



139. RED DE ALTA PRECISIÓN, LÁSER ESCÁNER Y FOTOGRAMETRÍA, COMBINADOS PARA GENERAR EL MODELADO 3D DE ALTA RESOLUCIÓN E INFORMACIÓN DERIVADA, APLICADOS A LA SAGRADA FAMILIA DE BARCELONA.

AUTORES:
JUAN CORSO, JAVIER MUÑOZ, PILAR GARCIA-ALMIRALL,
CARLES GRACIA, JORDI CASALS, JORDI MARTÍNEZ.

RESUMEN:

Por necesidades de mantenimiento, conservación y restauración, se ha solicitado por parte del Patronato de la Sagrada Familia el estudio de la metodología y desarrollo que permita llevar a cabo el modelado tridimensional íntegro de la parte original del templo (fachada del Nacimiento, torres y capillas adyacentes), y documentos métricos, entre los que han de destacar los planos, el ortomosaico digital de los diferentes planos, y el modelo de superficie completo de alta resolución. La singularidad de esta fachada es que se trata de un elemento irregular y con estancias en el interior, dado que su grosor medio es de 12 metros. Buena parte de la fachada es transitable a diferentes niveles y por el interior de las torres.

Para el trabajo se utilizan métodos topográficos de alta precisión que han de servir de base para generar la red de apoyo necesaria, teniendo en cuenta que han de colocarse bases por toda la fachada, dentro del templo, a diferentes cotas, y en posiciones con buena visibilidad. En la metodología se consideran métodos combinados de láser escáner y fotogrametría de alta resolución, que permiten generar nubes de puntos de precisiones equivalentes y complementarias. En zonas con limitaciones para el láser escáner se recurre a la fotogrametría y viceversa. El éxito del trabajo se debe a una buena coordinación y planificación de las distintas fases a ejecutar (tomas fotográficas, posiciones de láser escáner, distribución de bases y puntos de apoyo, etc.).

El trabajo se está llevando a cabo actualmente y se han obtenido los primeros resultados de forma totalmente satisfactoria y por encima de las mejores expectativas. Se han presentado nubes de puntos de una resolución de 2mm para esculturas y 5 mm para el conjunto arquitectónico mediante la tecnología de Escáner Láser Terrestre y ortofotos de 5mm por fotogrametría y modelo 3D.

ABSTRACT

For maintenance needs, conservation and restoration, it has been requested by the Board of the Sagrada Familia, the study of the methodology and development to carry out the full three-dimensional model of the original part of the temple (the façade of the Birth, and the adjacent towers and chapels) and metric documents, including those who have to emphasize the architectonics planes, the digital orthomosaic of the different planes, and a full high-resolution surface model. The uniqueness of this façade is that it is an about 12 meters thick irregular element with spaces inside, which can be walked across most its outside spaces and inside the towers at different levels.

High accuracy surveying methods are used for this project, which must be used as a basis to generate the necessary support network, considering that the topographic bases must be placed throughout all the façade, inside the temple, at different levels and in positions with good visibility. In the methodology they are considered combined methods of laser scanning and high resolution photogrammetry, which can generate equivalent and complementary point clouds. The areas that the laser scanner can't reach, photogrammetry is used, and vice versa. Job success is due to a good coordination and planning of the various phases to execute (photographic shots, Terrestrial Laser Scanning, topographic bases distribution and support points, etc.).

This project is currently being carried out and the first results have been obtained wholly satisfactory and above the



highest expectations. The results have been point clouds of 2mm resolution for the sculptures and 5mm resolution for the architectural set made with the Terrestrial Laser Scanning technology, 5mm orthophotos with fotogrametry and a 3D mesh.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto surge de la necesidad de la Junta Constructora de la Sagrada Familia de disponer de información precisa de la Fachada del Nacimiento del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, declarado monumento de la humanidad por la UNESCO (17 de Julio de 2005 en Durban, Unión Sudafricana), específicamente las partes que realizó Antonio Gaudí y sus sucesores inmediatos, se trata de la fachada del Nacimiento, el ábside y la cripta. El desarrollo de la metodología de levantamiento se realiza sobre la fachada nordeste del Templo, conocida como la fachada del Nacimiento y en este artículo se profundizará en una zona concreta, llamada la Coronación de la Virgen, siendo una zona interior, con un detalle escultórico y de vidrieras, la verticalidad y monumentalidad, que complementado con la riqueza arquitectónica de una zona intermedia en altura justo debajo del Árbol de la Vida, representa la complejidad que se tendrá al abordar toda la fachada.

El proyecto se realiza por el Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad (LMVC) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), impulsado por los departamentos de Tecnología de la Arquitectura (TA) y de Expresión Gráfica en la Arquitectura I (EGAI). Promovido por un Centro de investigación UPC, Centro de Política de Suelo y Valoraciones (CPSV). <http://www-cpsv.upc.es/LMVC/>, con el apoyo de los grupos de investigación AR & M - Arquitectura: Representación y Modelado (2014 SGR 792 GRC) y AIEM - Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, entre otros. El LMVC es un referente tecnológico de la ETSAB, Universidad Politécnica de Catalunya, con voluntad de cohesionar y consolidar estratégicamente líneas y proyectos de innovación tecnológica en el ámbito de la Arquitectura el urbanismo y la ciudad, con la aplicación de sistemas informáticos, las TIC en general (SIG, TSL + VR) encaminados a la georreferenciación, parametrización y visualización de elementos históricos, patrimoniales, arquitectónicos y urbanos.

La complejidad del proyecto ha exigido la incorporación de profesionales expertos en el campo de la fotogrametría y la topografía, también la colaboración y complicidad del equipo de la Junta Constructora de la Sagrada Familia, que desde los distintos departamentos, de proyecto, seguridad, gestión de obra, han velado por facilitar el acceso, la seguridad y la disponibilidad de medios para asegurar una alta calidad en el proceso de toma de datos. Todo ello ha permitido poner a prueba un ensayo metodológico que ha testeado la concurrencia y complementariedad de las tecnologías empleadas. Esta complejidad dificulta la captura de información, requiere técnicas y equipos especializados para su desarrollo, partiendo de la necesidad de documentar el edificio sin oclusiones, con requerimientos de precisión entre la topografía, la fotogrametría y el levantamiento con Escáner Láser Terrestre (TLS), que no exceda los 2cm en la totalidad la fachada, incluyendo interior del Templo y las torres, zonas de obra y pináculos.

Este artículo pretende dar a conocer la metodología llevada a cabo en lo que ha sido el trabajo de validación de la misma, metodología que una vez validada se está desarrollando para el levantamiento completo de la fachada por todos sus lados y conseguir un modelo virtual de la misma, entre otros productos, con una resolución de entre 2 y 5 mm.

METODOLOGÍA

El trabajo se puede dividir en tres grupos o fases, siendo estas: trabajos topográficos, toma de fotos y trabajos fotogramétricos, y trabajos de levantamiento con la tecnología de Escáner Láser Terrestre. Estas fases se desarrollan en paralelo, pero coordinadas entre sí, de forma que se consigue un modelo completo de máxima calidad y precisión validada con la red de puntos de apoyo y control.

Definición de la Red de Bases, Puntos de Apoyo y de Control de Calidad.

Los objetivos de los trabajos de topografía son definir el marco de referencia de todos los trabajos, disponer de una red de bases que cubra todas las zonas de trabajo y definir los puntos de apoyo para los trabajos de fotogrametría y escaneado y de control de calidad en todas las superficies del edificio, tanto exteriores como interiores.

Las zonas de trabajo de topografía son: Fachadas exteriores; 4 torres que alcanzan los 110 m de altura respecto a la calle. Fachada interior del templo; parte del conjunto de 4 torres que da al espacio interior de la nave del Templo. Interior de la torres; diferentes espacios que van desde una planta sótano hasta los 40 metros de altura. A partir de los 40 hasta



el final son los campanarios formados por un espacio núcleo central rodeado por escaleras helicoidales.

Este levantamiento tiene las siguientes condicionantes: Verticalidad. Gran altura del edificio respecto a la calle. Espacios interiores de las torres reducidos. Intercomunicación principal de los espacios en vertical. Los ángulos de observación desde la calle son muy pronunciados, especialmente en las fachadas laterales.

Debido a ello se opta por realizar una instalación en las fachadas, de anclajes metálicos donde se pueden acoplar prismas reflectores, dianas reflectantes aptas para fotogrametría o esferas de apoyo de los escáneres, con la característica de que en los tres casos se mantiene invariable la posición del punto definido. Instrumento con puntería automática a prismas ATR, para permitir trabajar ágilmente y con precisión con ángulos verticales muy pronunciados. Instrumento con cámaras de visualización y registro de imagen a través del objetivo, posibilitando la documentación inequívoca de los puntos observados y el trabajo con ángulos verticales ilimitados.

Definición de la Red de Bases

Para definir el marco de referencia de todos los trabajos a realizar en el proyecto se establece una red de bases que permita establecer la máxima precisión y homogeneidad a todos los trabajos de levantamiento que se irán sucediendo. Esta red se subdivide en tres zonas previstas de implantación, que son la Red Exterior, la Red Interior y la Red de las Torres. No obstante, debido al desarrollo temporal de los trabajos, ha sido posible realizar el cálculo de la Red Exterior y la Red Interior en un solo ajuste combinado que hemos denominado Red Principal. Esto redundará en una mejor calidad de los cálculos de las observaciones y una mejora en la homogeneidad de la calidad de la red. De momento sólo se han desarrollado la Red Exterior y la Interior, quedando por definir la de las Torres.

Red Exterior del Templo

La Red Exterior debe dar soporte a todos los trabajos a desarrollar en las fachadas exteriores y, además, servir de apoyo a las Redes Interior y de las Torres. Por ello requiere que abarque una zona relativamente extensa en la Plaza Gaudí, una mayor densidad en la proximidad a las fachadas frontal, en calle Marina, y laterales, en calle Provença y Mallorca, y que llegue hasta la Plaza Sagrada Familia para obtener un sistema homogéneo para todo el Templo.

Esta Red es la que debe materializar el marco de referencia de todos los trabajos de levantamiento a realizar y debe ser coherente con el sistema de coordenadas que ya hay implantado en el Templo, con el que se está utilizando en la ejecución de obra. La red exterior ha quedado compuesta por un total de 20 bases.

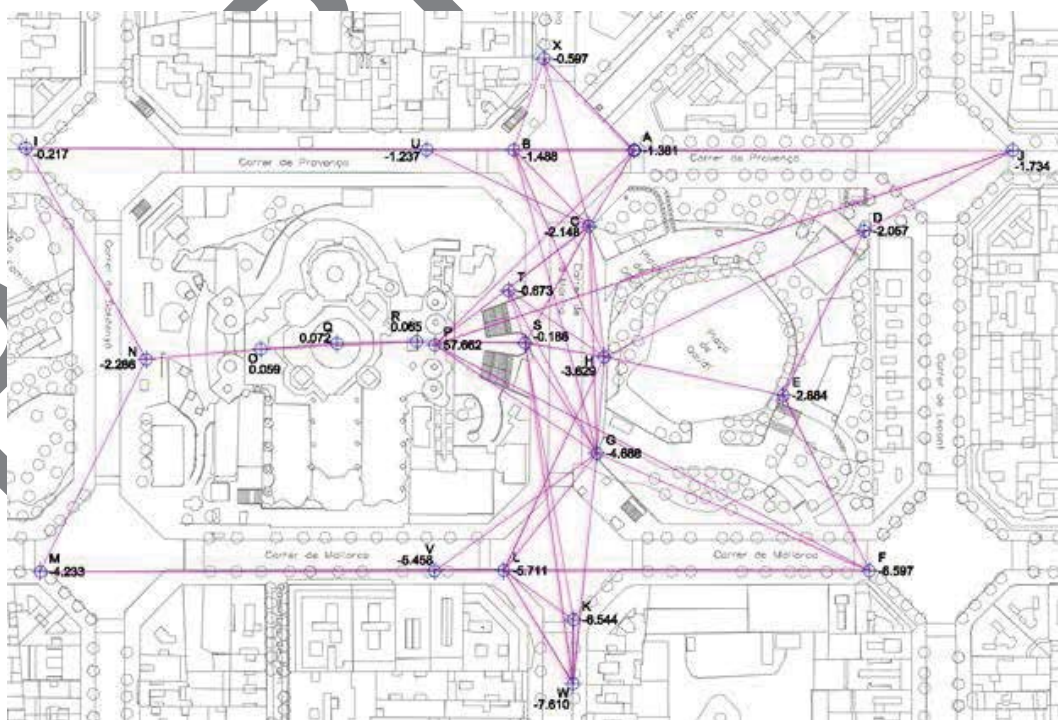


Ilustración 1. El gráfico de su distribución, incluyendo las bases interiores de nivel cota 0

Red Interior del Templo

La Red Interior debe dar soporte a los trabajos a desarrollar en la fachada interior del Templo y apoyar los trabajos a realizar en las zonas interiores de las torres, en los espacios que van de cota cero hasta la +30m aproximadamente, que son más accesibles para su enlace con las bases topográficas de la Red Principal desde el interior del Templo. La forman tres bases en la nave, que se corresponden con puntos singulares del pavimento, para evitar colocar clavos. Enlazan con la Red Exterior por las dos puertas del transepto y con las bases colocadas en el nivel +20m. Desde nivel +20m se enlaza con la red exterior en la calle Marina a través de las ventanas de las torres (ilustración 2).

Para las lecturas a las bases se han utilizado prismas de auscultación de alta precisión, estacionados sobre trípodes con bases nivelantes y plomadas ópticas o jalón aplomador con la ayuda de trípode auxiliar. En este último caso, el jalón se ha estacionado en cada lectura aplicando semi-rotaciones para minimizar el error de estacionamiento del prisma. Las precisiones nominales del instrumento son de 3 segundos sexagesimales para los ángulos y de 2 mm + 2 ppm para las distancias.

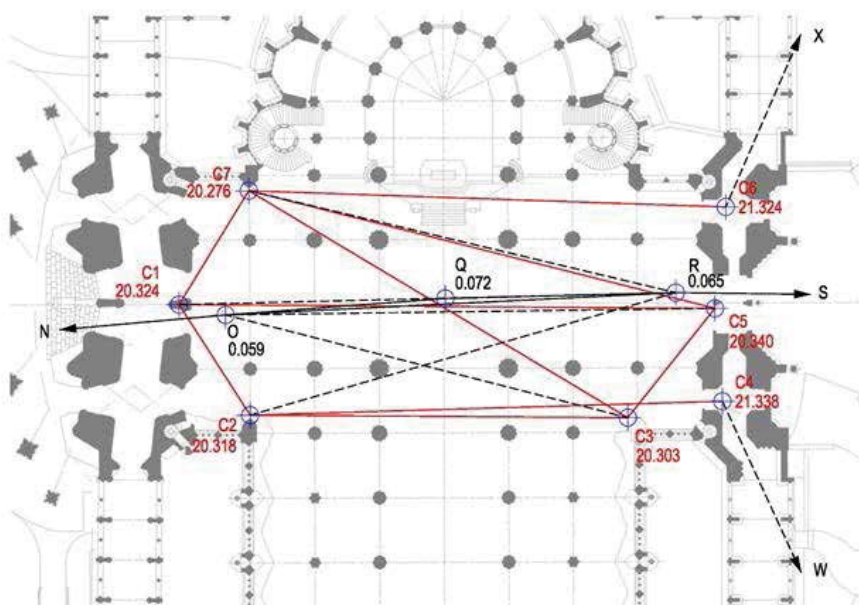


Ilustración 2. El gráfico de su ubicación. En color rojo las bases del nivel de cota +20m (Cantoría) y las observaciones de enlace entre ellas. En color negro las bases interiores de nivel de cota 0m y en negro a trazos, las observaciones de enlace entre los dos niveles.

Metodología de observación

Para las observaciones angulares se han realizado un mínimo de tres series, utilizando regla de Bessel en todas ellas. Para la determinación de las distancias, se han realizado un mínimo de seis lecturas.

Para los estacionamientos de los prismas reflectores en las diferentes bases a observar se han utilizado trípodes con plomada óptica, mini jalón con bípode de estacionamiento o jalón con trípode aplomador, según los requerimientos de cada punto.

Enlace con el sistema de coordenadas del Templo

El sistema de referencia planimétrico es local, establecido con origen en el centro del crucero y cuadrícula orientada según el eje de la nave, empleado de forma habitual en el control métrico de la Sagrada Familia. Se consideran las ordenadas positivas hacia el ábside, y las abscisas positivas hacia la fachada del Nacimiento. Las cotas altimétricas se refieren a la nave con origen en el centro del crucero.

Cálculo de la Red

El cálculo de la red se ha realizado con el programa de ajuste Magnet de Topcon. Las desviaciones estándar de las coordenadas obtenidas son del orden de 1-2 mm, con un extremo máximo de 2 mm en componente X e Y planimétricas



y 3 mm en altimetría. El total de bases ajustadas es de 31, con un total de 175 de observaciones de distancia, 175 de observaciones de desniveles y 137 relaciones de ángulo horizontal.

TOMA DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE POSICIONES TLS

El objetivo de los trabajos TLS es la realización de un único modelo de toda la Fachada del Nacimiento, con sus interiores y conjuntos escultóricos, y una cobertura superior al 90%.

Toma de datos

La toma de datos TLS debe considerar no solo la zona de estudio de la Coronación de la Virgen, ya que la unión entre posiciones se prolongará a toda la fachada, el interior del Templo y de las torres, por lo cual un error en la georreferenciación respecto a la topografía en esta zona, podría trasladarse aumentado a zonas más lejanas, como los pináculos, perdiendo el nivel de calidad exigido. Por ello, y aunque se cumplen los requerimientos técnicos para dicha zona, se ha desarrollado una unión general de toda la fachada, para reposicionar la zona estudiada en el centro de la fachada, sin superar en ningún punto de control un error de distancia lineal de 2cm. La unión de este modelo general abarca unas 400 posiciones, de las 3000 posiciones realizadas hasta la publicación de este artículo, a resoluciones que varían según la altura del elemento escaneado, entendiendo que la fachada sobrepasa los 100 metros de altura. El equipo utilizado es el Faro Focus3D 330, con resoluciones de 1/1, 1/2 y en zonas que no se trabaja con tanta altura de 1/4, todas ellas con una calidad de 6X, obteniendo una media de puntos por posición de 50 millones de medidas, la cual varía según la cobertura del edificio y el ángulo de escaneo.

Para el caso de estudio de la Coronación de la Virgen desarrollado en este artículo, se realizaron 92 posiciones, con resoluciones de $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$, con calidad de 6X, de las cuales 11 de estas posiciones han sido repeticiones para optimizar el color. La toma de datos en posiciones de zonas turísticas, se ha realizado fuera del horario de apertura al público, generando una dificultad técnica y de gestión en cuanto a la captura de las fotos, entre la hora de salida del sol, la cual varía a lo largo del año y la entrada de los turistas antes de las 9 am, este proceso se vuelve un poco más complicado si añadimos el uso que se ha realizado de plataformas tijeras, se han utilizado dos una de 22m y otra de 26m.

Para la toma de datos se utilizaron diferentes trípodes en relación a la altura, trípode con altura de 2m, otro de 3m, un mástil neumático que alcanza una altura de 6m reforzado con cables como flechas para tensionar la punta del mástil a una prolongaciones en el suelo, en 5 posiciones se le añadió una prolongación a este mástil llegando a los 8m, y por último una prolongación en horizontal para poder sacar el escáner fuera de la fachada, por los puentes, los balcones e introducirlo por zonas inaccesibles. El uso de este último, por motivos de seguridad, está limitado a zonas u horarios sin presencia de turistas. Para mejorar la toma de color, ha sido necesario repetir algún escaneo en momento de luz adecuada.

Unión entre posiciones

El proyecto se unió a partir de los clusters, agrupaciones de posiciones de características comunes, que permiten verificar la unión entre posiciones y cada clúster se verifica contra la topografía, mediante la detección de esferas y puntos naturales. El proceso de unión se dividió en tres etapas:

- Unión preliminar basada en la detección de objetos: como proceso de control de calidad, mediante la detección de las esferas, la detección de puntos y planos, el programa Faro Scene, tanto para relacionar la detección de estos entre posiciones como la comprobación de control de calidad con el levantamiento topográfico.
- Registro fino entre nubes de puntos como proceso de optimización: Una vez terminado el registro fino, se procedió a exportar las matrices de unión en local, para realizar la georreferenciación en una segunda matriz de rotación, que puede ser actualizada en base a la actualización del registro topográfico, entendiendo que el levantamiento de la coronación de la virgen se subdivide en 5 cluster. Todo el proyecto se subdividió en clusters, los cuales se georreferenciaron por grupos. Se estableció como límite para validar la unión un rango que ninguna zona sobrepasará un error de 4mm, exceptuando zonas acristalada con ruido.
- Georreferenciación y verificación de la unión respecto a la base topográfica: Tensiones máximas detectadas entre la detección de esferas y levantamiento topográfico, para el registro topográfico se excluyeron las tensiones ma-

yores para el cómputo, entendiendo que las esferas se detectaron 130 esferas entre todas las posiciones, de las esferas L05 a la L12.

Homogeneización de posiciones

El requerimiento de no tener oclusiones para el proyecto requiere que se solapen las posiciones TLS, en el caso de estudio se solapan 91 posiciones de la misma zona, por lo cual el ruido, bordes sobreexpuestos, contraluces de un único panorama pueden contaminar todo el caso de estudio, especialmente al relacionar zonas con diferentes iluminaciones. Esta complejidad requiere no solo una homogeneización de las fotos de tono e iluminación, si no un tratamiento del color directo sobre la nube de puntos, mediante la extracción de elementos lógicos a partir de filtros de color, de la composición del RGB, de filtros por intensidad, la edición de niveles en fotografía de nubes de puntos directamente en 3D y la selección manual de zonas de mayor y menor calidad en el color.

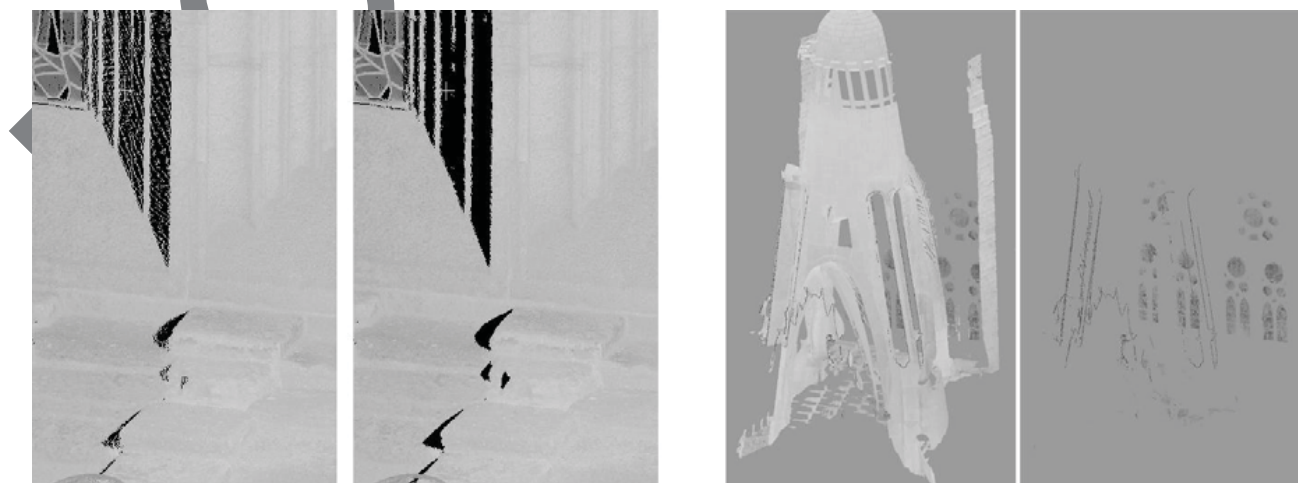
Este trabajo requirió una estructura clara, para poder repetir estos procesos posición por posición, en primer lugar la homogeneización a partir de técnicas de edición fotográfica, el paso siguiente es la iluminación en 3D, a partir de la selección por la composición del color RGB, dividiendo valores según tablas específicas, que luego se agrupan según la homogeneidad de las nubes y por último la relación de estas según la calidad de la nube, añadiendo secuencialmente las nubes de mayor calidad fotográfica a la menor, mediante un análisis de distancias, entre cada punto y su homólogo cercano, manteniendo siempre la información y evitando, por ejemplo, que posiciones sobreexpuestas, o zonas con diferentes calidades, se mezclen unas a otras.

Filtrado del modelo

Dada la complejidad de las figuras escultóricas, el escalonado del suelo y la complejidad volumétrica, la problemática de los errores de borde partido pasa a ser una prioridad, logrando eliminar el problema del borde partido al conocer la posición del escáner respecto al ángulo de incidencia, demostrando en el caso aplicado que al eliminar los puntos entre el 85° y 90°, se elimina este error de borde, ya que el salto entre una superficie y el ángulo del borde es muy alto, cuando esta se analiza como una red, como se ejemplifica en la ilustración 3 en la ilustraciones (A), que ejemplifican el antes y después de aplicar el filtro de borde partido por ángulo.

Para eliminar el ruido producido por reflejos, por ejemplo de bordes que impacta el sol, o zonas de cristales, se realiza un filtro dividiendo intensidades bajas con altas, ilustración 3 (B), en el caso de Coronación de la Virgen dividiéndolas entre 0-0.6 y 0.6-1 (varían según si es interior o exterior y el material escaneado, requiriendo pruebas preliminares). Posteriormente, se recuperaron las zonas acristaladas calculando el plano que forman mediante el método RANSAC y los elementos metálicos.

Como una parte del proyecto requerirá el modelado de mallas, se realizó un filtrado del ruido de la nube de puntos, optimizando un futuro mallado. Para ello se aplicó un filtro que analiza la continuidad de la superficie, tomando como media el 85% de los puntos para el análisis de esta tendencia, logrando extraer puntos que salen del promedio en la ilustración 4.



A

B

Ilustración 3. Filtrado de la nube de punto, por ángulo e intensidad



Ilustración 4. Filtrado de continuidad de la superficie. Izquierda ruido, derecha modelo de nube de puntos final

Clasificación de la nube de puntos

La Coronación de la Virgen es un caso concreto sobre cómo debemos dividir la nube de puntos, porque según los requerimientos del proyecto hay que obtener dos modelos, uno arquitectónico de 5mm y uno escultórico de 2mm. En el escultórico hay que identificar cada escultura con una referencia, pero al ser un proyecto de larga duración y con un número considerable de posiciones, hay que prever cómo dividir los archivos consecutivamente. Para ello, se han añadido tres campos a cada punto de la nube, que nos permiten dividirla y reintegrarla sin generar conflictos. El primer campo que se agrega como factor escalár, es la distancia de cada punto con la posición del escáner; esto nos permite saber si unos puntos que están generando ruido son cercanos o lejanos. Un segundo campo para clasificar la nube en relación a la zona de escaneo (desde calle, desde obra, etc.); esto nos permite dividir los archivos según los clúster del proyecto inicial. Por último se agrega un campo que divide la nube según el código de escultura y la zona arquitectónica, lo que nos permitirá en etapas posteriores, por ejemplo, extraer una nube de una escultura y convertirla en una malla poligonal de forma independiente. Como ejemplo ver la ilustración 5.



Ilustración 5. Escultura 51, 52 y elemento arquitectónico de la zona de Coronación de la Virgen.

Toma de fotos y trabajos fotogramétricos.

Se ha de obtener una cobertura fotográfica de la fachada que permita obtener un modelo digital de la misma, compatible con los resultados de láser escáner, y que sirva para generar una ortofoto verdadera de la fachada. Se obtendrá también una restitución fotogramétrica.

La complejidad y singularidad del Templo, limita la posición óptima para capturar las imágenes, por lo que el sistema diseñado permite adaptarse a diferentes casuísticas. El sistema, que ha sido validado por el departamento de seguridad del Templo, permite trabajar en sistemas de poleas o suspendido en grúas. La complejidad de la superficie no hacía viable trabajar con una única toma frontal, por lo que se trabaja con cobertura multi-angular para cada una de las posiciones. De esta manera se minimizan las zonas de sombra y se generará un MDS de alta calidad. La información capturada permite generar los productos solicitados, cumpliendo con precisión y calidad.

Planificación y toma fotográfica

A partir de las visitas iniciales al Templo, se planifica la toma de imágenes, teniendo en cuenta grupos escultóricos y/o elementos salientes de la fachada que modifiquen la distancia teórica para la captura de las imágenes. Se definen las posiciones para cada una de las pasadas y la base entre imágenes, para mantener el solape correcto.

Previo inicio de los trabajos de campo, el departamento de Seguridad del Templo validó el sistema utilizado. Todo el trabajo realizado en el Templo tenía que ser coordinado con sus equipos técnicos y de seguridad. La cámara va soportada en un estabilizador electrónico brushless, controlado por emisora para corregir desplazamientos. El sistema permite capturar imágenes a partir de posición (transmisor de vídeo en directo), controlado por emisora para corregir desplazamientos) o por cadencia. En función de la zona se podían utilizar sistemas de corrección de posición, para evitar el impacto del equipo contra elementos del Templo.



Ilustración 6. Planificación y captura de fotos..

El equipo de campo está formado por tres personas: control de cámara (visión en tiempo real), control de posición del sistema y control de trabajo ejecutado (seguimiento de imágenes capturadas – baterías de los diferentes sistemas – cambio de tarjetas). La coordinación entre miembros del equipo es básica para la correcta ejecución de la captura de datos. La captura multi-angular se realiza de forma secuencial para cada una de las posiciones (F-A-B-E-D). Una vez finalizada una fase de captura se realiza una copia de seguridad de las imágenes (RAW+jpg) y se realiza un primer control visual para verificar que los datos son correctos. Para el control de las imágenes capturadas se registra el tiempo en el que se capturó cada una de las pasadas.

Procesado

En despacho se realiza el control de calidad de las imágenes capturadas y se descartan aquellas que no cumplen con una calidad óptima (desenfocadas, desplazadas, baja calidad). Se seleccionan las imágenes correspondientes a cada pasada y se realiza el renombrado (PPP_XXXX). Una vez definidos los bloques de trabajo se ejecuta la fase de ajuste (AT). Se utiliza software basado en StructurefromMotion (SFM). Como datos iniciales: posición estimada para cada una de las imágenes y calibración de cámara. Al incorporar imágenes con un solape 80/60 y captura multi-angular, se obtiene un ajuste muy robusto, con una gran redundancia de datos. Se realiza una revisión de todos los puntos de



enlace medidos por el sistema, eliminando todos aquellos con residuales elevados. En casos puntuales se han tenido que incorporar puntos de enlace de forma manual para mejorar la conectividad entre modelos. Una vez depurados los puntos de enlace y verificada la correcta conectividad entre modelos se procede a la medición de los puntos de apoyo. A partir del bloque ajustado se genera el MDS. Como se ha comentado anteriormente, la correcta captura de imágenes permite obtener un MDS de alta precisión y densidad, minimizando las zonas de sombra.



Ilustración 7. Muestra del MDS generado

Ortomosaico. A partir de los datos de orientación externa y el MDS se genera el ortomosaico. La edición se base en redefinir polígonos de corte y en casos puntuales, en que el MDS generado por correlación no presenta suficiente calidad (debido a baja cobertura estereoscópica), se recurre a la información restituida o datos TLS para generar un nuevo modelo y volver a ortoproyectar la zona conflictiva. Se ha procurado mantener la radiometría original.



Ilustración 8. Muestra zona de ortomosaico.

Restitución

Para esta fase se ha de realizar un cambio de sistema para poder cargar los modelos en estaciones fotogramétricas (XYZ a XZY) y poder llevar a cabo la restitución 3D solicitada. Se trabaja con las imágenes frontales. Al cargar los modelos, se salta una imagen para reducir el solape y mejorar el posado en Z. La calidad de las imágenes y el ajuste permiten realizar la restitución correctamente, apreciando hasta el más mínimo detalle, lo que requiere tener unos criterios bien definidos.

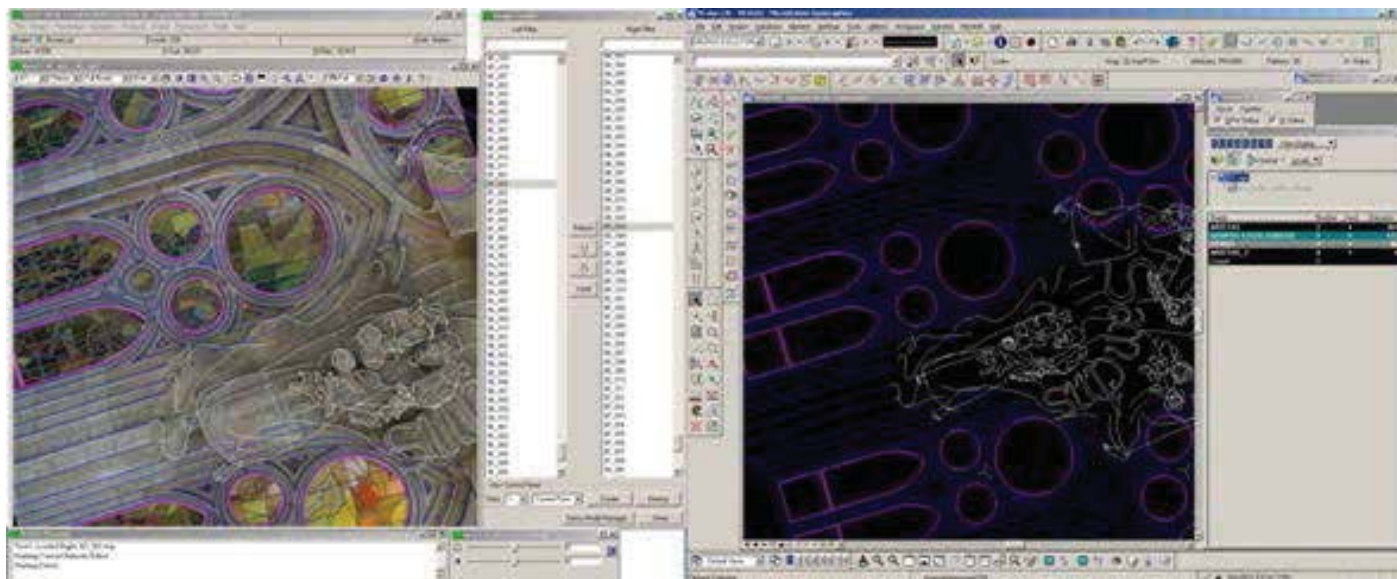


Ilustración 9. Muestra del sistema de restitución.

Ortomosaico y modelo pares estereoscópicos

Para la zona del Rosetón se capturaron un total de 1046 imágenes (incorporando planos laterales). Puntos de enlace en el bloque: 140.085. Residuos obtenidos en el ajuste (unidades m): X: 0.003 Y: 0.003 Z: 0.005

El MDS generado contiene 106 millones de puntos. Los ortomosaicos se generan con un GSD de 5mm. En la fase de restitución se diferencia: aristas - contornos aparentes y aristas en grupos escultóricos - otros.

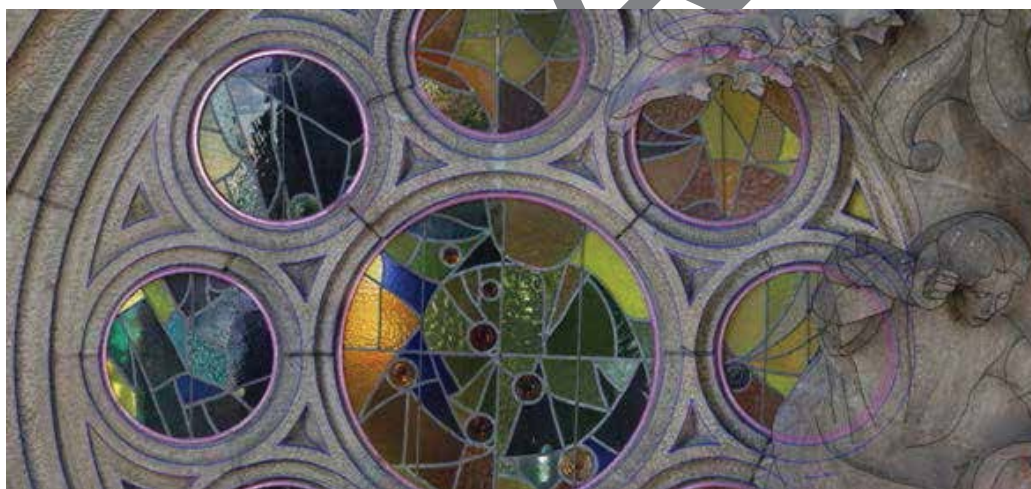


Ilustración 10. Restitución sobre ortomosaico.

COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS

Es necesario analizar los resultados obtenidos y ver si son totalmente complementarios, Para ello se desarrolla una comparativa como control de calidad de cada producto, entre el levantamiento topográfico, levantamiento de TLS y de fotogrametría, como validación de los resultados, en cuanto a precisión.

Control de calidad TLS a partir de levantamiento topográfico

El control de calidad del levantamiento TLS se divide en tres etapas, comparación de información entre posiciones TLS en el proceso de registro, comprobación entre detección de esferas y registro topográfico tanto con esferas ancladas a fachada como minitripodes con esferas niveladas y por último la comparación de puntos naturales entre topografía, TLS y fotogrametría.



Comprobación entre posiciones TLS: comprobación por distancia absoluta de mallas grid de cada posición con el conjunto de posiciones, obteniendo distancias inferiores a los 4mm, en la unión de cada grid en la zona de Coronación de la virgen (ilustración 10), en la etapa de registro fino, explicada en el apartado 2.2.

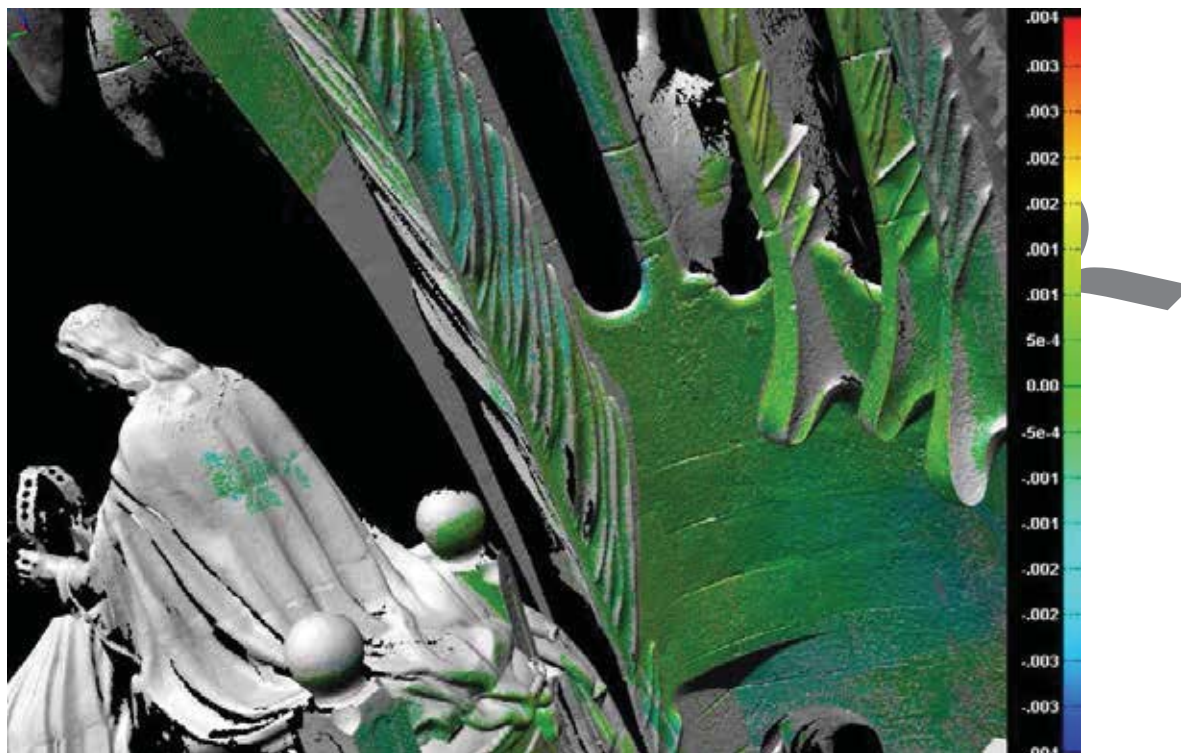


Ilustración 11. Ejemplo de comprobación de unión registro fino, rangos de color entre 4 y -4 mm.

Comprobación entre detección de esferas y topografía. En cada posición TLS se detectaron las esferas ancladas al edificio y ninguna esfera detectada superaron los requerimientos técnicos solicitados para este proyecto cuando se confrontan con el levantamiento topográfico, entendiéndose que existe un error en la detección de esferas por posición por errores instrumentales y por el recubrimiento que existe del elemento a detectar. Adicionalmente se realizó una media de las detecciones realizadas de cada esfera, siendo detectada cada una más de 12 veces en la zona de Coronación de la Virgen y se realizó un informe para establecer la distancia lineal de cada esfera detectada como proceso de validación del registro, como muestra de ello la ilustración 10.

En la ilustración 12 se ilustra el tercer control de calidad, relacionando los tres levantamientos en un único documento, como control de calidad, mediante puntos naturales y puntos complementarios de la zona considerada arquitectónica entre topografía y TLS.



Ilustración 12. Control de calidad mediante la detección de esferas y levantamiento topográfico



Norm del punt:	PQ2D	X	Y	Z
Punt Topogràfic (Referencial)		32,7060	3,1720	27,5310
Punt TLS		32,6969	3,1733	27,5313
Dif. de coordenades		0,0091	-0,0013	-0,0003
Distància: 0,0058 m				
Punt fotogramètric		3,172	27,534	
Dif. de coordenades		0,0000	-0,0000	
Distància: 0,0000 m				

Ilustración 13. Control de calidad puntos naturales, entre levantamiento topográfico, levantamiento TLS y levantamiento fotogramétrico.

CONTROL DE CALIDAD DE FOTOGRAMETRÍA A PARTIR DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

En fotogrametría los controles de calidad de las imágenes capturadas, nos permiten validar el sistema utilizado, ya que el número de imágenes descartadas (por mala calidad o posición incorrecta) es mínimo (en torno al 3%), teniendo en cuenta la complejidad y las diferentes profundidades encontradas. El procesado de la información (Ajuste – Generación de MDS) ha cumplido las expectativas en precisión por lo que se han generado los productos solicitados, mejorando la calidad requerida. Los productos generados se chequean a partir de los puntos de verificación (no intervienen en el cálculo).

Ortomosaic			
Y'	Z'	Y-Y'	Z-Z'
3,037	25,731	0,002	-0,002
-3,355	25,729	0,002	0,001
-2,571	41,434	-0,001	-0,006
-3,074	38,694	-0,004	0,002
3,825	30,342	0,008	0,002
0,169	40,365	-0,001	0,001
1,439	41,882	-0,003	-0,003
3,068	38,888	0,001	-0,005
0,233	37,995	0,001	-0,004
2,493	34,860	-0,005	-0,003
-2,576	27,876	0,002	0,001
-1,584	26,232	0,001	0,001
1,282	26,223	-0,001	-0,001
3,172	27,534	0,000	-0,003
-1,308	31,556	0,005	-0,001
1,952	31,031	0,003	0,000
RMSE		0,003	0,003

Tabla 1. Tabla con residuales de los puntos de verificación

Comprobación del modelo entre fotogrametría y TLS

La última comprobación que se realizó fue una comparativa entre modelos de nubes de puntos, por una parte el modelo TLS y el modelo fotogramétrico convertido a puntos densificados, ambos con nubes filtradas a 2mm. La zona de mayor diferencia es la zona en sombra superior al rosetón, La zona de interés escultórico entre fotogrametría y TLS como zona principal de esta comparativa se encuentran por debajo de 2cm en todos aquellos puntos bien definidos por ambos sistemas.

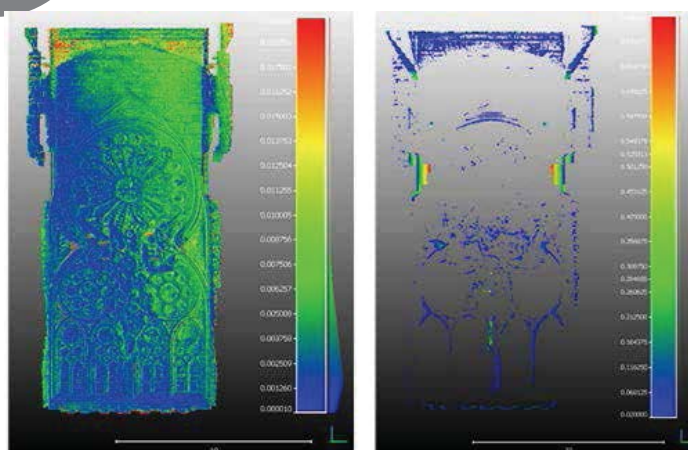


Ilustración 14. Izquierda: diferencias de 0 a 20mm. Derecha: diferencias superiores a 20mm



CONCLUSIONES

Con la toma de datos inicial en el campo del TLS no se esperaba que la imagen resultante tuviera tanta calidad, ya que una parte importante de las posiciones estaba a contraluz, en una zona cubierta con grandes aberturas, y una altura de a la cúpula superior de 20m en sombra, pero la selección y optimización de los datos ha permitido una calidad a los trabajos desarrollados por fotogrametría, en la cual la toma fotográfica es controlable.

La fotogrametría dada la resolución de las fotos (1 y 2 mm.) tiene un nivel de detalle muy alto, llegando al milímetro como ortoimagen, alcanzando a registrar información más cerca del objeto que los escáneres, ya que la cámara puede ser elevada en una grúa, frente a escáner usado, que tiene que estar en una superficie estable. Se han podido cubrir zonas que con láser escáner hubiera sido imposible

En cuanto a cobertura, la tecnología TLS cubre el espacio completo, con su complejidad geométrica (interiores incluidos) y la fotogrametría se enfoca a las fachadas, las cuales deben tener una buena iluminación, ya que en zonas con sombra total no puede recoger datos, siendo estas zonas las que tienen mayores diferencias, cuando se comparan las dos técnicas.

La comparativa entre estas técnicas demuestra las limitaciones de cada una y como estas se complementan, es decir la fotografía puede registrar mejor los datos que están sobre el elemento y cuando se miran desde abajo aunque estén en sombra el TLS logra captar más información. Llegando al punto de plantear que no son técnicas que compitan, sino que se complementan, cuando hay un control de calidad topográfico que las relacione correctamente, para que ambas informaciones estén georreferenciadas, de tal forma que se puedan combinar,

BIBLIOGRAFÍA

BRODU, N., LAGUE, D., 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology 2012 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 68, pág. 121 – 134.

CORSO, Juan, Extracción y estructuración de la información proveniente de la tecnología de Escáner Láser Terrestre. Comparación de procesos de reducción poligonal relacionados con los mapas de desplazamiento. Barcelona: Máster Universitario En Gestión Y Valoración Urbana, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

CORSO, Juan, Gestión y Explotación de la Información TLS de 3D a 2D Y 2.5D. Análisis, selección y síntesis a partir de la tecnología Escáner Láser Terrestre, Tesis Doctorado en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica, del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2015.

SCHENABEL, R., Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, In Computer Graphics Forum 26(2):214 – 226, 2007.