conoce y tiene almacenada en memoria, y con estos datos calcula la ecuación de distorsión radial con dos o tres parámetros y la orientación interna. Pero en un objetivo convencional la focal varía en función de la distancia de enfoque, y puesto que en la mayoría de las cámaras solo la podemos fijar en sus extremos será en estas posicio-

nes donde se calibre la cámara. Así pues, es habitual calibrar los objetivos para la posición de máxima y mínima distancia focal, o lo que es lo mismo en la posición de tele y gran angular.

Este sistema fotogramétrico al emplear fotos convergentes introduce importantes novedades y ventajas en la práctica del levantamiento fotogramétrico de la arquitectura y elimina alguna de las limitaciones que hasta entonces la fotogrametría había encontrado en este ámbito. Es sabido que la exigencia de emplear pares estereoscópicos en la fotogrametría tradicional ha supuesto importantes limitaciones, y quien se haya acercado a esta fórmula de levantamiento arquitectónico con seguridad se habrá encontrado, en mas casos de los deseados, con la imposibilidad material de obtener pares de una determinada fachada o portada, y entre los del ramo era frecuente recordar lo difícil que ha sido trabajar en alguno conjuntos urbanos, siendo habitual citar como ejemplo Toledo, donde la estrechez de sus calles materialmente imposibilita en muchos casos la obtención de pares estereoscópicos con una lógica razonable. Empleando fotos cruzadas esta limitación desaparece y hace al sistema versátil, nada rígido, sin más limitaciones que las de la propia fotografía, y por tanto capaz de adaptarse con facilidad a las particulares condiciones de un modelo arquitectónico. No resulta equivocado decir que lo que podemos fotografiar lo podemos medir o, con mas precisión, si lo podemos fotografiar doblemente, de manera que aparezcan al menos en dos fotografías, lo podemos medir.

Mediante fotos cruzadas trataremos de registrar el modelo fotográficamente en su totalidad, evitando las sombras, las ocultaciones que se producen en los edificios. Habitualmente llamamos sombras a lo que son ocultaciones, zonas ocultas a la visión debido a la existencia de un obstáculo y que impiden o dificultan ver el objeto en su totalidad.

Una vez realizadas estratégicamente las fotos, empleando la distancia focal para la cual ha sido calibrado el objetivo, se orientarán dos a dos unas con otras y todas entre sí, para lo cual bastara con identificar un cierto numero de puntos comunes, que se alejen de definir un plano, y el programa realiza las orientaciones automáticamente mediante ajuste por mínimos cuadrados de manera que al final de este proceso se obtiene un bloque único con todas las fotos orientadas. La mayoría de los programas comienzan orientando dos fotografías, identificando al menos cinco puntos comunes, los mínimos necesarios para resolver el sistema, pero es habitual em-

plear más para poder realizar un ajuste de haces y conocer la precisión con la que están realizadas las orientaciones, lo que es fundamental para la precisión de los resultados.

Con dos fotos orientadas habremos obtenido las coordenadas de los puntos empleados y para obtener las de otros puntos procederemos de manera similar. Algunos programas con los nuevos puntos recalculan las orientaciones y otros no, existiendo además situaciones intermedias en las que se incorporan puntos al cálculo de las orientaciones según se desee. Una vez orientadas dos fotografías la identificación de puntos homólogos se ve auxiliada por los rayos epipolares, que son las intersecciones con los planos de las imágenes del plano definido por los centros de proyección y las parejas de puntos homólogos, de manera que identificado un punto en una imagen sobre la otra aparecerá dibujado el rayo epipolar correspondiente sobre el cual deberá estar situado el homólogo del punto dado. Los rayos epipolares ayudan a situar el homólogo de un punto dado, orientan del error que estamos cometiendo por su proximidad a la posición del punto, y sobre todo ayudan a no cometer errores de identificación, que son mas frecuentes de lo previsto.

El error cometido en la determinación del punto de intersección de dos rectas que se cortan depende del ángulo que forman y es mayor cuanto menor es el ángulo, y disminuye según se acerca al ángulo recto. Algo similar ocurre con las rectas que se cruzan, de manera que si son los rayos homólogos de un sistema fotogramétrico el caso más desfavorable se produce cuando las fotos son paralelas, disminuyendo el error con fotos cruzadas. Así pues el sistema fotogramétrico de imágenes cruzadas, genéricamente, es más preciso que el de fotos paralelas. Esta importante objeción al sistema geométrico que plantea la fotogrametría estereoscópica no tiene solución, pues radica en la base misma del sistema ya que para tener visión estereoscópica las imágenes deben ser similares a las que se producen en la retina y por tanto sensiblemente paralelas (Almagro 2004; Buill 2007).

La relación inversa también se establece en términos similares, de manera que en la orientación de fotos paralelas, genéricamente los errores son mayores que en las cruzadas. Se emplea entonces el término de robustez y se dice que el sistema geométrico de la fotogrametría de fotos cruzadas es más robusto que el de la estereoscópica. Y es precisamente esa geometría robusta de las fotos cruzadas la que se debe buscar en las tomas fotográficas.

Una vez orientadas dos imágenes daremos coordenadas a los puntos que nos interesen y cuando hayamos terminado orientaremos una tercera fotografía para dar coordenadas a nuevos puntos o a alguno de los anteriores ya que podrá haber puntos que aparezcan en las tres imágenes. Resultará entonces que habrá puntos definidos a partir del cruce de tres rayos y por tanto con más precisión que si en su definición tan solo hubiesen intervenido dos, lo que se puede generalizar para el caso de más imágenes. Luego este nuevo sistema fotogramétrico, al emplear fotos cruzadas, permite rodear el objeto y abarcarlo en su totalidad con gran facilidad y a la vez definir los puntos a partir de mas datos y, por tanto, con mas precisión aparte de la ventaja, ya comentada, que supone emplear fotos cruzadas en relación con el ángulo de cruce de los rayos homólogos.

La precisión que se alcanza la podemos contrastar con facilidad, basta con emplearlo para medir un edificio cuya geometría se conoce o es fácil suponer. Resulta muy adecuado, con este objetivo, medir un muro cortina, que lo habitual es que sea plano y esté fuertemente modulado y que, dada la diversidad de formas, tamaños y ubicaciones que podemos encontrar, es posible realizar a partir de fotos sacadas a mayor o menor distancia y obtener puntos que estén mas próximos o mas alejados, que son variables fundamentales en relación con la precisión y lo haremos según un procedimiento que se ajusta a las condiciones habituales en que se emplea en la práctica del levantamiento arquitectónico. Finalmente analizaremos la proximidad del resultado a aquella geometría que sin mucho error podemos atribuir al muro cortina y hemos podido comprobar que supera la que requiere habitualmente un levantamiento arquitectónico.

El resultado de la medición efectuada mediante este sistema fotogramétrico es una nube de puntos que podemos exportar a los programas habituales de dibujo. Esta colección de puntos en principio no tiene ni orientación ni escala y para dárselos, tratándose de un objeto arquitectónico, lo más fácil es identificar una arista vertical y conocer una medida que se toma en el momento de hacer las fotos. Estas operaciones de orientar y escalar el modelo son órdenes que encontramos en los programas correspondientes de fotogrametría pero que también podemos realizar una vez exportado a un programa de dibujo, y lo mismo podemos decir si lo que se quiere es medir una distancia.

Las características indicadas son propiedades y ventajas de este sistema fotogramétrico pero lo que

no permite es posarse en una superficie y desplazarse sobre ella a la vez que la define. Una superficie sin puntos reconocibles no es abordable por este sistema pero, como ya se ha señalado, en arquitectura no es lo habitual y por tanto no implica una limitación significativa en el ámbito del levantamiento arquitectónico.

Cuando aparecieron los primeros programas de fotogrametría oblicua era frecuente comparar la calidad y definición de una fotografía digital y una de película con clara ventaja para esta con las inmediatas repercusiones que esto supone en su aplicación al levantamiento, pues si una fotografía tiene mas definición que la otra con una podemos determinar mejor el modelo que con la otra. Se decía que el grano de

la película química era notablemente menor que la célula del sensor de imagen, pero el desarrollo de la fotogrametría digital ha sido exponencial, y continua creciendo, de manera que en la actualidad estos valores ya se han equiparado.

La gran ventaja de la fotogrametría convergente es que pone a disposición del que lo requiera un sistema para medir a partir de unas fotografías, que es preciso y fácil de emplear, como hasta ahora no había existido ninguno. El uso de la fotogrametría estereoscópica en el levantamiento de la arquitectura ha sido excepcional y muy limitadas y singulares las ocasiones en que se ha empleado. La fotogrametría estereoscópica, la arquitectónica, ha estado rodeada de un halo de misterio, y a la vez de fascinación y

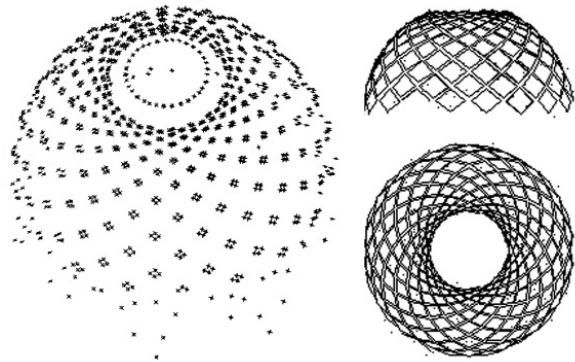


Fig. 1. Medición de la cúpula de la capilla del castillo de Anet.

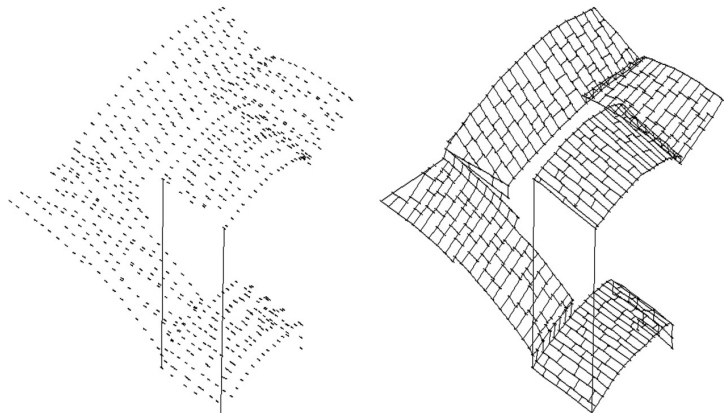


Fig. 2. Medición de la escalera del claustro de la catedral de Toledo

prestigio pero a la que ha sido difícil aproximarse. La complejidad de todo el sistema estereoscópico, desde la misma toma de las fotografías hasta su explotación en el restituidor, cuyo manejo requiere de un aprendizaje y además un periodo de adiestramiento y capacitación para moverse con agilidad y precisión en el modelo estereoscópico, ha dificultado ese acercamiento. La fotogrametría oblicua rompe estas barreras.

Este sistema fotogramétrico es fácil de usar y no precisa de un aprendizaje especial, tan solo de unas breves nociones de fotogrametría y aprender a manejar el programa informático correspondiente. Por otra parte todo el instrumental que requiere es una cámara fotográfica y un ordenador. Algunos progra-

mas ofrecen además otras opciones como facetar las nube de puntos y texturizarlas lo que añade valor a lo fundamental, que es dar coordenadas, medir las coordenadas, de unos puntos elegidos. Por todas estas razones los alumnos de las asignaturas relacionadas con el levantamiento arquitectónico lo utilizan sin dificultad y gran éxito.

Para estudiar piezas de cantería, una de las líneas de investigación en la que trabajan los autores de esta comunicación (Alonso 2002a; Alonso 2002b; Calvo et al. 2005; Calvo 2007, entre otros) la fotogrametría multimagen resulta ser una herramienta muy eficiente, pues permite determinar con facilidad las juntas entre sillares y de esta manera conocer su forma y despiece.



Fig. 3. Medición de la iglesia de San Bernabé de El Escorial

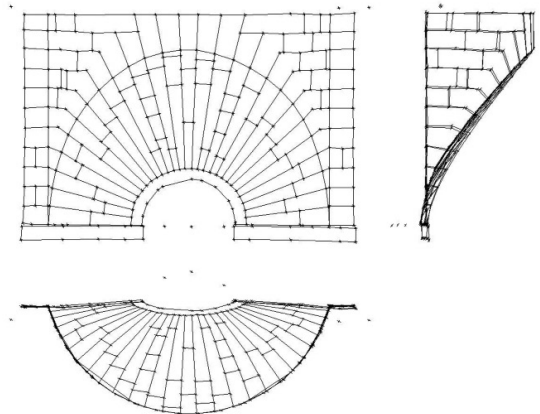
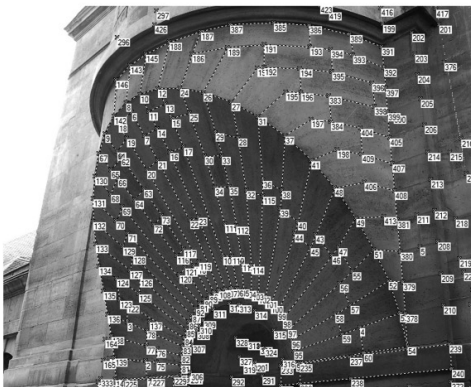
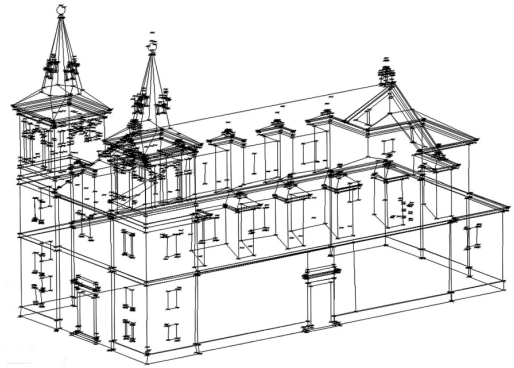


Fig. 4. Medición de la trompa de la iglesia de San Sulpicio de París

la bóveda de la Capilla de la Natividad de la catedral de Burgos, una cúpula de planta oval, se midió la bóveda por fotogrametría, lo que indicó que las juntas entre hiladas no eran horizontales sino que ordenadamente se elevaban según se aproximaban al extremo del eje mayor. Sorprendidos por este resultado, el equipo de investigación repitió la toma de datos mediante estación total, comprobando que la medición inicial por fotogrametría multimagén había sido correcta (Alonso et al. 2007).

Frente a otros medios de levantamiento, la fotogrametría multimagén ofrece no sólo un ahorro de tiempo y costes de transporte considerable, sino también la posibilidad de realizar tomas de datos durante desplazamientos ocasionales, ya en El Escorial, en París o en Libia, y en puntos a los que no resulta posible transportar una estación total y mucho menos un escáner láser (Alonso 2002b). Basta con llevar una cámara de fotos estándar, de preferencia una digital réflex, y tomar una serie de imágenes que permitan medir un elemento constructivo, siempre que su morfología permita definirlo con puntos; tomando una medida de longitud, que se puede obtener con un simple distanciómetro, se puede determinar la escala de la pieza. A continuación presentamos por medio de imágenes varios levantamientos realizados por medio de esta sencilla metodología.

#### Referencias:

Almagro Gorbea, A 2004, Levantamiento arquitectónico, Granada, Universidad de Granada.

Alonso Rodríguez, MA 2000, 'Sobre la transformación lineal directa y un procedimiento de 'calibración' de las cámaras no métricas', Actas del VIII Congreso EGA 2000, Barcelona.

Alonso Rodríguez, MA 2002a, 'Sobre las cúpulas de las torres de la basílica del Escorial', El Monasterio del Escorial y la arquitectura, El Escorial, pp. 487-500.

Alonso Rodríguez, MA, López Mozo, A, Farjas Abadía, M & Ayora Baena, F 2002b, Levantamiento de la cúpula de la Basílica del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial.... Topografía y Cartografía, no. 19, pp. 19-33.

Alonso Rodríguez, MA, López Mozo, A, Palacios Gonzalo, Jc, Rabasa Díaz, E, Calvo López, J & Sanjurjo Álvarez, A 2009, 'Functionalism and caprice in stonecutting. The case of the Nativity Chapel in Burgos Cathedral', Proceedings of the Third International Congress on Construction History, pp. 31-38.

Blachut, TJ & Burkhardt, R 1987, Desarrollo histórico de los equipos y métodos fotogramétricos, Mexico, Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Buill, F 2007, Fotogrametría Arquitectonica, Barcelona, UPC.

Calvo López, J 2007, 'Piezas singulares de cantería en ...Cartagena en el siglo XVIII', Actas del VI Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, pp. 167-176.

Calvo López, J, Alonso Rodríguez, MA, Rabasa Díaz, E & López Mozo, A 2005, Cantería renacentista en la catedral de Murcia, Murcia, Colegio de Arquitectos.

Gentil Baldrich, JM 1989, Método y aplicación de representación acotada y del terreno, Sevilla, Universidad.

Kemp, M 1990, The science of Art, New Haven, Yale University Press