

José Balsa Barreiro

European Experienced Researcher del Institut für Photogrammetrie, Universidad de Stuttgart (Alemania).

Correo: jose.balsa-barreiro@ifp.uni-stuttgart.de

Dieter Fritsch

Catedrático emérito, antiguo director del Institut für Photogrammetrie (1992-2016), Universidad de Stuttgart (Alemania).

Correo: dieter.fritsch@ifp.uni-stuttgart.de

MODELIZACIÓN 3D DE CENTROS URBANOS HISTÓRICOS Y SU APLI- CABILIDAD PARA LA SEGURIDAD Y LA DEFENSA

3DMODELLING OF HISTORIC URBAN CENTRES AND ITS APPLICABILITY TO THE FIELDS OF SECURITY AND DEFENCE

Resumen

Las ciudades (o centros) históricos presentan un valor que trasciende más allá del meramente histórico o cultural, pudiendo ser considerados hitos de referencia para la propia memoria colectiva de sus habitantes. Dado su valor estratégico, resulta muy importante el desarrollo de líneas de investigación que permitan profundizar en su seguridad y conservación.

En este artículo planteamos una metodología propia para la generación de modelos digitales tridimensionales aplicado a los centros urbanos históricos. Esta metodología se basa en el uso combinado y complementario de técnicas de fotogrametría y láser escáner. Los modelos

finalmente obtenidos ofrecen una representación geoméricamente precisa y visualmente estética de los distintos edificios que pueden ser integrados en entornos virtuales y aplicados a la seguridad de las áreas urbanas históricas, especialmente vulnerables ante acciones bélicas o terroristas.

Palabras clave

Modelos virtuales 3D, ciudades históricas, defensa militar, fotogrametría, láser escáner, memoricidio, seguridad, urbicidio.

Abstract

Historical cities (or centers) show a value which goes beyond the properly historical or cultural, being considered as milestones for the own collective memory of its inhabitants. Because their strategic value, it is of paramount importance to develop research lines for increasing our knowledge about them.

In this article, we propose a proper methodology for the generation of three-dimensional digital models considering the characteristics of historical urban centers. This methodology is based on the combined and complementary use of photogrammetry and laser scanner. The models finally obtained for each building are geometrically precise and visually aesthetic. These models can be integrated into virtual environments, and used for safety of historical cities, which are especially vulnerable against war or terrorist actions.

Keywords

3D virtual models, historical cities, military defence, photogrammetry, laser scanner, memoricide, safety, urbicide.

Citar este artículo:

BALSA, J., y FRITSCH, «Modelización 3D de centros urbanos históricos y su aplicabilidad para la seguridad y la defensa». *Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos*. 2018, n.º 11, pp.

MODELIZACIÓN 3D DE CENTROS URBANOS HISTÓRICOS Y SU APLICABILIDAD PARA LA SEGURIDAD Y LA DEFENSA

INTRODUCCIÓN

Desde un punto de vista cuantitativo, la población mundial tiende a concentrarse cada vez más en áreas urbanas. Según estadísticas recientes publicadas por la ONU, a día de hoy, algo más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas. Aunque existen grandes diferencias si tenemos en cuenta la distribución de este porcentaje por regiones, lo cierto es que es una tendencia al alza a nivel global. Según previsiones de la propia ONU, aproximadamente dos tercios de la población mundial residirá en ciudades en el año 2050¹. Por esta razón, cada vez resulta más necesario desarrollar metodologías de investigación que permitan un conocimiento más profundo de las áreas urbanas, motivado por el dinamismo y la concentración de actividades (e intereses) dentro de las mismas.

La generación de modelos digitales tridimensionales en áreas urbanas es un tema de gran interés desde hace ya algunos años³. Un gran número de estudios se han centrado en distintos aspectos como, por ejemplo, las técnicas empleadas para la recogida de información, las diferentes metodologías de procesamiento de datos, el tipo de modelos generados y/o la relación entre la calidad del modelo digital y la aplicación final, entre otros⁴. La mayor parte de los estudios precedentes plantean metodologías para una monitorización constante de zonas de estudio a gran escala, optando para ello por métodos masivos de recogida de datos (generalmente basados en sistemas aerotransportados) y proponiendo unos modelos finales con bajo nivel de detalle⁵.

1 ONU: «Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo», Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU, 10 de julio de 2014, <http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

2 *Ibíd.*

3 BALSA-BARREIRO, José, y LERMA, José L.: «Aplicación de la tecnología del láser escáner aerotransportado (ALS) a la generación de modelos digitales urbanos», *Topografía y cartografía*, n.º 23 (136), 2006, pp. 3-8.

SHIODE, Narushige: «3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions», *GeoJournal*, n.º 52 (3), 2000, pp. 263-269.

4 BILJECKI, Filip; SOTER, Jantien; LEDOUX, H.; ZLATANOVA, Sisi, y ÇÖLTEKIN, Arzu: «Applications of 3D city models: State of the art review», *ISPRS International Journal of Geo-Information*, n.º 4 (4), 2015, pp. 2842-2889.

5 HU, Jinhui; YOU, Suya, y NEUMANN, Ulrich: «Approaches to large-scale urban modeling», *IEEE Computer Graphics and Applications*, n.º 23 (6), 2003, pp. 62-69. FRÜH, Christian, y ZAKHOR, Avideh: «Fast 3D model generation in urban environments». En: *IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2001, Baden-Baden (Alemania), pp. 165-170.

Sin embargo, una propuesta de trabajo alternativa puede ser planteada, por ejemplo, en áreas urbanas históricas, como son los cascos históricos o ciudades viejas. Estos espacios presentan una fisionomía particular determinada por el gran valor cultural de sus edificios, algunos de los cuales son percibidos como hitos por sus habitantes, y un entramado urbano propio que apenas ha sufrido cambios estructurales durante siglos.

La generación de modelos digitales tridimensionales en áreas urbanas históricas requiere de metodologías de trabajo propias para la obtención de unos modelos finales con alto nivel de detalle y buen nivel de realismo, que permitan conocer más en detalle estas áreas. Para ello, en la fase de adquisición de datos se requieren técnicas para la recopilación de información precisa de los edificios desde puntos situados a nivel de terreno y que además tengan en cuenta las dificultades propias de estas áreas. Entre las posibles aplicaciones de los modelos digitales obtenidos podemos mencionar la catalogación y preservación de edificios históricos, el planeamiento urbanístico, la seguridad urbana, además de otras relacionadas con la navegación y animación turística, etcétera.

En este artículo se presenta una metodología de trabajo propia. Con este objetivo presentamos nuestra experiencia de trabajo dentro del marco del proyecto de investigación europeo *4D-CH World*. Asimismo, discutiremos acerca del interés que puede tener la generación de modelos tridimensionales para la seguridad de las áreas urbanas históricas.

ANÁLISIS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA SEGURIDAD Y LA DEFENSA

Dentro de los ambientes urbanos merecen una especial significación sus centros o cascos históricos, alrededor de los cuales se ha articulado y expandido la ciudad actual. Estos centros históricos presentan un peso de carácter más cualitativo que cuantitativo, con un valor histórico que trasciende su propio valor cultural y económico (derivado de su propia explotación como recurso), llegando a ser percibidos como hitos que forman parte de la memoria colectiva de su pueblo. Por esta razón, las autoridades destinan grandes recursos para la conservación y preservación de estas áreas, consideradas de valor estratégico fundamental. Una prueba reciente del carácter estratégico de estos entornos históricos se constata en la relevancia mediática que el terrorismo cultural ha tenido durante las guerras de Afganistán (2001-2014), Irak (2003-2011) y Siria (2011-hoy), y ello a pesar de que la devastación ha sido generalizada en amplias regiones de estos países⁶.

Además, y de forma simultánea, debe considerarse la propia vulnerabilidad de gran parte de los elementos patrimoniales presentes en estas áreas históricas, para cuya conservación y mantenimiento las autoridades proponen políticas de seguridad propias.

6 DANTI, Michael D.: «Ground-Based Observations of Cultural Heritage Incidents in Syria and Iraq», *Near Eastern Archaeology*, n.º 78 (3), 2015, pp. 132-141.

Las amenazas naturales a las que el patrimonio arquitectónico está sometido nos resultan cotidianas y próximas. En 2015, parte del tejado de la iglesia de Castronuevo de los Arcos (Zamora) se desprendió debido al peso de los nidos de las cigüeñas que allí anidaban. Este ejemplo concreto no es un simple caso aislado⁷ sino que se ha convertido en una amenaza cada vez más frecuente debido a los cambios de hábitos de estas aves⁸. En 2013, el interior del santuario de A Virxe da Barca en Muxía (A Coruña), uno de los más emblemáticos de Galicia, fue calcinado por el impacto de un rayo. El resultado de las obras de rehabilitación, con un coste estimado de 750.000 euros⁹, fue ampliamente rechazado por sus vecinos¹⁰.

Pero más allá de las amenazas por causas naturales, existen otras directas debidas a la acción antrópica y relacionadas, especialmente, con situaciones de conflicto. Algunos autores hacen referencia al concepto de «urbicidio» (asesinato de la ciudad), entendido como la intensificación de los ataques sobre las ciudades y/o la propia la destrucción de las mismas. Este concepto fue popularizado por el exalcalde de Belgrado (Serbia), Bogdan Bogdanovic, al referirse al asedio constante y destrucción de algunas de las principales ciudades balcánicas (Vukovar, Sarajevo, Móstar y Dubrovnik) durante la guerra de Bosnia (1992-1995)¹¹. Mazzucchelli¹² apunta a que los objetivos dentro de esta guerra presentaban un carácter más simbólico que estratégico, dentro de un contexto de enfrentamiento entre el mundo rural, que representaba la identidad propia del país,

7 GENER, Mari P.: «Un nido de cigüeña hunde el tejado y cae sobre la bóveda de la iglesia de Andosilla», *Diario de Navarra*, 20 de enero de 2012, http://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/terrua_estella_valdizarbe/un_nido_ciguena_hunde_tejado_cae_sobre_boveda_iglesia_andosilla_65848_1006.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

—: «Un nido pone en peligro el tejado de la iglesia de las Carmelitas de Peñaranda», *La Gaceta de Salamanca*, 20 de enero de 2017, <http://www.lagacetadesalamanca.es/viva-mi-pueblo/penaranda-de-bracamonte/2017/01/20/nido-pone-peligro-tejado-iglesia-carmelitas/194892.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

8 REJÓN, Raúl: «La Iglesia declara a las cigüeñas una amenaza patrimonial para sus edificios», *Eldiario*, 18 de febrero de 2016, http://www.eldiario.es/sociedad/iglesia-considera-ciguenas-amenaza-patrimonial_o_485751680.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

9 «Un rayo incendia el emblemático santuario de Muxía, en A Coruña», *El País*, 25 de diciembre de 2013, http://elpais.com/elpais/2013/12/25/actualidad/1387984741_525895.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

10 A. M.: «El santuario de Muxía estrena su nueva imagen ante la indignación de los vecinos», *La Opinión de A Coruña*, 26 de diciembre de 2015, <http://www.laopinioncoruna.es/galicia/2015/03/26/santuario-muxia-estrena-nueva-imagen/940636.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

LADO, J. V.: «El naufragio de las obras de A Barca», *La Voz de Galicia*, 28 de marzo de 2015, http://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/carballo/muxia/2015/03/28/naufragio-obras-barca/0003_201503G28P16991.htm (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

11 FERNÁNDEZ-GALIANO, Luis: «Urbicidio balcánico», *El País*, 23 de julio de 1993, http://elpais.com/diario/1993/07/23/cultura/743378408_850215.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

12 MAZZUCHELLI, Francesco: «Cuando la guerra mata a la ciudad», *Esglobal*, 11 de abril de 2012, <https://www.esglobal.org/cuando-la-guerra-mata-a-la-ciudad> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

y el mundo urbano, que representaba el espacio cosmopolita y multicultural de ese mismo país. Se estima que solo en territorio bosnio fueron destruidos en torno a 180 pueblos y 560 mezquitas durante esta guerra¹³.

A pesar de la reciente popularización del concepto de «urbicidio», lo cierto es que este tipo de acciones destructivas sobre las ciudades no son nuevas. Mazzucchelli¹⁴ enumera una serie de ejemplos de ciudades saqueadas y destruidas a lo largo tanto de la historia antigua (Cartago en el siglo I a.C., Jerusalén en el siglo I d.C. y Milán en el siglo XII d.C.) como de la más reciente (Guernica, Dresde, Londres, Varsovia e Hiroshima en el siglo XX).

Los conflictos bélicos de los últimos años en Irak (2003-2011) y Siria (2011-hoy) han mostrado esta misma lógica del «urbicidio». De hecho, los ataques contra las ciudades y las zonas más densamente pobladas se han generalizado a partir de la II Guerra Mundial debido a las nuevas estrategias militares puestas en práctica basadas en el progresivo perfeccionamiento de la tecnología de ataque aéreo y en el uso de armas cada vez más destructivas. Todo ello ha situado a la ciudad como el objetivo principal de los ataques y ello, a pesar de los intentos teóricos como la Convención de Ginebra (1977), por frenar la destrucción masiva del patrimonio urbano y la muerte de población civil.

Además de los conflictos propiamente bélicos, la mayor parte de las acciones terroristas recientes en Occidente muestran unas pautas de comportamiento similar, aunque considerando un contexto de enfrentamiento asimétrico en el que un «lobo solitario» o un grupo minoritario intenta expandir el terror a gran escala y alcanzar un fuerte impacto mediático. Sirvan así de ejemplo los atentados yihadistas de Nueva York (2001), Madrid (2004), Londres (2005) o Bruselas (2016), los cuales tuvieron lugar en distintos escenarios urbanos.

El ataque contra los valores identitarios encarnados por la ciudad adquiere su máxima expresión cuando el objetivo de los ataques es la desmemorización del paisaje urbano y la aniquilación de su pasado («memoricidio»). Álvarez¹⁵, asesorada por un grupo de expertos, analizó cuáles eran las estrategias y objetivos militares de destrucción de las cinco ciudades más damnificadas desde finales del siglo XX. La ciudad de Sarajevo (Bosnia-Herzegovina), considerada como el ejemplo más paradigmático de «urbicidio» y «memoricidio» vivido durante la guerra de los Balcanes (1991-2001), fue una de ellas. Entre otros edificios simbólicos fueron destruidos el Museo Nacional, el Ayuntamiento, las mezquitas de Ferhadija y Ali Pasha, la Torre del Reloj y el mercado de Brusa. Sin embargo, es el ataque serbio a la Biblioteca Nacional (1992), en el que se perdieron más de 1,5 millones de volúmenes, el ataque a la memoria colectiva más importante en Europa desde el fin de la II Guerra Mundial. Por su parte, el continuo asedio a la ciudad de

¹³ *Ibid.*

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ ÁLVAREZ, Cristina: «Las 5 ciudades con más urbicidio», *Esglobal*, 9 de abril de 2012, <https://www.esglobal.org/las-5-ciudades-con-mas-urbicidio> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

Homs (Siria) durante los últimos años ha conllevado al cercado, aislamiento y destrucción programada de gran parte de sus barrios por parte del Ejército de Bashar al-Ásad. La estrategia en Grozni (Chechenia) seguida por Rusia (1994-1996 y 1999-2009) fue la reducción de la ciudad a escombros¹⁶ con objeto de reducir al enemigo y desanimar a la resistencia. Los territorios palestinos, principalmente los ubicados en la Franja de Gaza, fueron destruidos y rápidamente sustituidos por urbanizaciones israelíes con el objetivo de desestabilizar a Hamás. Por último, varias áreas a lo largo de la línea N-S que atravesaba Beirut (Líbano) fueron completamente destruidas durante la guerra civil vivida por el país (1975-1991), aprovechando una estrategia político-militar en la que se demonizaban los valores extranjeros y cosmopolitas que encarnaban ciertas partes de la ciudad.

La amenaza constante a la que están sometidos los entornos urbanos y, en especial, sus edificios históricos más representativos justifican la necesidad de desarrollar estrategias para un conocimiento profundo de los mismos desde una perspectiva civil y militar. La alta densidad edificatoria, la superposición de elementos, la disposición de viviendas en distintos niveles y/o alturas, la presencia de cambios abruptos, etcétera, son algunos de los factores que ponen de manifiesto la complejidad de las ciudades¹⁷. Además, en el caso de centros o cascos históricos deben considerarse otros como la irregularidad del entramado urbano, la presencia numerosa de calles estrechas y zonas de acceso restringido, etcétera, todos los cuales convierten estos entornos en escenarios muy complejos para el desarrollo de estrategias militares como el establecimiento de líneas de visión, el diseño de vías de evacuación, el posicionamiento de enclaves estratégicos, la evaluación de posibles puntos de amenaza, la ubicación de sistemas de transmisiones y comunicaciones, etcétera.

Las operaciones militares en ambientes urbanos (UO¹⁸ o MOUT¹⁹) resultan muy complejas desde un punto de vista tanto táctico como operacional, debido a la aglomeración de civiles y la presencia de edificaciones. El campo de batalla se convierte en un escenario tridimensional muy complicado para todo tipo de maniobras militares, dentro del cual se reduce la libertad de movimientos y se incrementan exponencialmente los riesgos. Desde un punto de vista táctico, los ambientes urbanos facilitan la defensa y dificultan el ataque, limitando la efectividad de las armas pesadas y favoreciendo modos de combate en espacios cerrados (CQC).

Algunos estudios consideran la importancia de desarrollar modelos 3D en áreas urbanas como base para actuaciones estratégicas de defensa, las cuales van más allá de

16 COWARD, Martin: «Urbicide. The Politics of Urban Destruction». Routledge: Londres (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos), 2009, 176 pp.

17 LIVINGSTON, Mark A; ROSENBLUM, Lawrence J.; JULIER, Simon J.; BROWN, Dennis; BAILLOT, Yohan; SWAN II, J. Edward; GABBARD, Joseph L., y HIX, Deborah: «An Augmented Reality System for Military Operations in Urban Terrain». En: *National Training and Simulation Association*, 2002, Arlington, Estados Unidos, pp. 868-875.

18 *Urban Operations*.

19 *Military Operations in Urban Terrain*.

las estrictamente militares, tales como la evacuación de población en caso de desastres o el suministro de ayuda humanitaria²⁰. Sin embargo, ninguno de estos estudios precedentes se centra especialmente en centros y/o ciudades históricas a pesar de contar con una serie de características y condicionantes propios. Además, la mayoría de estudios precedentes apuesta por aplicaciones basadas únicamente en sistemas LiDAR aerotransportado, los cuales permiten definir la geometría precisa de todo el entramado urbano²¹. Sin embargo, estos sistemas no permiten obtener información clara de las fachadas de los edificios, lo que desde un punto de vista militar supone el desconocimiento de información relevante tales como la posición de puertas y ventanas de salida e incluso de los materiales empleados.

GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES 3D. ESTUDIO DE UN CASO CONCRETO

A continuación, en los siguientes puntos, presentamos un estudio propio centrado en la generación de modelos digitales tridimensionales en áreas urbanas históricas, incluyendo los aspectos más relevantes acerca del área de estudio (3.1), del proyecto europeo dentro del cual se enmarca este estudio (3.2), además de la metodología y flujo de trabajo completo (3.3) seguido para la generación de dichos modelos.

Área de estudio

La ciudad de Calw está localizada en el límite norte de la Selva Negra y relativamente próxima (aproximadamente 50 km) a la ciudad de Stuttgart, la actual capital del Estado Federado de Baden-Württemberg (figura 1). La ciudad tiene actualmente unos 23.000 habitantes y es el núcleo más representativo de su distrito o *landkreiss* (797,5 km²), el cual cuenta con unos quince municipios y un total de unos 155.000 habitantes²².

20 LETORNEAU, François: «Different Approaches for the Creation and Exploitation of 3D Urban Models». En: *7th International Command and Control Research Technology Symposium*, 2002, Quebec City (Canadá).

NATO: «3D Modelling of Urban Terrain». RTO Technical Report (RTO-TR-SET-118). North Atlantic Treaty Organisation: Neuilly sur Seine (Francia), 2011, 118 pp.

21 PFEIFLE, Sam: «Using lidar in Afghanistan», *Spar3d*, 28 de julio de 2011, <http://www.spar3d.com/blogs/head-in-the-point-clouds/using-lidar-in-afghanistan> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

WALSH, David: «Warfighters reap benefits of LIDAR mapping technology», *Defence Systems*, 26 de julio de 2011, <https://defensesystems.com/ARTICLES/2011/07/18/TECH-WATCH-GEOINT-LIDAR.ASPX?PAGE=1> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

22 La ciudad de Stuttgart es la actual capital de la región de Baden-Württemberg. Esta región es la tercera más poblada de Alemania con unos 10,8 millones de habitantes.

A día de hoy, Calw cuenta con un conjunto numeroso de vestigios pasados. Entre ellos las ruinas del monasterio de Hirsau o el propio casco histórico de la ciudad. El viejo Calw presenta hoy en día un número muy considerable de viviendas tradicionales (propias de la arquitectura de su región) en un buen estado de conservación. Además, al valor histórico y simbólico de esta ciudad contribuye el hecho de que en ella nació el escritor Herman Hesse (1877-1962), Premio Nobel de Literatura en el año 1946 y uno de los grandes referentes de la literatura alemana.

La ciudad histórica ocupa una extensión aproximada de unos 100.000 m² y está situada en la margen derecha del río Nagold. Sobrevive como centro comercial y de servicios de los municipios circundantes y, en cierta parte, gracias a un turismo atraído por hitos como la iglesia de *St. Peter und Paul*, la casa natal de Herman Hesse y el museo dedicado a su figura, además de todo el conjunto histórico-arquitectónico de su casco antiguo (figuras 1 y 2).



Imagen 1: (a) Localización geográfica del área estudiada. (b) Imagen aérea de la ciudad histórica de Calw²³

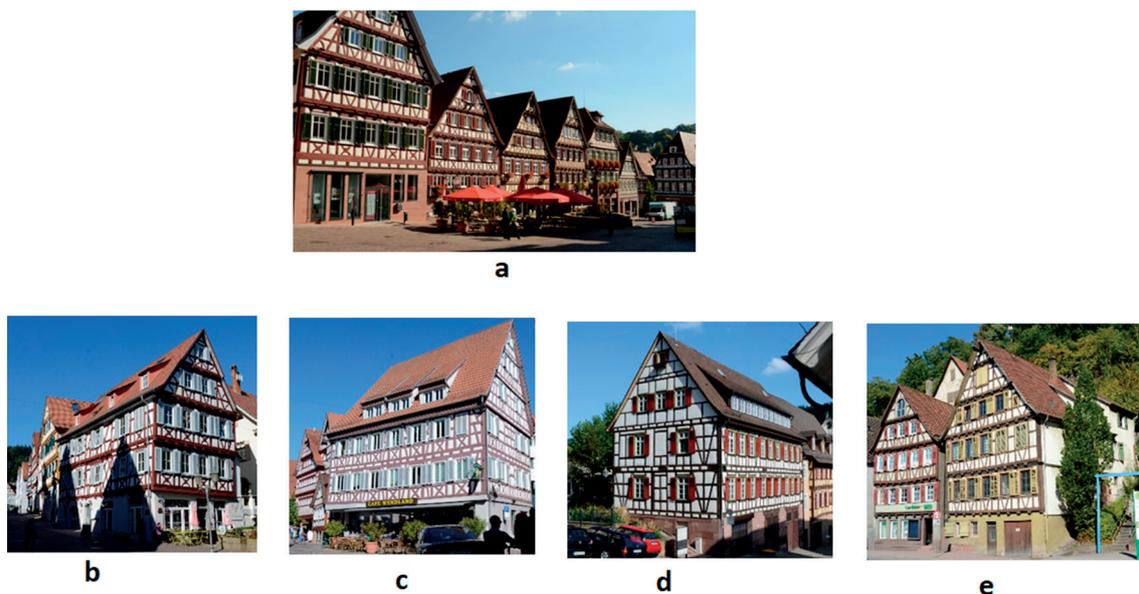


Imagen 2: (a) Perspectiva general del entorno de Marktplatz y (b-e) de algunos edificios históricos del viejo Calw

23 Stadt Calw, 2017. Página web del Gobierno local de Calw (Sección *City Portrait*): <http://www.calw.de/city-portrait> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

El proyecto four dimensional cultural heritage world (4D-CH World)

El proyecto 4D-CH World²⁴ está centrado en el análisis, diseño, investigación, desarrollo y validación de un sistema innovador que integre los últimos avances en *computer vision* para la generación de modelado 3D y realidad virtual con el objetivo de generar modelos 3D y 4D²⁵ de una forma rápida y efectiva a partir de imágenes personales. Este proyecto comparte los objetivos de European Commons y las librerías digitales EUROPEANA²⁶ y UNESCO Memory of the World (MoW)²⁷ para la reconstrucción de una identidad e historia de la cultura europea.

El principal objetivo de este proyecto es permitir a historiadores, arquitectos, arqueólogos, planificadores urbanos y otros científicos reconstruir, estudiar, entender, preservar y documentar ambientes urbanos a partir de datos almacenados en repositorios. Para ello, el proyecto debe llevar a cabo una completa organización espacio-temporal de extensas colecciones de imágenes históricas, que sirvan como base para la generación de modelos digitales 4D, los cuales permiten al usuario visualizar de forma clara la influencia del paso del tiempo sobre el patrimonio cultural. Además de para entender el pasado, el sistema implementado en este proyecto permite analizar ciertos factores y simular escenarios adaptados a las demandas futuras. Otras aplicaciones concretas pueden ser planteadas a partir una visualización diferente e integral de la historia, las cuales permitan decidir políticas de renovación y preservación más armónicas y sostenibles.

En los últimos años, el Institut für Photogrammetrie²⁸ (de aquí en adelante IFP) ha centrado parte de su interés científico en el desarrollo de metodologías de trabajo para la preservación digital de edificios históricos. Como *partner* del proyecto *4D-CH World*, el IFP ha llevado a cabo un estudio piloto en el centro histórico de Calw centrado en la investigación y desarrollo de este proyecto²⁹. Los trabajos de investigación de varios estudiantes del Máster Internacional GeoEngine³⁰ han estado centrados en

24 4D-CH World, 2017. Página web del Proyecto Europeo *Four Dimensional Cultural Heritage World*: <http://www.4d-ch-world.eu> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

25 La modelización 4D es similar a la 3D, aunque considerando adicionalmente la variable temporal.

26 EUROPEANA, 2017. Página web de EUROPEANA Collections: <http://www.europeana.eu> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

27 UNESCO MoW, 2017. Página web de *UNESCO Memory of the World*: <http://www.unesco.org/new/en/communication-and-information/memory-of-the-world> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

28 IFP, 2017. Página web del Institut für Photogrammetrie de la Universidad de Stuttgart (Alemania): <http://www.ifp.uni-stuttgart.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

29 BALSABARREIRO, José, y FRITSCH, Dieter: «Generation of 3D/4D photorealistic building models. The testbed area for 4D Cultural Heritage World Project: The historical center of Calw (Germany)», *Lecture Notes in Computer Science*, n.º 9.474, 2015, pp. 361-372.

30 Master of Science Program GeoEngine, 2017. Página web del *Programa Master of Science GeoEngine* de la Universidad de Stuttgart: <http://www.geoengine.uni-stuttgart.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

ciertas áreas del casco histórico, tales como la *Marktplatz*, el entorno de *Alburgerstrasse*, *Lederstrasse* e *Im-Zwinger*³¹. Hasta ahora el área estudiada es de aproximadamente unos 50.000 m² en superficie, la cual comprende un conjunto numeroso de edificios históricos que ya supera el centenar (figura 3). Entre los edificios e hitos más representativos de los que ya se han generado modelos digitales podemos destacar la iglesia evangélica de *St. Peter und Paul*, la *casa consistorial* o la casa natal de Herman Hesse, además del puente de *Sankt Nikolaus*.



Imagen 3: Delimitación del área actualmente estudiada dentro de este proyecto

Metodología

Los principales aspectos relativos a la metodología empleada dentro de este estudio piloto pueden ser explicados y englobados dentro de dos fases de trabajo principales, relativas a la adquisición y al procesamiento de los datos.

Fase de adquisición de datos

Para la recogida de datos se emplearon dos sistemas independientes. Por un lado, un equipo de láser escáner terrestre de la casa *Leica*, además de una cámara fotográfica semiprofesional, modelo *Ricoh GXR*.

El sistema *Leica Scan-Station P20*, propiedad del IFP, fue empleado para el escaneado (láser) del área de estudio. Este sistema permite un escaneo de 360 grados en horizontal y de 270 grados en vertical, tomando como referencia un punto de estacionamiento fijo. El alcance máximo para la medición de distancias con este sistema es de

31 En la bibliografía se incluyen las referencias a todas las *Master Thesis (Programa Master of Science GeoEngine)* presentadas dentro de este proyecto.

unos 120 metros, emitiendo frecuencias de hasta un millón de puntos por segundo³². Uno de los principales puntos considerados para la elección de este sistema fue que el haz de luz emitido era seguro para el ojo humano, lo cual tenía bastante importancia teniendo en cuenta que el área estudiada es bastante transitada. Respecto al proceso de captura de datos por parte del sistema se optó por niveles de resolución y precisión medio-altos, los cuales permitieron alcanzar una relación eficiente entre los tiempos requeridos para el escaneado y las densidades de puntos obtenidas.

Para la captura de imágenes se empleó una cámara digital *Ricoh GXR*, también propiedad del IFP. Este modelo de cámara es un sistema compacto que permite intercambiar distintas unidades. La lente empleada fue una *Carl Zeiss Lens Biogon 2.8/21 ZM*. Para la toma de imágenes se optó por la opción de prioridad de apertura y distancia focal infinita. Se empleó adicionalmente un trípode y un monopie para la estabilización de la cámara durante la toma de imágenes.

Además de las imágenes tomadas sobre el terreno, se emplearon varias imágenes aéreas del conjunto de la ciudad histórica de Calw. Estas imágenes fueron usadas para la reconstrucción de los tejados y partes superiores de los edificios, de donde no era posible extraer información desde el terreno.

Durante la fase de recogida de datos se emplearon dos sistemas de adquisición de la información, basados en los principios de (a) la telemetría láser y (b) la fotogrametría. Los sistemas de medición o telemetría láser actualmente empleados comprenden un amplio rango de equipos que pueden ser clasificados en función de múltiples criterios³³. Uno de los más habituales es en función de la plataforma sobre la que va montada el equipo de medición, pudiendo distinguirse así entre sistemas (a) aerotransportados y (b) terrestres.

En función de la aplicabilidad principal para la que están diseñados, las especificaciones técnicas de estos sistemas muestran ciertas diferencias. Sin embargo, aunque muchos de estos equipos puedan presentar cierta complejidad y/o aparatosidad, su principio de funcionamiento resulta bastante trivial³⁴. Estos sistemas emiten un haz de luz láser de forma continuada, normalmente en forma de pulsos, los cuales son reflejados por un sistema de espejos que están insertados dentro del aparato. Estos espejos pueden estar dispuestos en distintas formas y posiciones, determinando así diferentes patrones de barrido³⁵. Final-

32 Leica Geosystems AG, 2014. Especificaciones técnicas del equipo *Leica ScanStation P20*: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation_P20/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_P20_DAT_en.pdf (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

33 Balsa-Barreiro, José, y Lerma, José L.: «La tecnología LiDAR: una visión general», *Topografía y cartografía*, n.º 23 (135), 2006, pp. 28-32.

34 Baltsavias, Emmanuel P.: «Airborne laser scanning: basic relations and formulas», *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, n.º 54, 1999, pp. 199-214.

35 Balsa-Barreiro, José, y Lerma, José L.: «La tecnología LiDAR: una visión general», *Topografía y cartografía*, n.º 23 (135), 2006, pp. 28-32.

mente, estos sistemas permiten obtener información tridimensional sobre la superficie de un objeto en forma de nubes de puntos, las cuales ofrecen información tanto geométrica como radiométrica (figura 4). La estimación de los valores de distancia para cada punto permite determinar sus coordenadas tridimensionales (XYZ) respecto a un sistema de coordenadas local, cuyo origen se sitúa en el punto de estacionamiento del propio equipo.

Los equipos de láser escáner permiten realizar barridos de áreas muy amplias durante periodos cortos de tiempo. De esta forma se puede determinar la posición y geometría concreta de cualquier elemento dentro del espacio tridimensional. Si nos referimos en particular a los sistemas terrestres de láser escáner (TLS), estos se emplean fundamentalmente en barridos desde distintas posiciones estáticas a nivel del suelo. Principalmente, los equipos de este tipo suelen ser empleados en arqueología, arquitectura, ingeniería civil, además de en ciertas aplicaciones industriales como en mantenimiento de equipos, análisis de tuberías y conducciones de gas, entre otras³⁶.

En el proyecto llevado a cabo en Calw el objetivo de esta primera fase era la adquisición completa de datos relativos a la fachada de todos los edificios históricos de la ciudad. Por esta razón se planteó un barrido completo (360°) desde diferentes posiciones estáticas, cuyas localizaciones fueron previamente analizadas en gabinete. Sin embargo, ciertas características del área estudiada y el ambiente eventual alrededor de la estación en el momento del escaneado pudieron influir y/o limitar parcialmente el proceso de recogida de datos. De hecho, la aparición de ruido derivado del continuo paso de personas o vehículos, junto a la presencia de ciertos elementos habituales en áreas urbanas (árboles, señales, etcétera), obstaculizaron el campo de visión del equipo y/o degradaron la calidad de los datos escaneados. Por esta razón, dependiendo del área y del momento en el que tenía lugar el barrido, el número de estaciones y su ubicación concreta pudo ser distinto al inicialmente previsto.

Una buena planificación previa a la captura de datos permite optimizar los recursos, reducir los tiempos de captura, incrementar el volumen y mejorar la calidad de los datos finalmente obtenidos. Durante esta misma fase el personal debe además evaluar el uso y la localización de «dianas» empleadas para el ensamblaje de las nubes de puntos obtenidas desde las distintas estaciones. La destreza y la familiaridad con el área estudiada por parte del técnico llevan a optimizar, en mayor o menor medida, los recursos empleados. En cualquier caso, una buena planificación previa de la fase de escaneado láser permite minimizar y reducir la frecuencia de aparición de *gaps* en las nubes de puntos (figura 4).

Los datos recogidos desde cada estación fueron registrados en un sistema de coordenadas local, cuyo origen corresponde con el punto en el que se localiza el equipo. Para el barrido de áreas extensas se requiere de una toma de datos desde varias ubicaciones, las cuales permiten obtener distintas nubes de puntos georreferenciadas en sistemas propios de coordenadas locales. Posteriormente, las diferentes nubes de puntos deben

36 GrindGIS, 2015: «LIDAR Data 50 Applications and Uses- It is important», GrindGIS, 18 de agosto de 2015, <http://grindgis.com/data/lidar-data-50-applications> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

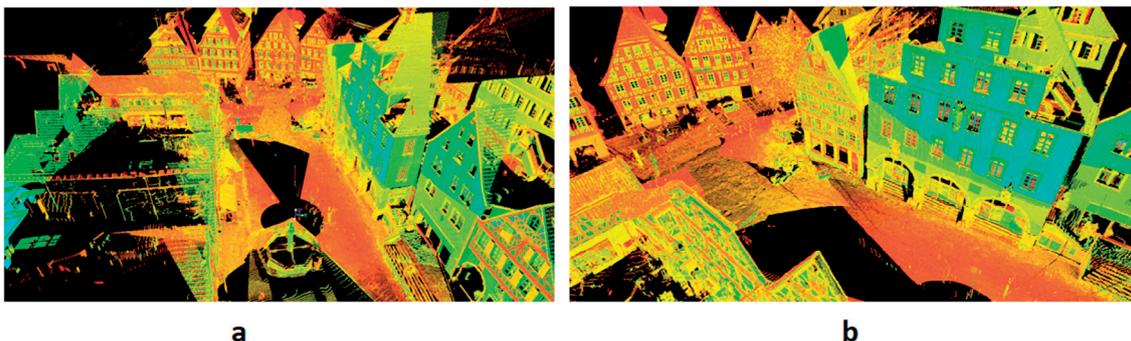


Imagen 4: (a-b) Nube de puntos obtenida del escaneo desde un punto de estacionamiento concreto. Obsérvese además la presencia de zonas sombreadas debido a limitaciones en el campo de visión del equipo láser

ser ensambladas para obtener una nube de puntos láser única y completa de toda el área estudiada. Con este objetivo, se colocaron un mínimo de tres dianas visibles desde estaciones sucesivas, las cuales fueron posteriormente empleadas como puntos de referencia para el ensamblaje de las distintas nubes de puntos.

Técnicas fotogramétricas

La fotogrametría permite determinar las propiedades geométricas de diferentes objetos a partir de imágenes fotográficas. Mediante técnicas fotogramétricas es posible obtener información 3D en el «espacio objeto» partiendo de información 2D propia del «espacio imagen». Para ello, las imágenes deben ser previamente posicionadas, orientadas y rectificadas. En función de la distancia a la que se trabaje puede hablarse de fotogrametría (a) cercana y (b) lejana, esta última referida principalmente a la aérea.

El proceso de reconstrucción de objetos 3D a través de fotogrametría se basa en la generación de nubes tridimensionales de puntos a partir de pares de imágenes estéreo (*multi-view stereo*). Para determinar las coordenadas tridimensionales de un punto cualquiera en el espacio es necesario disponer de un conjunto de imágenes sobre un mismo punto capturadas desde distintas posiciones. A una escala mayor se aplican técnicas de correspondencia de imágenes para localizar puntos comunes en distintas imágenes.

La configuración de las imágenes es importante para la obtención de resultados de calidad. Por esta razón, los lugares desde donde se toman las imágenes deben ser previamente evaluados y analizados. Para encontrar características homólogas en las sucesivas imágenes suele emplearse el operador *SIFT*, el cual permite determinar las orientaciones y posiciones concretas desde las cuales fueron tomadas las imágenes sucesivas³⁷. Posteriormente, se lleva a cabo un ajuste de bloques de todas las imágenes, proceso a partir del cual es posible determinar una nube de puntos 3D de baja densi-

³⁷ LINGUA, Andrea; MARENCHINO, Davide, y NEX, Francesco: «Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications», *Sensors*, 2009, n.º 9 (5), pp. 3745-3766.

dad. Dentro de este proceso, suele emplearse un estimador de robustez *RANSAC* para el filtrado de errores³⁸.

Aunque esta nube de puntos permite intuir la forma del objeto escaneado, su densidad es demasiado baja para una reconstrucción precisa. Por esta razón, y en un segundo paso, son aplicadas de nuevo técnicas de correspondencia de imágenes para obtener una nube de puntos mucho más densa, en la cual puedan distinguirse más claramente los principales detalles del objeto escaneado. El *software SURE*, desarrollado por el IFP, es empleado para la densificación de las nubes de puntos a partir de pares fotogramétricos³⁹. La entrada requerida por el *software* es un conjunto de imágenes orientadas, las cuales son rectificadas en un primer paso. En un segundo paso, *SURE* selecciona aquellos pares de imágenes más adecuados para establecer un proceso de correspondencia de forma similar a como lo hace el algoritmo *Semi-Global Matching (SGM)*. Finalmente, el resultado obtenido es una nube de puntos densa (en formato LAS o similar), con niveles de resolución de un punto 3D por píxel. Esta nube de puntos permite obtener una representación muy precisa del objeto escaneado, la cual es perfectamente válida para tareas de modelado 3D.

Fotogrametría cercana

Dentro de esta técnica suelen considerarse aquellas fotografías que son tomadas desde una distancia inferior a los 300 metros. Esta técnica fotogramétrica se emplea principalmente para la obtención de renderizados 3D de pequeños objetos. La fotogrametría cercana permite la reconstrucción de pequeñas piezas en arqueología y arquitectura, modelado y fabricación de piezas industriales, e incluso puede ser empleada para la evaluación y cuantificación de daños materiales en vehículos ocurridos en siniestros⁴⁰.

La fotogrametría cercana permite complementar el proceso de recogida de datos de los sistemas láser. Así, dentro del marco de este mismo proyecto, Li⁴¹ empleó técnicas de fotogrametría cercana para la obtención de información en ciertas fachadas o áreas

38 HAN, Lina; CHONG, Yanwen; LI, Yuanting, y FRITSCH, Dieter: «3D Reconstruction by combining terrestrial laser scanner data and photogrammetric images». En: *Proceedings of the Asia Assoc. of Remote Sensing*, 2014, Nay Pyi Taw, Myanmar.

39 WENZEL, Konrad; ROTHERMEL, Mathias; HAALA, Norbert, y FRITSCH, Dieter: «SURE - The IFP software for dense image matching». *Photogrammetric Week '13*, Ed. D. Fritsch, Wichmann: Berlin/Offenbach (Alemania), pp. 59-70.

40 LUHMANN, Thomas; ROBSON, Stuart, y KYLE, Stephen: «Close range photogrammetry: principles, techniques and applications». Whittles: Dunbeath (Reino Unido), 2007, 528 pp.

41 LI, Jing (supervisada por FRITSCH, Dieter, y KHOSVARANI, Ali M.): «High definition modeling of Calw, Badstrasse and its Google Earth' integration», Master Thesis, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2014.

concretas, debido a las limitaciones físicas que se encontró para estacionar el equipo de láser escáner en ciertas partes del lecho del río Nagold, en Calw.

A partir de esta experiencia concreta y otras similares se opta por una toma completa de imágenes de la mayor parte de los edificios históricos de la ciudad. Esta toma abarca la completa extensión de las fachadas de dichos edificios desde un gran número de posiciones y considerando un número amplio de perspectivas. Entre las sucesivas imágenes deben existir altos niveles de solape que permitan enlazar las mismas mediante una serie de puntos, asegurando así una reconstrucción tridimensional de los objetos mediante técnicas fotogramétricas.

Fotogrametría lejana o aérea

El uso de equipos de láser escáner terrestre desde puntos terreno permite obtener datos de las fachadas de edificios, aunque estos sistemas presentan limitaciones para la obtención de información de las partes altas y/o tejados de dichos edificios (figura 4). La fotogrametría aérea complementa al láser escáner terrestre, permitiendo obtener información tridimensional en áreas donde no pudo ser inicialmente obtenida. Las nubes de puntos obtenidas por fotogrametría aérea permiten llevar a cabo una reconstrucción plena del paisaje urbano incluyendo, además de los tejados, áreas interiores del entramado urbano cuyo acceso terrestre suele ser restringido.

Para la aplicación de estas técnicas se emplean varias imágenes aéreas del centro de la ciudad de Calw, las cuales fueron suministradas por el *Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung*⁴². Estas imágenes cuentan con coordenadas georreferenciadas de los centros de proyección y ángulos de orientación y presentan una *Ground Sampling Distance (GSD)* de 10 cm.

El procesamiento de estas imágenes en *SURE* comprende dos pasos. En el primero, las imágenes aéreas son corregidas de distorsión y rectificadas por pares. En el segundo, se seleccionan pares adecuados de imágenes a los que se aplica un algoritmo similar al *Semi-Global Matching (SGM)*. Finalmente, se generan unas nubes densas de puntos con un espaciamiento de 10 cm, el cual corresponde a un punto 3D por píxel. La nube de puntos generada por fotogrametría aérea sirve además de referencia para las nubes de puntos obtenidas con láser escáner.

Fase de procesamiento de datos

Una vez que la información es adquirida con los distintos métodos, se obtiene un gran volumen de datos representado espacialmente en forma de «nubes de puntos».

42 LGL-BW, 2017. Página web del Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung de Baden-Württemberg: <https://www.lgl-bw.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

Esta información es procesada en dos pasos de trabajo sucesivos: (a) el registro y (b) el modelado/texturizado 3D de las nubes de puntos.

En cuanto al software, *Cyclone*⁴³ fue empleado para el proceso de registro de las nubes de puntos láser, además de para modelado CAD junto con *Autodesk 3ds Max*⁴⁴. Para la generación de nubes de puntos a partir de imágenes se emplearon los programas *PhotoScan*⁴⁵ y *SURE*⁴⁶. Una vez obtenidos los modelos, se empleó *Photoshop*⁴⁷ para la edición y preparación de texturas, las cuales son insertadas en el modelo CAD usando *Sketchup*⁴⁸. Finalmente, la integración de los modelos 3D de edificios en un ambiente virtual se llevó a cabo en *Unity*⁴⁹.

Registro de nubes de puntos

El registro de las nubes de puntos es un proceso mediante el cual se lleva a cabo el ensamblaje de las sucesivas nubes de puntos. En el caso concreto de este proyecto, el ensamblaje se hace en dos etapas sucesivas: (a) entre las nubes de puntos obtenidas con láser escáner para obtener una única, y (b) esta última con la nube de puntos obtenida mediante técnicas de fotogrametría aérea. El *software Cyclone* permite llevar a cabo este registro de las nubes de puntos obtenidas con láser escáner.

Como resultado de la aplicación de este procedimiento a la información del láser escáner se obtiene una nube de puntos completa de todo el bloque externo de edificios, incluyendo además el área vecina circundante. Sin embargo, la información relativa a la parte interior y/o superior de todo este bloque de edificios no pudo ser obtenida debido a las propias restricciones de acceso físico. Estas lagunas de información no se limitan exclusivamente a estas áreas, sino que también pueden aparecer en parte de las fachadas de los edificios debido a la presencia de árboles u otros elementos que pudieron obstaculizar el haz de luz láser en el momento del barrido. Por esta razón, la

43 Leica Geosystems AG, 2017. Página web de la empresa Leica Geosystems AG: <http://leicageosystems.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

44 Autodesk Inc., 2017. Página web de la empresa Autodesk Inc.: <http://www.autodesk.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

45 Agisoft LLC, 2017. Página web de la empresa Agisoft LLC: <http://www.agisoft.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

46 nFrames GmbH, 2017. Página web de la empresa nFrames GmbH: <http://www.nframes.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

47 Adobe Systems Inc., 2017. Página web de la empresa Adobe Systems Incorporated: <http://www.adobe.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

48 Trimble Inc., 2017. Página web de la empresa Trimble Inc.: <http://www.trimble.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

49 Unity Techn., 2017. Página web de la empresa Unity Technologies: <https://unity3d.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

nube de puntos anterior debe ser unida a la obtenida por fotogrametría, la cual contiene información de la parte superior de los edificios (figura 5.a).

La nube de puntos generada por fotogrametría aérea está georreferenciada en el sistema de coordenadas *Gauss-Krueger*, el cual se emplea como sistema de referencia común a todas las nubes de puntos mediante un proceso que se denomina «transformación». Para ello las diferentes nubes generadas deben ser combinadas y encajadas en posición, orientación y escala, aplicando una transformación 3D Helmert de siete parámetros, que comprenden tres translaciones (T), tres rotaciones (R) y un factor de escala (λ). Para el cálculo de estos parámetros un sistema de más de siete ecuaciones debe ser planteado, siendo en la práctica requeridos, al menos, tres puntos comunes entre las distintas nubes de puntos.

Generalmente, la localización de estos puntos comunes en las respectivas nubes de puntos debe hacerse de forma manual, lo que puede llevar a resultados poco óptimos. Por esta razón suele optarse como alternativa por aplicar el algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)* para obtener un mejor resultado⁵⁰. Es importante constatar que este procedimiento es únicamente válido si las nubes de puntos presentan geometrías similares y están parcialmente alineadas⁵¹.

Finalmente, y como resultado de la combinación de las diferentes nubes de puntos, se obtiene una única (y completa) nube de puntos de toda el área, la cual será empleada en pasos posteriores para tareas de modelado 3D (figura 5.b).

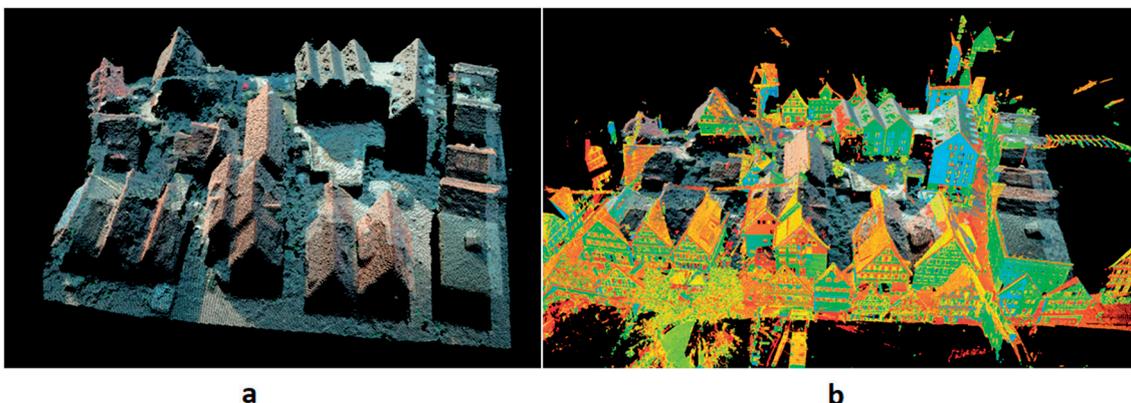


Imagen 5: (a) Nube de puntos obtenida por fotogrametría aérea. (b) Nube de puntos finalmente obtenida después de los procesos de registro y transformación

Modelado y texturizado 3D

El proceso de modelado 3D en *Cyclone* permite obtener una reconstrucción simplificada de cada uno de los edificios. Con objeto de homogeneizar criterios y reque-

50 BESL, Paul J., y McKAY, Nail D.: «A method for registration of 3-D shapes», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, n.º 14 (2), 1992, pp. 239-256.

51 HAN, Lina; CHONG, Yanwen; LI, Yuanting, y FRITSCH, Dieter: «3D Reconstruction by combining terrestrial laser scanner data and photogrammetric images». En: *Proceedings of the Asia Assoc. of Remote Sensing*, 2014, Nay Pyi Taw (Myanmar).

rimientos, el *Open Geospatial Consortium (OGC)* ha definido un modelo de datos propio denominado *CityGML* que define cinco niveles de representación de modelos 3D que van desde el *LoD-0* al *LoD-4* (ambos incluidos) en un sentido creciente en función del nivel de detalle representado⁵². Para la reconstrucción y mejora de los modelos se emplean *SketchUp* y *Autodesk 3ds Max*, los cuales presentan herramientas de modelado óptimas que permiten redefinir e incorporar detalles a los modelos obtenidos con *Cyclone*.

Una vez definida la geometría de los modelos, el siguiente paso es la incorporación de texturas. Para ello se emplean imágenes rectificadas tanto geométrica como radiométricamente. Cualquier *software* de edición de imágenes, como *Photoshop*, permite seleccionar el área de interés de las fotografías respecto a cada una de las primitivas geométricas definidas, además de rectificar la geometría y ajustar la radiometría de aquellos parámetros y/o elementos de interés. Una vez que las texturas son preparadas, estas son cuidadosamente pegadas y ajustadas sobre cada una de las caras del modelo CAD, siendo obtenido finalmente un modelo 3D fotorrealista de cada uno de los edificios.

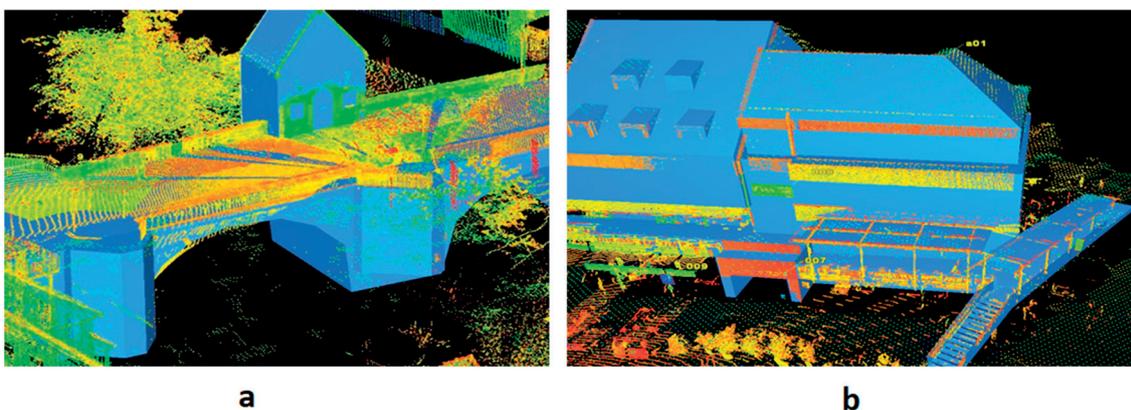


Imagen 6: (a-b) Proceso de modelado CAD a partir de la nube de puntos

RESULTADOS

Como resultado del paso anterior se obtiene un modelo 3D texturizado de cada uno de los edificios de la zona de estudio. Algunos ejemplos concretos se muestran en las figuras 7.a-c. Estos modelos individuales son agrupados de forma conjunta e integrados en un ambiente virtual que representa el conjunto de la ciudad histórica de Calw. Para ello se emplea el *software Unity*, el cual permite obtener una visualización realista y dinámica de todo el conjunto (figura 8). Una óptima ejecución del modelo virtual finalmente obtenido requiere una buena resolución y bajos niveles de peso computacional. Prueba de ello es que el peso del archivo obtenido para el conjunto del área estudiada hasta el momento está por debajo de los 25 MB.

52 KOLBE, Thomas H.; GRÖGER, Gerhard, y PLÜMER, Lutz: «CityGML - Interoperable access to 3D city models». En: *International Symposium on Geo-Information for Disaster Management GI4DM*, 2005, Delft, Netherlands, pp. 21-23.

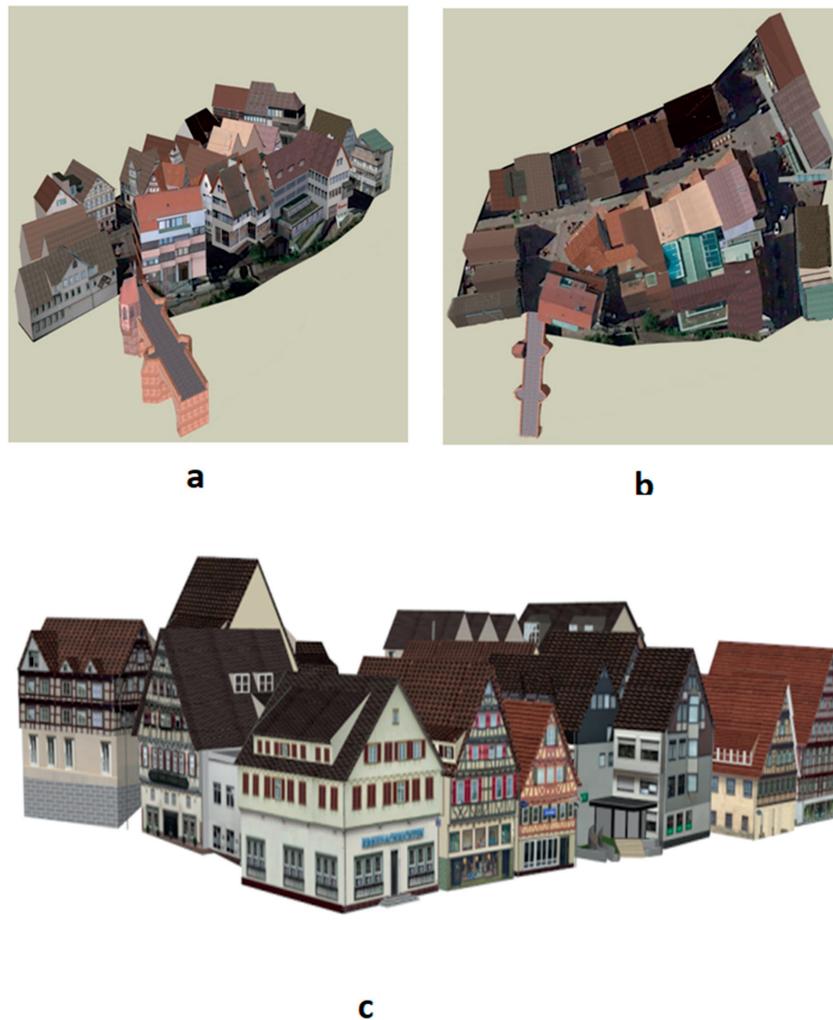


Imagen 7: (a-b) Modelos obtenidos en ciertas áreas de la ciudad histórica de Calw, como (a-b) la del sector de Badstrasse, y (c) el sector definido por Calw Market Square y Lederstrasse. Fuente: a-b⁵³, c⁵⁴



Imagen 8: (a-b) Integración de los modelos 3D obtenidos en un entorno virtual

53 LI, Jing (supervisada por FRITSCH, Dieter, y KHOSVARANI, Ali M.): «High definition modeling of Calw, Badstrasse and its Google Earth’ integration», Master Thesis, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2014.

54 WANG, Yiwon (supervisada por FRITSCH, Dieter, y Balsa-Barreiro, José): «Digital preservation of Calw Market Square-Lederstrasse (I) by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», Master Thesis, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2015.

APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DIGITALES 3D EN SEGURIDAD Y DEFENSA

La modelización 3D puede ser aplicada en políticas de seguridad y defensa a diferentes escalas. Estos modelos integrados en entornos virtuales permiten alcanzar un nivel de visualización más dinámica y realista en áreas con gran valor patrimonial y cultural, como son los centros históricos de ciudades y/o, en su defecto, de (únicamente) sus edificios más representativos.

Sobre estos modelos es posible planificar *a priori* estrategias y técnicas militares, no solo aplicables a los efectivos humanos, sino también a los equipos robóticos o autónomos⁵⁵, cuya configuración y misión en el terreno necesita una cierta planificación de rutas. Además, la generación de modelos 3D fotorrealistas de gran detalle en su definición gráfica permite evaluar las estructuras y materiales empleados en las distintas edificaciones, lo que presenta una gran importancia en la puesta en marcha de tácticas militares como el *mouse-holing*, que consiste en la creación de túneles y espacios para el avance militar. Por lo tanto, es posible reducir los niveles de riesgo en el campo de batalla mediante el empleo de productos (modelos 3D) obtenidos a través del uso de las nuevas tecnologías, tal y como recomiendan explícitamente algunas de las unidades especializadas del Cuerpo de Marines de Estados Unidos como el MCCDC⁵⁶.

De la misma forma, los modelos 3D generados son potencialmente útiles para el entrenamiento de tropas con objeto de mejorar su efectividad militar dentro de este tipo de ambientes. De hecho, los ejércitos y unidades militares de varios países han desarrollado zonas de entrenamiento que simulan áreas urbanas, tales como los británicos en *Stanford Training Area* o los franceses en las instalaciones de *CENZUB*. La empresa norteamericana Archetype 3D⁵⁷ desarrolla modelos a escala real de áreas urbanas para entrenamiento militar. Sin embargo, la generación de escenarios de realidad virtual y/o aumentada de los campos de batalla supondría, sin duda, una solución mucho más económica y accesible que las anteriores.

Los modelos urbanos 3D permiten evaluar la incidencia real de una hipotética amenaza (fase pre-) y las posibles estrategias de actuación en caso de catástrofes ya consumadas (fase post-). Así, es posible simular los distintos niveles de damnificación ante

55 BANKS, Grant: «Squad Mission Support System set for Afghanistan», *New Atlas*, 14 de diciembre de 2010, <http://newatlas.com/squad-mission-support-system-set-for-afghanistan/17246> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

56 Concepts Division, MCCDC: «A Concept for Future Military Operations on Urbanized Terrain». Department of the Navy Marine Corps Combat Development Command: Quantico, Virginia (Estados Unidos), 1997, 19 pp.

57 ARCHETYPE3D, 2017. Página web de la empresa Archetype 3D (sección de modelos militares para entrenamiento en asaltos urbanos): <http://engineering-scale-models.com/military-model-for-urban-assault-training> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

una determinada amenaza considerando una serie de escenarios. La generación de escenarios virtuales en situaciones de catástrofes presenta una clara aplicabilidad directa en dos etapas diferentes: (a) la previa a la catástrofe, en la cual se definen estrategias de predicción y prevención, y (b) la inmediatamente posterior, en la cual se evalúan posibles estrategias de evacuación y actuación.

La generación de escenarios virtuales permite además planificar los equipos de trabajo, disponer de herramientas necesarias y diseñar las posibles estrategias de evacuación y/o rescate en función de los diferentes niveles de riesgo. Durante la fase de posterior a la catástrofe (o de emergencia) la configuración de un escenario virtual permite además llevar a cabo una cuantificación más precisa de los daños y las necesidades requeridas. Para ello, estos modelos 3D deben ser integrados en entornos SIG-3D⁵⁸, en los que la información alfanumérica debe ser asociada a los modelos. Los sistemas SIG-3D permiten llevar a cabo operaciones de geoprocetamiento en entornos tridimensionales que ofrecen altos niveles de realismo. La simulación de fenómenos en estos entornos permite una visualización real, fidedigna y fácilmente interpretable de los distintos escenarios por parte de cualquier operador, sea o no experto en el uso de estos sistemas y en su interacción dentro escenarios virtuales. Esto favorece así la integración de equipos de trabajo multidisciplinarios, en los cuales pueden ser consideradas más factores y/o enfoques de trabajo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La generación de modelos digitales 3D plantea una serie de retos futuros tales como la mejora de la calidad geométrica y visual del modelo con objeto de incrementar los niveles de realismo obtenidos. Otro de estos retos es la mejora de la relación geometría-renderizado de dichos modelos 3D en función de las posibles aplicaciones para las que son diseñados. Así, una estrategia inadecuada puede llevar a generar modelos de baja resolución y poco nivel de detalle o, en el otro extremo, a un nivel de interacción muy limitado provocado por el alto peso computacional de los modelos. Actualmente este tipo de problemas puede ser resuelto de dos formas: a) mejorando la metodología y logrando modelos optimizados (precisos y ligeros), y b) a partir de la mejora de las prestaciones de equipos y programas informáticos. Desde un punto de vista técnico, los principales retos están en la reducción de los tiempos de modelado/texturizado y en la implementación de procedimientos más automatizados.

58 DORE, Conor, y MURPHY, Maurice: «Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites». En: *Proc. 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia: Virtual Systems in the Information Society*, 2012, Milán (Italia), pp. 369-376. KWAN, Mei-Po, y LEE, Jiyeong: «Emergency response after 9/11: the potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments», *Computers, Environment and Urban Systems*, n.º 29 (2), 2005, pp. 93-113. ZLATANOVA, Siyka; RAHMAN, Alias A., y PILOUK, M.: «3D GIS: current status and perspectives». En: *Proc. Of the Joint Conference on Geo-Spatial Theory, Processing and Applications*, 2002, Ottawa (Canadá), 6 pp.

Modelos 3D fotorrealistas con alto nivel de detalle (*LoD-3* y *LoD-4*) y alta calidad visual pueden ser empleados en distintas aplicaciones como, por ejemplo, la preservación y mantenimiento de edificios de gran valor histórico. Este tipo de modelos presentan además un gran interés en proyectos de despiece de ciertos edificios históricos ubicados en entornos protegidos en los que las normativas impiden ciertas actuaciones y restringen el uso de algunos materiales. En estos casos, son requeridos unos altos niveles de precisión en la catalogación de los materiales empleados y en el dimensionado de los distintos elementos.

La optimización de los recursos es otro de los puntos clave en las distintas fases del proyecto. Durante la adquisición de datos, la metodología presentada permite capturar grandes volúmenes de información (y de gran calidad) en periodos de tiempo muy cortos. Así, el reto se centra actualmente más en la fase de procesamiento de la información debido a la dificultad para manejar, analizar e interpretar los grandes volúmenes de información obtenida. Una mejor planificación previa permite reducir el tiempo de captura y obtener una cobertura más completa del área estudiada. Además, es posible reducir el volumen de datos eliminando aquellos que son redundantes y permitiendo, en consecuencia, una gestión más eficiente de la información.

Los distintos sistemas de láser escáner son sistemas activos que permiten una captura de la información de una forma masiva y ciega. Estos sistemas permiten recoger grandes volúmenes de datos que, en un gran número de ocasiones, sobrepasan las capacidades de las herramientas empleadas y los requerimientos de las aplicaciones para las que son diseñadas. El desarrollo de sistemas inteligentes para la captura de información debe ir en pro de la optimización del proceso de recogida de información y de su adecuación tanto a los requerimientos reales de las distintas aplicaciones como de la propia complejidad del elemento estudiado.

La integración de modelos 3D en entornos de realidad virtual y aumentada favorece una mayor interacción del usuario, permitiendo expandir el conocimiento de la realidad representada. Por su parte, la integración de estos modelos en entornos *SIG-3D* permite llevar a cabo tareas de geoprocésamiento de la información con objeto de tomar la decisión más óptima ante cada posible escenario o coyuntura.

Las técnicas y metodologías adoptadas deben considerar las propias particularidades de estas áreas desde el momento de la adquisición de los datos hasta el procesamiento de los mismos. La calidad de los modelos finalmente obtenidos dependerá de la aplicación para la que son diseñados. La metodología de trabajo propuesta permite obtener unos modelos digitales fotorrealistas de alta definición y óptima calidad visual, los cuales son integrados en un entorno totalmente virtual. Tal y como presentamos en este artículo, estos modelos 3D ofrecen un gran interés desde un punto de vista de la seguridad y la defensa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo quieren mostrar sus agradecimientos a todo el equipo que ha formado parte del proyecto *4D-CH World*, además de a todos los estudiantes

del *Master GeoEngine* de la Universidad de Stuttgart que han contribuido al desarrollo de este proyecto.

De la misma forma quieren extender sus agradecimientos al Comité de Tecnologías de la Defensa del Instituto de la Ingeniería de España y en especial a su presidente, Enrique Rodríguez Fagúndez, por invitarnos a presentar la conferencia «Proceso de reconstrucción virtual (3D/4D) del patrimonio arquitectónico» (sede del Instituto de la Ingeniería de España en Madrid, 28 de marzo de 2016) y cuyos contenidos están estrechamente relacionados con los aquí expuestos.

BIBLIOGRAFÍA

Master Thesis (GeoEngine) presentadas dentro de este proyecto

BUSTAMANTE, Ariel (supervisada por FRITSCH, Dieter): «Digital preservation of the Calw Market by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2013.

FENG, Bo (supervisada por FRITSCH, Dieter, y BALSABARREIRO, José): «Digital preservation of Calw Altbürgerstrasse by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2015.

LI, Jing (supervisada por FRITSCH, Dieter, y KHOSVARANI, Ali M.): «High definition modeling of Calw, Badstrasse and its Google Earth' integration», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2014.

OWDA, Abdalmenem (supervisada por FRITSCH, Dieter, y BALSABARREIRO, José): «Digital preservation of Calw Im Zwinger by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2016.

WANG, Yiwen (supervisada por FRITSCH, Dieter, y BALSABARREIRO, José): «Digital preservation of Calw Market Square-Lederstrasse (1) by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2015.

YANTENG, Jiang (supervisada por FRITSCH, Dieter, y BALSABARREIRO, José): «Digital preservation of Calw Market Square-Lederstrasse (2) by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2015.

ZHAI, Ning (supervisada por FRITSCH, Dieter, y BALSABARREIRO, José): «Digital preservation of Calw Market Square-Lederstrasse (3) by means of automated HDS and photogrammetric texture mapping», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2016.

Fuentes principales

- 4D-CH World, 2017. Página web del Proyecto Europeo *Four Dimensional Cultural Heritage World*: <http://www.4d-ch-world.eu> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- A.M.: «El santuario de Muxía estrena su nueva imagen ante la indignación de los vecinos», *La Opinión de A Coruña*, 26 de diciembre de 2015, <http://www.laopinion-coruna.es/galicia/2015/03/26/santuario-muxia-estrena-nueva-imagen/940636.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Adobe Systems Inc., 2017. Página web de la empresa Adobe Systems Incorporated: <http://www.adobe.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Agisoft LLC, 2017. Página web de la empresa Agisoft LLC: <http://www.agisoft.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- ÁLVAREZ, Cristina: «Las 5 ciudades con más urbicidio», *Esglobal*, 9 de abril de 2012, <https://www.esglobal.org/las-5-ciudades-con-mas-urbicidio> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- ARCHETYPE3D, 2017. Página web de la empresa Archetype 3D (sección de modelos militares para entrenamiento en asaltos urbanos): <http://engineering-scale-models.com/military-model-for-urban-assault-training> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Autodesk Inc., 2017. Página web de la empresa Autodesk Inc.: <http://www.autodesk.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- BALSA-BARREIRO, José, y FRITSCH, Dieter: «Generation of 3D/4D photorealistic building models. The testbed area for 4D Cultural Heritage World Project: The historical center of Calw (Germany)», *Lecture Notes in Computer Science*, n.º 9474, 2015, pp. 361-372.
- BALSA-BARREIRO, José, y LERMA, José L.: «Aplicación de la tecnología del láser escáner aerotransportado (ALS) a la generación de modelos digitales urbanos», *Topografía y cartografía*, n.º 23 (136), 2006, pp. 3-8.
- BALSA-BARREIRO, José, y LERMA, José L.: «La tecnología LiDAR: una visión general», *Topografía y cartografía*, n.º 23 (135), 2006, pp. 28-32.
- BALTSAVIAS, Emmanuel P.: «Airborne laser scanning: basic relations and formulas», *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, n.º 54, 1999, pp. 199-214.
- BANKS, Grant: «Squad Mission Support System set for Afghanistan», *New Atlas*, 14 de diciembre de 2010, <http://newatlas.com/squad-mission-support-system-set-for-afghanistan/17246> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- BESL, Paul J., y McKAY, Nail D.: «A method for registration of 3-D shapes», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, n.º 14 (2), 1992, pp. 239-256.

- BILJECKI, Filip; SOTER, Jantien; LEDOUX, H.; ZLATANOVA, Sisi, y ÇÖLTEKIN, Arzu: «Applications of 3D city models: State of the art review», *ISPRS International Journal of Geo-Information*, n.º 4 (4), 2015, pp. 2842-2889.
- Concepts Division, MCCDC: «A Concept for Future Military Operations on Urbanized Terrain». Department of the Navy Marine Corps Combat Development Command: Quantico, Virginia (Estados Unidos), 1997, 19 pp.
- COWARD, Martin: «Urbicide. The Politics of Urban Destruction». Routledge: Londres (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos), 2009, 176 pp.
- DANTI, Michael D: «Ground-Based Observations of Cultural Heritage Incidents in Syria and Iraq», *Near Eastern Archaeology*, n.º 78 (3), 2015, pp. 132-141.
- DORE, Conor, y MURPHY, Maurice: «Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites». En: *Proc. 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia: Virtual Systems in the Information Society*, 2012, Milan, Italia, pp. 369-376.
- EUROPEANA, 2017. Página web de *EUROPEANA Collections*: <http://www.europeana.eu> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- FERNÁNDEZ-GALIANO, Luis: «Urbicidio balcánico», *El País*, 23 de julio de 1993, http://elpais.com/diario/1993/07/23/cultura/743378408_850215.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- FRÜH, Christian, y ZAKHOR, Avidéh: «Fast 3D model generation in urban environments». En: *IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2001, Baden-Baden (Alemania), pp. 165-170.
- GENER, Mari P.: «Un nido de cigüeña hunde el tejado y cae sobre la bóveda de la iglesia de Andosilla», *Diario de Navarra*, 20 de enero de 2012, http://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/tierra_estella_valdizarbe/un_nido_ciguena_hunde_tejado_cae_sobre_boveda_iglesia_andosilla_65848_1006.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- GrindGIS, 2015: «LIDAR Data 50 Applications and Uses- It is important», *GrindGIS*, 18 de agosto de 2015, <http://grindgis.com/data/lidar-data-50-applications> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- HAN, Lina; CHONG, Yanwen; LI, Yuanting, y FRITSCH, Dieter: «3D Reconstruction by combining terrestrial laser scanner data and photogrammetric images». En: *Proceedings of the Asia Assoc. of Remote Sensing*, 2014, Nay Pyi Taw (Myanmar).
- HU, Jinhui; YOU, Suyu, y NEUMANN, Ulrich: «Approaches to large-scale urban modeling», *IEEE Computer Graphics and Applications*, n.º 23 (6), 2003, pp. 62-69.
- IFP, 2017. Página web del Institut für Photogrammetrie de la Universidad de Stuttgart (Alemania): <http://www.ifp.uni-stuttgart.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

- KOLBE, Thomas H.; GRÖGER, Gerhard, y PLÜMER, Lutz: «CityGML - Interoperable access to 3D city models». En: *International Symposium on Geo-Information for Disaster Management GI4DM*, 2005, Delft, Netherlands, pp. 21-23.
- KWAN, Mei-Po, y LEE, Jiyeong: «Emergency response after 9/11: the potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments», *Computers, Environment and Urban Systems*, n.º 29 (2), 2005, pp. 93-113.
- LADO, J. V.: «El naufragio de las obras de A Barca», *La Voz de Galicia*, 28 de marzo de 2015, http://www.lavozdegalicia.es/noticia/carballo/muxia/2015/03/28/naufragio-obras-barca/0003_201503G28P16991.htm (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Leica Geosystems AG, 2014. Especificaciones técnicas del equipo *Leica ScanStation P20*: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation_P20/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_P20_DAT_en.pdf (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Leica Geosystems AG, 2017. Página web de la empresa Leica Geosystems AG: <http://leicageosystems.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- LETORNEAU, François: «Different Approaches for the Creation and Exploitation of 3D Urban Models». En: *7th International Command and Control Research Technology Symposium*, 2002, Quebec City (Canadá).
- LGL-BW, 2017. Página web del Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung de Baden-Württemberg: <https://www.lgl-bw.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- LI, Jing (supervisada por FRITSCH, Dieter, y KHOSVARANI, Ali M.): «High definition modeling of Calw, Badstrasse and its Google Earth' integration», *Master Thesis*, Alemania, Universidad de Stuttgart, 2014.
- LINGUA, Andrea; MARENCHINO, Davide, y NEX, Francesco: «Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications», *Sensors*, 2009, n.º 9 (5), pp. 3745-3766.
- LIVINGSTON, Mark A; ROSENBLUM, Lawrence J.; JULIER, Simon J.; BROWN, Dennis; BAILLOT, Yohan; SWAN II, J. Edward; GABBARD, Joseph L., y HIX, Deborah: «An Augmented Reality System for Military Operations in Urban Terrain». En: *National Training and Simulation Association*, 2002, Arlington, Estados Unidos, pp. 868-875.
- LUHMANN, Thomas; ROBSON, Stuart y KYLE, Stephen: «Close range photogrammetry: principles, techniques and applications». Whittles: Dunbeath (Reino Unido), 2007. 528 pp.
- Master of Science Program GeoEngine, 2017. Página web del Programa *Master of Science GeoEngine* de la Universidad de Stuttgart: <http://www.geoengine.uni-stuttgart.de> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

- MAZZUCHELLI, Francesco: «Cuando la guerra mata a la ciudad», *Esglobal*, 11 de abril de 2012, <https://www.esglobal.org/cuando-la-guerra-mata-a-la-ciudad> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- NATO: «3D Modelling of Urban Terrain». RTO Technical Report (RTO-TR-SET-118). North Atlantic Treaty Organisation: Neuilly sur Seine (Francia), 2011, 118 pp.
- nFrames GmbH, 2017. Página web de la empresa nFrames GmbH: <http://www.nframes.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- ONU: «Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo», Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU, 10 de julio de 2014, <http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- PFEIFLE, Sam: «Using lidar in Afghanistan», Spar3d, 28 de julio de 2011, <http://www.spar3d.com/blogs/head-in-the-point-clouds/using-lidar-in-afghanistan> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- REJÓN, Raúl: «La Iglesia declara a las cigüeñas una amenaza patrimonial para sus edificios», *Eldiario*, 18 de febrero de 2016, http://www.eldiario.es/sociedad/iglesia-considera-ciguenas-amenaza-patrimonial_o_485751680.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- SHIODE, Narushige: «3D urban models: Recent developments in the digital modeling of urban environments in three-dimensions», *GeoJournal*, n.º 52 (3), 2000, pp 263-269.
- Stadt Calw, 2017. Página web del Gobierno local de Calw (sección *city portrait*): <http://www.calw.de/city-portrait> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Trimble Inc., 2017. Página web de la empresa Trimble Inc.: <http://www.trimble.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- UNESCO MoW, 2017. Página web de UNESCO Memory of the World: <http://www.unesco.org/new/en/communication-and-information/memory-of-the-world> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- Unity Techn., 2017. Página web de la empresa Unity Technologies: <https://unity3d.com> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- WALSH, David: «Warfighters reap benefits of LIDAR mapping technology», *Defence Systems*, 26 de julio de 2011, <https://defensesystems.com/ARTICLES/2011/07/18/TECH-WATCH-GEOINT-LIDAR.ASPX?PAGE=1> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- WENZEL, Konrad; ROTHERMEL, Mathias; HAALA, Norbert, y FRITSCH, Dieter: «SURE - The IFP software for dense image matching». *Photogrammetric Week '13*, Ed. D. Fritsch, Wichmann: Berlin/Offenbach (Alemania), pp. 59-70.

- ZLATANOVA, Siyka; RAHMAN, Alias A., y PILOUK, M.: «3D GIS: current status and perspectives». En: *Proc. of the Joint Conference on Geo-Spatial Theory, Processing and Applications*, 2002, Ottawa (Canadá), 6 pp.
- : «Un nido pone en peligro el tejado de la iglesia de las Carmelitas de Peñaranda», *La Gaceta de Salamanca*, 20 de enero de 2017, <http://www.lagacetadesalamanca.es/viva-mi-pueblo/penaranda-de-bracamonte/2017/01/20/nido-pone-peligro-tejado-iglesia-carmelitas/194892.html> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- : «Un rayo incendia el emblemático santuario de Muxía, en A Coruña», *El País*, 25 de diciembre de 2013, http://elpais.com/elpais/2013/12/25/actualidad/1387984741_525895.html (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).

Fuentes secundarias

- BALSA-BARREIRO, José: «Análise para a implementación dun SIX co fin da xestión de servizos en calquera nivel da Administración. Particularización e aplicacións de mellora para o caso da Dirección Xeral de Turismo-Turgalicia (Consellería de Innovación e Industria)». Escola Galega de Administración Pública (EGAP): Santiago de Compostela, 2008, 291 pp.
- BALSA-BARREIRO, José: «Reconstruir ciudades en 3D y 4D para desarrollar el turismo y la defensa». En: Instituto de la Ingeniería de España, 2016, Madrid, España. Disponible *on-line* en <http://iies.es/reconstruir-ciudades-en-3d-y-4d-para-desarrollar-el-turismo-y-la-defensa> (fecha de acceso: 15 de marzo de 2017).
- BALSA-BARREIRO, José, y LERMA, José L.: «A new methodology to estimate the discrete-return point density on airborne LiDAR surveys», *International Journal of Remote Sensing*, 35 (4), 2014, pp. 1496-1510.
- BALSA-BARREIRO, José, y LERMA, José L.: «Empirical study of variation in LiDAR point density over different land covers», *International Journal of Remote Sensing*, n.º 35 (9), 2014, pp. 3372-3383.
- BALSA-BARREIRO, José; AVARIENTO, Joan P., y LERMA, José L.: «Airborne light detection and ranging (LiDAR) point density analysis», *Scientific Research and Essays*, n.º 7 (33), 2012, pp. 3010-3019.
- MOUSSA, Wassim; ABDEL-WAHAB, Mohammed, y FRITSCH, Dieter «An automatic procedure for combining digital images and laser scanner data». En: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX-Part B5, pp. 229-234.
- WENZEL, Konrad; ROTHERMEL, Mathias; FRITSCH, Dieter, y HAALA, Norbert: «Image acquisition and model selection for multi-view stereo». En: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing

ing and Spatial Information Sciences, 2013, Trento, Italia, Vol. XL-Part 5, pp. 251-258.

— *Artículo recibido: 4 de julio de 2017.*

— *Artículo aceptado: 19 de julio de 2017.*
