

**CÓDIGO: 5.3.01****DOCUMENTACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL PATRIMONIO HISTÓRICO  
MEDIANTE HIBRIDACIÓN DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL E INGENIERÍA  
INVERSA: EL PALACIO DE LA MAGDALENA EN SANTANDER****Cosido, Oscar J. (1º Autor)<sup>1\*</sup>, Catuogno, Raffaele<sup>2</sup>, Gálvez, Akemi<sup>3</sup>, Iglesias, Andrés<sup>4</sup>,  
Loucera, Carlos<sup>5</sup>, Cappellini, Valeria<sup>6</sup>, Campi, Massimiliano<sup>7</sup>, Sainz, Esteban<sup>8</sup>**

- 1: Ayuntamiento de Santander, Centro Municipal de Formación y Empleo / Universidad de Cantabria,  
Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación  
[oscar.cosido@gmail.com](mailto:oscar.cosido@gmail.com)
- 2: Università Degli Studi di Napoli "Federico II", Instituto UrbanEco  
[raffaele.catuogno@gmail.com](mailto:raffaele.catuogno@gmail.com)
- 3: Universidad de Cantabria, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación  
[akemi.galvez@unican.es](mailto:akemi.galvez@unican.es)
- 4: Universidad de Cantabria, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación  
[iglesias@unican.es](mailto:iglesias@unican.es)
- 5: Matemático  
[clm1981@gmail.com](mailto:clm1981@gmail.com)
- 6: Arquitecto  
[valeriacappellini@hotmail.com](mailto:valeriacappellini@hotmail.com)
- 7: Università Degli Studi di Napoli "Federico II", Instituto UrbanEco  
[campi@unina.it](mailto:campi@unina.it)
- 8: Ayuntamiento de Santander, Centro Municipal de formación y Empleo  
[esainz@ayto-santander.es](mailto:esainz@ayto-santander.es)

**PALABRAS CLAVE:** Drone, Fotogrametría Convergente, Ingeniería Inversa, Palacio de la Magdalena, Visión Artificial.

**RESUMEN**

Este trabajo surgió dentro de la colaboración continuada entre el Grupo de Investigación de Gráficos por Computador y Diseño Geométrico de la Universidad de Cantabria, el Taller de Empleo Nuevas Tecnologías del Ayuntamiento de Santander y el Instituto Urban/Eco de la Università Degli Studi di Napoli – Federico II – de Italia. El proyecto, propuesto por el Ayuntamiento de Santander, consistió en aportar una nueva metodología de trabajo, mucho más acorde con la situación de crisis actual, buscando una reducción importante de los costes derivados de la documentación digital del patrimonio histórico. Además de funcionar como soporte a trabajos de catalogación, conservación y restauración del patrimonio arquitectónico de la ciudad de Santander, aportando documentación fotográfica y gráfica del edificio "Palacio de la Magdalena" mediante la hibridación de técnicas fotogramétricas con técnicas provenientes del campo de la visión artificial. El trabajo se ha enmarcado dentro del Plan Director de la Magdalena.

Podemos considerar, a este proyecto de colaboración, como un trabajo de investigación con una importante componente de transmisión tecnológica hacia la sociedad. El producto final de este trabajo es la documentación digital de un edificio considerado como patrimonio histórico, de forma que su fortuito derrumbe o demolición no impida el poder volver a construirlo de forma precisa como si de una réplica se tratase. Es muy importante que no existían planos ni alzados previos de este edificio, más allá de los dibujos originales a mano alzada de los arquitectos del edificio y de unos planos aproximados de la

reforma interior realizada en la década de los 90, por ello se ha procedido a documentar métricamente este edificio por ingeniería inversa, de forma que se tengan medidas de todos los elementos arquitectónicos del edificio de forma precisa.

El trabajo nace con la intención de ser el prototipo para una nueva metodología de trabajo, combinando diferentes técnicas de tratamiento de imágenes y modelado 3D de objetos de rango cercano, hibridando técnicas fotogramétricas con las provenientes del campo de la visión artificial.

## INTRODUCCIÓN

Tras la difícil situación económica por la que atraviesa Europa meridional y dada la colaboración entre el grupo de investigación de Gráficos por Computador y Diseño Geométrico de la Universidad de Cantabria con el Taller de Empleo “SIG y Modelado 3D de Patrimonio en Entornos Urbanos”, una de las especialidades del taller de empleo en nuevas tecnologías del Ayuntamiento de Santander, surgió la idea de realizar un proyecto que aportara un valor añadido a la utilidad pública del servicio de información urbana supramunicipal hacia el ciudadano [1]. Para este proyecto se sumó la colaboración de la Università Degli Studi di Napoli “Federico II”. Dentro de esta colaboración, se planteó el estudio de una nueva metodología de reconstrucción tridimensional de objetos que, dada la versatilidad de aplicaciones potenciales, tendría algunas aplicaciones en el área de la arquitectura.

La presentación por medio de modelos de realidad virtual, posibilitan que el usuario interactúe libremente con el objeto, de manera que el acercamiento y el movimiento por la maqueta virtual lo realiza según la comprensión que de él va adquiriendo. Los programas navegadores, necesarios para realizar estas visualizaciones, son de diseño y disposición muy intuitiva y su aprendizaje sencillo, por lo que su manejo requiere un adiestramiento mínimo. También los modelos tridimensionales permiten la realización de visitas guiadas, que recorren los puntos significativos del modelo, y conducen al espectador directamente a ellos. En este caso se trataría de vídeo-animaciones. Otra posibilidad es la transformación estereoscópica de la imagen del modelo, con lo que se adquiere la sensación de profundidad sin tener que realizar ningún esfuerzo de interpretación, precisando únicamente la utilización de artefactos más o menos complejos. Este proyecto completó el trabajo realizado por Cosido et al [2] en el que se implementan los servicios Web del GIS Municipal para la documentación del mobiliario urbano, consiguiendo una elevada precisión métrica. Como productos finales se obtuvieron el modelo 3D del Edificio y la ortorrectificación de las fachadas.

## METODOLOGÍA PARA EL MODELADO 3D DEL PALACIO DE LA MAGDALENA

### 1.1 Estudio Preliminar

Dentro de este trabajo concreto, la idea inicial consistió en comparar los costes y viabilidad de modelar el edificio mediante técnicas de fotogrametría convergente [3] contra la tecnología del LIDAR Terrestre (Láser-Escáner). Para la captura de información tanto de las fachadas como de la parte interior del edificio. La reconstrucción 3D es el proceso mediante el cual objetos reales son reproducidos en un ordenador, manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen y forma). Existen diversas técnicas de reconstrucción, cuyo objetivo principal es obtener un algoritmo que sea capaz de realizar la conexión del conjunto de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie. La eficiencia de las técnicas utilizadas define la calidad final de la reconstrucción. Después de varias pruebas y visto el coste del escáner-láser se decidió prescindir de esta tecnología y generar el proyecto mediante fotogrametría convergente. Haciendo del proyecto un trabajo menos automático en la captura de la información, pero con más posibilidades de automatización al tratarse de imágenes unidas con modelos 3D de nubes de puntos obtenidos por estereocorrelación, no sólo nubes de puntos obtenidas con Escáner-

Láser, a partir de las cuales, pudimos generar la malla de puntos de igual forma, así como el modelo 3D y mucho mejor resuelto el texturizado del modelo y la producción de la ortofoto.

Una vez decidida la metodología a emplear: mediante la captura de información a través de la toma de fotografías convergentes al edificio, se investigó el integrar nuestro sistema con la utilización de nuevos métodos de captura, así la parte de la cubierta del edificio se realizó por captura con cámara aerotransportada en un Drone cuatríhlice o UAV (Unmanned Aerial Vehicle), a partir de ahora DRONE, que se subcontrató por parte del Ayuntamiento de Santander, integrando también la utilización de un miniUAV, a partir de ahora MICRODRONE, adquirido por el Ayuntamiento de Santander para poder estudiar la generación de modelos de “bajo coste”. No encontrando, en la actualidad, publicaciones ni referencias a vuelos con un aparato tan económico y una cámara HD tan sencilla.



Figura 1. Vuelo con el miniDrone para toma de fotografías

## 1.2 Hibridación de Técnicas

Las diferentes técnicas de reconstrucción existentes presentan varias ventajas e inconvenientes y por lo tanto dependiendo del fin de la reconstrucción unas serán más apropiadas que otras. Las técnicas de telemetría láser y luz estructurada consiguen construcciones con una gran exactitud y precisión, pero también presentan varias desventajas como el alto coste del equipo. Además de que este tipo de técnicas son especialmente dependientes en la geometría del objeto y necesitan ambientes muy controlados. Por el contrario, la visión artificial basada en el análisis de las imágenes y la fotogrametría convergente son las técnicas más utilizadas para la reconstrucción tridimensional, por su robustez y su menor coste económico.

La libertad que alcanza a la Fotogrametría hace que se tenga que unir a soluciones híbridas, interrelacionadas, dentro de una multidisciplinariedad. Nosotros hemos ligado la fotogrametría y los algoritmos basados en visión artificial con las tecnologías de 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”). Además de unirlo 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.

En la reconstrucción en tres dimensiones se emplean diferentes métodos algunos de ellos ya mencionados anteriormente y por lo tanto lo que se pretendía en este trabajo es emplear aquellas técnicas que mejor se

adecuaran tanto en efectividad como en velocidad a la reconstrucción de objetos. El aspecto de la velocidad es importante, ya que en casi todas las aplicaciones profesionales se requiere que los sistemas funcionen en tiempo real, por ello se utiliza una técnica de reconstrucción basada en puntos de interés que permite un menor tiempo de procesado. Otro aspecto a tener en cuenta es el coste del equipo. La reconstrucción por fotogrametría convergente permite una solución robusta y rápida con un coste reducido.

### 1.3 Desarrollo del Trabajo

El trabajo consiste en la reconstrucción de objetos cercanos, basándose en el análisis de imágenes adquiridas desde distintas posiciones de cámara dispuesta en forma convergente al modelo. Las cámaras utilizadas estarán calibradas permitiendo obtener distintas imágenes relacionadas entre sí [6]. A partir de esas imágenes se deberá generar una malla en tres dimensiones, formada por puntos en tres dimensiones y rectas que unan los puntos [4]. Este trabajo intenta aportar una mejora metodológica, abriendo nuevas perspectivas en los distintos campos de trabajo para la geomática, acercándola a las disciplinas de la Visión Computacional, la Informática Gráfica y la Fotogrametría de Rango Cercano.

La metodología que se ha seguido para la realización del trabajo ha consistido en:

#### 1. Análisis previos:

En primer lugar, una vez elegido el edificio, se elabora una recopilación exhaustiva de documentación y cartografía de la zona y del mismo. Información necesaria para conocer, a priori, las distancias de las fachadas, ancho de calles y posición del arbolado. A continuación, con ayuda de un distanciómetro láser o estación total, se obtiene el levantamiento de la posición aproximada del arbolado, el mobiliario urbano y posteriormente el perímetro del edificio. Además de la longitud y altura de las fachadas del edificio, para realizar el estudio de la toma fotográfica. A partir del dibujo esquemático de las fachadas del edificio con un programa de diseño CAD, se desarrolla el estudio de la cobertura fotográfica, teniendo en cuenta las características de la cámara digital, el tamaño del fotograma, el tamaño del píxel, y la escala a la que se desea obtener la cartografía final, que en este caso es a escala 1/100.

#### 2. Trabajo de campo:

- a. Obtención de imágenes: Se capturaron imágenes con la cámara de diferentes objetos. Dichos objetos tienen geometrías de creciente dificultad e, inversamente, decreciente escala. Con el plano o esquema de la posición de los fotogramas en cada fachada del edificio, se realiza la toma de fotografías en el terreno [5].
- b. Una vez revisadas e impresas las fotografías, se estudia la posición de los puntos de control mayor necesarios en cada una de ellas para poder efectuar, posteriormente, la orientación externa. Es indispensable ejecutar este estudio antes del levantamiento topográfico del edificio, para tener claro cuáles son los puntos imprescindibles en la toma de datos.
- c. Cálculo de los errores. Los distintos parámetros de cámara, distancia al objeto y dimensión del mismo nos generan unos errores medibles.
- d. Una vez realizada la planificación de los trabajos y la cobertura fotográfica, se establecen las bases de la red del levantamiento, las cuales se emplearán como estaciones de las que se realizará la radiación de los puntos de control y de relleno que se creen necesarios para determinar la forma y dimensiones del edificio.
- e. Vuelo fotogramétrico mediante UAV: Se ha volado con dos tipos de UAV, la finalidad ha sido la de capturar las fachadas mediante la toma de fotos oblicuas con un vuelo oblicuo y las

cubiertas mediante vuelo con posición del haz perspectivo de la cámara de forma cenital o perpendicular al tejado. Para nuestro trabajo usamos dos tipos de UAV, lo que hemos denominado como Drone y otro más pequeño, mucho más económico, pero con menos capacidad a la hora de trabajar y tomar imágenes desde el aire, que hemos denominado Minidrone. Ambos aparatos han funcionado cumpliendo las expectativas, sobretodo el minidrone, que con una cámara con poca resolución, ha posibilitado imágenes con calidad suficiente, cubriendo espacios inaccesibles de otra forma para la toma de imágenes. Para el vuelo, hemos marcado el plan de vuelo en un programa que permita georreferenciación y después se lo hemos programado al Drone, con el minidrone lo hemos realizado de forma libre, siguiendo el criterio del operador que lo conducía. Hemos aprovechado al máximo la capacidad del aparato, mediante el uso del GPS y el sistema inercial del mismo, así como la capacidad de estabilización que tienen mediante el uso de los giróscopos.

3. Computación:

- a. A partir de aquí comienza una serie de trabajos extensos de procesado de los datos, se efectúan los cálculos necesarios para conocer la tolerancia y precisión del trabajo de campo. También se obtienen: los parámetros internos de la cámara, la orientación relativa, la orientación externa.
- b. La restitución del modelo inalámbrico tridimensional del edificio, la representación bidimensional de las fachadas del mismo y la creación de ortoimágenes.
- c. Reconstrucción:
  - i. Detección de esquinas: Se buscarán varios algoritmos que sean capaces de detectar las esquinas de las imágenes escogidas. Además de la implementación de algunos de ellos mediante el software fotogramétrico Photomodeler, del que hemos sido Betatesters. Una vez implantados se llevará a cabo un análisis comparativo teniendo en cuenta la calidad de los puntos detectados y el tiempo de ejecución.
  - ii. Detección de bordes o aristas: Se investigarán los posibles algoritmos capaces de detectar los bordes de las imágenes escogidas. Se realizará una comparación de los distintos algoritmos atendiendo a criterios de calidad y tiempo de procesado.
  - iii. Detección de puntos de interés: Se procedió a implantar los algoritmos más importantes. Mediante una comparativa de los distintos algoritmos. Entre las zonas de interés se estudia la detección de líneas.

4. Modelado 3D. Por último, se realizó una reconstrucción en tres dimensiones de los objetos hibridando los métodos y algoritmos encontrados que mejores resultados obtuvieron. Para obtener el modelo tridimensional inalámbrico del edificio se ha realizado la restitución digital del mismo con el programa Photomodeler en su versión Scanner. Se entiende por restitución al proceso que permite encontrar la forma de un objeto a partir de la intersección de los haces perspectivos de cada par de fotografías. Restitución por nubes de puntos: el más complejo, exige un dominio de los anteriores, de las cámaras y de la calibración. Al generar nubes de puntos de una forma automática, al trabajar con ellas y corregirlas es algo que no está muy logrado, es complicado restituir una fachada de 10 millones de puntos. En nuestro caso se empleó la opción del scanner con zonas de gran complejidad como escudos, adornos del capitel de las columnas del pórtico de entrada, etc.



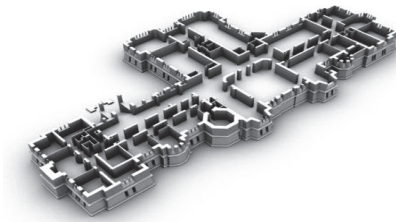


Figura 2. Corte del Modelo 3D de la Magdalena

En este proceso lo primero es idealizar las fotografías que se vayan a utilizar, comenzando con el proceso habitual de relacionar puntos comunes hasta lograr orientar todas las fotografías. Una vez idealizadas y orientadas se hizo una superficie densa, una superficie sobre la que trabajamos, se eligió el formato DSM (Modelo de Superficies) que permite seleccionar una zona concreta común en todas las imágenes. Teniendo siempre cuidado de mantener un error residual bajo. Una vez seleccionada la zona marcamos de forma automática mediante los algoritmos de visión artificial. Para lo que sería imprescindible, contar con unas dianas que anclasen perfectamente el objeto. Esta fue la principal línea de investigación conseguir una nube de puntos para restituir y lograr un modelo preciso. Para crear esa nube se usaron técnicas de fotogrametría unidas a los algoritmos de visión artificial, después con nuestra nube de puntos triangulamos creando una malla. En nuestro trabajo llegó un momento en que se unieron todas las partes del edificio con las que trabajamos en CAD, sobre un plano de planta que sacamos del GIS del ayuntamiento. Se exporta cada una de las partes en formato DXF, al abrirlas en CAD lo primero que había que lograr era orientarlas, alinearlas en los ejes X, Y y Z y escalarlas con la planta hasta hacerlas encajar formando un solo sistema en coordenadas UTM.



Figura 3. Modelo 3D del Palacio de la Magdalena: Modelo Geométrico y Modelo con Texturas

#### 1.4 Hibridación Computacional

Dentro de la Hibridación de distintas técnicas se optó por el Algoritmo de Longuet Higgins, algoritmos de Extracción de Características, otros algoritmos para la identificación de puntos característicos a partir de aristas, puntos de fuga, esto último se hizo mediante el método de la minimización del área del triángulo, este método consiste en el cálculo y minimización de la superficie de los triángulos formados por cada uno de los segmentos extraídos y por el punto de fuga, como vértice opuesto de cada triángulo y común a todos ellos. El área de cada triángulo se calcula a través del determinante formado por las coordenadas de los dos puntos extremos de la línea de fuga y las coordenadas del punto de fuga. Por último también utilizamos la Transformada de Hough para líneas. La transformada de Hough está diseñada especialmente para encontrar líneas. Definimos una línea como una colección de puntos de borde que son adyacentes y que tienen la misma dirección. La transformada de Hough es un algoritmo que tomará una colección de puntos de borde, encontrados mediante un detector de bordes y buscará todas las líneas sobre las cuales estos puntos de borde se encuentran. La idea básica es convertir los puntos de bordes al espacio de parámetros.

## 1.5 Correlación y automatización del proceso

Para poder hacer esta parte recurrimos al uso de un Árbol de búsqueda. Después del establecimiento de la descripción relacional de las entidades de correspondencia y la forma de medir el grado de semejanza, es necesario ejecutar un esquema de correspondencia. La forma más común de encontrar la solución es mediante un árbol de búsqueda. En la Visión Computacional e Inteligencia Artificial, se utilizan con éxito tres métodos de búsqueda [6].

Los árboles están formados por nodos y arcos, que comienzan en un nodo raíz, y descienden a través de los nodos antecesores, hasta alcanzar los nodos hoja. La conexión entre dos nodos se realiza a través de arcos. Las primitivas  $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  de una descripción relacional se denominan unidades y las primitivas de la descripción que se quiere hacer corresponder, es decir  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  se llaman etiquetas. La dimensión o profundidad del árbol se define por el máximo camino con el menor costo.

Hasta aquí solo se ha utilizado la descripción de las primitivas y la correspondencia, ya descrita, es simplemente correspondencia basada en características, realizada mediante el uso de un árbol de búsqueda (en oposición por ejemplo al método  $\Psi$ -s). El siguiente paso considera las relaciones entre las primitivas. Los métodos anteriores fueron utilizados para la identificación de puntos y características homólogas, con la finalidad de generar la nube de puntos por estereocorrelación que determine la base geométrica del objeto a modelar.

Una vez creadas las superficies mediante la triangulación, se procede a la asignación de materiales a dichas superficies del objeto que al interactuar con las fuentes de luz de la escena permiten alcanzar efectos de visualización con el mayor realismo 3D posible. Al tiempo se continuaba con el desarrollo del trabajo, también ahí se unieron todas las partes, buscando puntos de convergencia, sí se observó que para conseguir mayor precisión y que se acercase más a la realidad, tuvimos que hacerlo dando unos puntos por topografía. Cada una de ellas tenía que estar orientada y escalada, esto lo conseguimos eligiendo un punto como origen (0,0,0) y, a partir de él, le damos una distancia a otro punto para definirle el tamaño del objeto, le orientamos en los ejes X y Z, es decir, le damos una altura y una profundidad, mediante tres puntos, así fuimos uniendo, de forma sucesiva, cada una de las partes. Llegados a este punto decidimos mejorar el modelo de malla de alambre, obtenido, exportándolo a CAD y limpiando y corrigiendo las líneas de ruptura del edificio. También se consiguió un modelo 3D con los interiores del edificio. Mediante el uso de sombras y focos de luz, podemos realzar la sensación de 3D.

## CONCLUSIONES

Una vez realizado el modelo 3D del edificio de la Magdalena y de la Casa de Guardeses, podemos concluir que hemos sido capaces de generar modelos 3D de edificios catalogados como Patrimonio Histórico, de los que no había unos planos previos. Para conseguir esta finalidad, hemos mezclado distintas tecnologías y técnicas, desarrollando un híbrido, del que ha salido una nueva metodologías válida para cualquier trabajo similar, basado en la reconstrucción 3D de objetos de rango cercano.

La hibridación ha consistido en el uso de los Drones o UAVs, donde hemos comparado la utilización del modelo de UAV más caro con la utilización del más barato, las técnicas de fotogrametría convergente, la automatización de parte del proceso mediante el uso de algoritmos implementados para su uso en visión artificial y su gestión mediante la implementación de un prototipo de Sistema de Información Patrimonial (tecnología GIS 3D). El trabajo realizado no sólo ha permitido la consecución del objetivo del trabajo, sino que ha supuesto el citado prototipo de tecnología GIS 3D, suponiendo una aproximación más hacia la necesidad de gestionar la información de forma 3D o 4D [7].

Los resultados iniciales fueron divulgados y reconocidos a la hora de otorgar un proyecto de investigación del Plan Nacional en la convocatoria de 2012. Podemos considerar a este trabajo de colaboración como un trabajo de investigación con una importante componente de transmisión tecnológica hacia la sociedad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cosido, O. “Educational Innovation In Employment Workshops Santander Commitment To Employability In New Technologies” Congreso Mundial de Estilos de Aprendizaje (2012).
- [2] Cosido, O., de José, J., Piquero D., Iglesias A., Sainz E.: “Implementation and Deployment of Geographical Information System Services in the Municipality of Santander”. ICCSA 2011. IEEE. (2011)
- [3] Lerma, J.L. (2002). Fotogrametría moderna. Analítica y digital. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. p. 37-38
- [4] Andretto M., Brusco N., Cortelazzo G., (2003) “Automatic 3D modeling of textured cultural heritage objects”, Department of Information Engineering, University of Padova.
- [5] Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007). Fotogrametría arquitectónica. Editorial Edicions UPC.
- [6] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, “Techniques for Data Hiding,” IBM Systems Journal 35, Nos. 3&4, 313-336 (1996).
- [7] Cosido, Oscar & López, Conrado “Stereowebmap: 3D Cartography Server” GISCOAST 2007.