



La Muralla de La Habana. Levantamiento tridimensional y documentación de sus paramentos pétreos

Muralla of Havana. Tridimensional Survey and Documentation of the Stone Walls

Pedro Cuétara-Pérez, Sergio R. Arencibia-Iglesias y Vivian Mas-Sarabia

RESUMEN: La investigación introduce el tema de la documentación tridimensional a través del empleo del escáner láser terrestre en el ámbito local. El problema radica en el uso limitado de sus potencialidades para documentar el patrimonio construido habanero. Se selecciona como estudio de caso la Muralla de La Habana. Su digitalización conlleva al perfeccionamiento de las bases de datos existentes y la obtención de información necesaria para su conservación. El objetivo consiste en aplicar procesos de automatización y simplificación del modelado geométrico del lienzo de muralla de Egido, entre Fundición y Desamparados. El manejo del levantamiento tridimensional y las ortoimágenes obtenidas, para el registro y documentación del monumento, constituye la principal novedad del trabajo. Los resultados contribuyen al conocimiento de estas estructuras pétreas de la arquitectura militar colonial, de manera detallada y precisa, desde los deterioros que presentan hasta la relación con las bases georreferenciadas (SIGs) y su puesta en valor.

PALABRAS CLAVE: escáner láser, documentación, muros pétreos, La Habana

ABSTRACT: The research deals with three-dimensional documentation through the implementation of the laser scanning in the local site. The problem consists in the limited use of its potentialities for documenting the Havana built heritage. The ancient wall Muralla de La Habana is taken as case study. Its digitalization process involves the achievement of the existent data bases and the obtaining of better results for its conservation, with the objective of applying processes of automation and simplification of the geometric modelling of the stretch wall located in Egido Street, between Fundición and Desamparados. The management of the generated three-dimensional survey and orthophotos for the register and documentation of the monument is considered the main contribution of the present work. The results provide a detailed and precise knowlegement of the stone structures that belongs to colonial military architecture, which includes not only the deterioration forms, but also, its relation with the geographic information bases (SIGs) and its use value setting.

KEYWORDS: laser scanning, documentation, stone walls, Havana

RECIBIDO: 30 abril 2020-08-03

APROBADO: 02 julio 2020

Introducción

La conservación del patrimonio cultural inmueble exige del acceso a nuevas tecnologías y técnicas, tanto para las labores de preservación como para su difusión. En la presente década, la Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana, lleva a cabo un proyecto de colaboración denominado Salvaguarda de los valores patrimoniales y culturales que atesora el Centro Histórico de La Habana [1], mediante el cual se equipa a la institución de un escáner láser para el registro y documentación de edificaciones de interés cultural. La Empresa de Proyectos Restaura constituye uno de los principales beneficiarios de la implementación tecnológica, por liderar los proyectos arquitectónicos y disponer de un archivo digital a partir de los levantamientos del fondo edificado y de la información sobre los propios procesos de proyección e inversión que se realizan en el territorio.

El archivo atesora información valiosa de monumentos y edificios históricos, su restauración, reconstrucción y diversas acciones de conservación en general, así como información sobre su exposición a factores ambientales o desastres naturales que aceleran el deterioro. Urge entonces la necesidad de documentar toda la información posible del fondo edificado con la mayor brevedad, y a la vez, con un alto nivel de precisión y de detalles. La información elaborada con el escáner láser terrestre (por sus siglas en inglés TLS: *Terrestrial Laser Scanner*) recoge la geometría y las condiciones en que se encuentra la estructura en el momento que se realiza el registro”, de gran importancia para la futura intervención constructiva. El registro y documentación del monumento seleccionado, mediante el manejo del levantamiento tridimensional y la creación de ortoimágenes, representa la novedad principal del trabajo.

Gran parte del registro y la documentación de los bienes inmuebles en el Centro Histórico La Habana Vieja, inscripto por la UNESCO en la lista del Patrimonio Mundial en 1982, se realiza mediante el empleo de métodos tradicionales de levantamientos arquitectónicos, con herramientas básicas como la cinta métrica y el distanciómetro, que retardan los procesos de toma de datos y la toma de decisiones. Con el uso de la tecnología Escáner Láser Terrestre se pueden obtener gran cantidad de datos. Al ser el registro mucho más detallado y preciso, las potencialidades para el trabajo basado en la documentación resultante aumentan considerablemente.

El problema estriba en la subutilización del TLS en las labores de conservación por diferentes causas como la ausencia de personal especializado y la falta de asesoría técnica. Tampoco se ha demostrado en el contexto analizado, las notables diferencias entre el proceso de registro y documentación mediante métodos tradicionales, y el trabajo realizado con escáner láser terrestre, mucho más precisa y capaz de almacenar datos en breve tiempo. Se deprecia así su valor y como resultado se limita el proceso de rehabilitación llevado a cabo, desde el análisis e interpretación de datos del monumento, hasta los proyectos de intervención constructiva.

La investigación forma parte de un proyecto multidisciplinario denominado “Influencia del Medio Ambiente en el Deterioro de Bienes de Interés Cultural de La Habana Vieja y Áreas Priorizadas para la Conservación”; de conjunto entre el Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, la Empresa Restaura y el Plan Maestro para la Revitalización Integral de La Habana Vieja, que tiene como finalidad favorecer la conservación del patrimonio cultural de la Nación cubana. Para demostrar las potencialidades de la documentación tridimensional y la aplicación de la información resultante a

[1] Tucci G, Sabelli R, Conti A, Fiorini L, Koss A, Marcksak J, et al. Patrimonio y Tecnologías Aplicadas. La Habana: Internacional DDC Editor; 2014.

partir del levantamiento arquitectónico, con el uso de la tecnología Escáner Láser Terrestre, se formularon las preguntas de investigación siguientes: ¿Cuáles son las etapas a seguir para la documentación con el uso de la tecnología láser del monumento seleccionado? y ¿Cómo es la utilidad de la información resultante y su relación con las bases georreferenciadas existentes en el Centro Histórico La Habana Vieja? En aras de viabilizar la investigación y con ella el empleo del escáner, se escogió el lienzo de muralla de tierra de Egido entre las calles Fundición y Desamparados, por sus características, posibilidades de acceso y manejo del TLS.

La selección del objeto de estudio partió de la importancia que poseen los tramos de muralla como conjunto histórico (Figura 1) y su significado para el posterior desarrollo urbanístico de la ciudad [2]. La construcción de la Muralla data del año 1674 hasta 1740; comienza precisamente por el lado sur donde se halla el lienzo seleccionado. Para su construcción se emplearon 75 000 m³ de piedra aproximadamente, cantidad considerable para aquella época. Su posterior derribo se anunció en acto solemne en 1863 en presencia de las personalidades más notables de La Habana colonial [3,4]. Afortunadamente, en la actualidad perduran algunos lienzos y garitas como testimonio histórico y de su tipología arquitectónica. En la figura 1 se resalta el caso de estudio Egido y Desamparados, al cual se le realiza el registro con TLS para su posterior documentación.

Materiales y métodos

El levantamiento arquitectónico se realizó mediante la escanometría, efectuada con tecnología Escáner Láser Terrestre Z+F Imager 5010. Se determinaron las coordenadas precisas, útiles para la georreferenciación del modelo 3D, a construir posteriormente con la información obtenida con el TLS. Para la medición, el escáner utiliza el principio basado en la diferencia de fase, donde la luz que emite el láser se modula en amplitud y se envía a una superficie, esta reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviadas y recibidas. Para marcar las dianas o puntos de control se utilizaron hojas de papel tamaño A4, con la impresión de una figura geométrica reconocible por el software del escáner.

El escaneado se realizó con resolución Súper Alta (*Super High*) de calidad Alta (*High*), según la configuración del TLS, para trece minutos de escaneado y tres minutos para toma de fotos. Se designaron específicamente estas dos configuraciones porque permite tomar mayor detalle, además de la geometría general del muro, de la morfología de los deterioros y las marcas de cantería presentes en una de las

- [2] Venegas C. La urbanización de las murallas. Dependencia y modernidad. La Habana: Letras Cubanas; 1990.
- [3] De las Cuevas-Toraya J. 500 Años de construcciones en Cuba. La Habana: D.V. Chavín, Servicios Gráficos y Editoriales; 2001.
- [4] Weiss J. La arquitectura colonial cubana: Siglos XVI al XIX. Sevilla: Consejería de Obras Públicas y Transporte; 1996.



Figura 1. Ubicación de los tramos de la Muralla de La Habana. Elaboración propia.

caras. En total se realizaron nueve posicionamientos alrededor del fragmento de la Muralla, los cuales permitieron tomar toda la información prevista. Como herramientas complementarias se emplearon la cinta métrica, el distanciómetro láser y la cámara fotográfica. Posteriormente, se recurrió al uso de la fotogrametría, para la inclusión de colores y texturas en la información que brinda el escáner y el trabajo de las imágenes tomadas en el sitio.

El trabajo de campo con el TLS se realizó en dos días, uno para el análisis de las características del lienzo de la Muralla y preparación de las condiciones para el levantamiento con el escáner láser, y otro día para realizar todas las mediciones con el TLS. Esto responde a recomendaciones de empleo al menor tiempo de exposición posible, ya que el escáner tiene un peso considerable de 9,8 Kg, más 1,2 Kg la batería, su traslado hasta el objeto de estudio se realiza dentro de una maleta acondicionada, además de otra maleta con baterías de repuesto y el trípode donde se apoya el dispositivo. Es necesario, además, controlar los factores externos que afecten la toma de datos como la exposición al sol, viento, lluvia, cambios de temperatura, golpes o movimientos bruscos. El sistema de lentes y espejos que posee se debe maniobrar solamente lo indispensable para mantenerlo calibrado, de lo contrario, conllevaría el envío del TLS al fabricante para su mantenimiento y calibración, que constituye un proceso lento y costoso. El manual de uso contiene solo especificaciones técnicas del fabricante, no explica cómo realizar los levantamientos, esto corresponde al investigador, acorde a los datos que quiera obtener durante el estudio específico.

Luego de la información tomada se procedió al trabajo de gabinete, el cual se llevó a cabo en la Subdirección de Diagnóstico de la Empresa RESTAURA. Se emplearon dos computadoras de escritorio (PC), una con microprocesador (CPU) Intel Xeon, de ocho núcleos físicos, 32 Gigabytes de memoria RAM, tarjeta gráfica (GPU) profesional NVidia Quadro K4000 con 4 Gigabytes de velocidad, un Terabyte de capacidad de disco duro, y sistema operativo Windows 7 Profesional; la segunda PC, de CPU i5 6500 a 3.2 GHz (6ta generación de Intel), 32 Gigabytes de memoria RAM, unidad GPU NVidia GeForce GTX 1050 Ti de 4 Gigabytes, dos Terabytes de almacenamiento, más un SSD de 256 Gigabytes y Windows 10 Pro como sistema operativo. Pudieran valorarse otras configuraciones y características de las PCs para el procesamiento de la información obtenida en el levantamiento y que tengan prestaciones similares a las utilizadas en esta experiencia.

El procesamiento de la información se efectuó mediante software específicos para cada técnica

utilizada. El primer software empleado para comenzar a procesar la información tomada se llama *Z+F Laser Control*, en el que los datos en su forma original, sin haberlos sometido a ningún tipo de procesamiento o filtrado, se muestran como una densa nube de puntos en tonalidades de grises, sin precisar en los colores del objeto escaneado (Figura 2). Se utilizó la opción (*tools*) *Preprocessing*, que filtra la nube de puntos y elimina el ruido. Seguidamente se procedió al registro (*Registrar*) de las nubes de puntos mediante *targets (Fit target)*, que no es más que las uniones de las mismas con un margen de error menor a la centésima de milímetro. En su forma original esas nubes no se muestran unidas, aparecen en posiciones diferentes.



Figura 2. Nube de puntos sin procesar en la interfaz del programa Z+F Laser. Elaboración propia

Luego del registro de las nubes se procedió a dar color, con empleo de las fotos HDR (*High Definition Resolution*) que tomó el TLS en el proceso de levantamiento. Esta etapa se realiza mediante la opción (*tools*) *Generate color scan(s)*, que toma automáticamente los colores de esas imágenes y los incrusta en los puntos de la nube, y le otorga valores x, y, z (Figura 3).



Figura 3. Procesamiento del color de la nube de puntos en la interfaz Z+F Laser. Los estacionamientos del TLS en color azul. Elaboración propia.

Para el filtrado de las nubes de puntos se empleó también el JRC 3D *Reconstructor*, mediante el *Pre-processing*, herramienta que cuenta con seis tipos de filtros, y cada uno tiene varios algoritmos configurables en dependencia de la necesidad del investigador; y la *ICP Registration*, que mediante cálculos propios corrige y reduce mucho más los posibles errores que aún pueden existir. La extracción de la información necesaria de la nube se realizó a partir de la herramienta *Select*, la cual permitió la selección de los puntos del paramento, y eliminar los que estaban fuera de esa selección con *Delete outside points*. Esta eliminación ayudó considerablemente a la fluidez del trabajo, al mismo tiempo que se redujo el tamaño del archivo.

Una vez que la nube de puntos tridimensional del lienzo de muralla quedó limpio de ruidos y de elementos no deseados, se realizaron modificaciones más precisas de la volumetría consistentes en la eliminación de la irregularidad propia de la superficie del material pétreo. La nube de puntos de la parte superior del muro, que por la altura era más complejo de escanear, se convirtió en un volumen mallado. La malla triangular o interpolación de los puntos tridimensionales genera una representación completa de la superficie antes de la texturización del volumen. Resultó ser un proceso demorado porque, además de eliminar los defectos que habían quedado, se tuvo que revisar cada hueco que estaba sin ocupar mediante la optimización y resolución de la malla.

Seguidamente se procedió a la texturización del volumen para lograr el resultado esperado, exportable a diferentes formatos para varias utilidades (Figura 4). Se obtuvieron ortoimágenes [5], imágenes digitales generadas en proyección ortogonal, a partir de fotografías tomadas de la nube de puntos, geométricamente exactas al modelo original, las cuales son de gran importancia ya que logran la visualización ortogonal de las nubes de puntos. Para realizar este paso se creó una *Ortho Camera* y se realizó un *Virtual Scan*, ajustado a la posición y tamaño deseados. Las fotos obtenidas se exportaron a AutoCAD, para la realización de dibujos a escala 1:1, a partir de aquí se pueden obtener las dimensiones del muro y de los sillares que lo componen, también procesar planos bidimensionales a diferentes escalas con sus cotas reales, necesario para la impresión del modelo en papel, o diferentes proyectos publicitarios en pancartas, carteles o sitios de Internet.

[5] Wiedemann A, Beckmann S. Quality Aspects of aerial digital orthophotos, the producers point of view. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [Internet]. 2016 [citado: 2020 Feb 12]; 41(2):449-453. Disponible en: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B2/449/2016>



Figura 4. Volumen tridimensional texturizado del fragmento de la Muralla.
Elaboración propia

El proceso de georreferenciación del modelo tridimensional del fragmento de la Muralla escaneado se realizó con estación total Leica, modelo TCR1203+. Se utilizó el Sistema de Referencia de Coordenadas WGS 84/UTM Zone 17N, sobre el cual el Plan Maestro de la Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana ha elaborado el Sistema de Información Territorial. Se utilizaron los mismos targets que se emplearon para la unión de las nubes de puntos. Este proceso dio como resultado la ubicación exacta en ese sistema de coordenadas, así como las diferencias de niveles que presenta respecto a las edificaciones cercanas, la calle que lo rodea, e incluso al nivel del mar. La tabla 1 sintetiza la secuencia empleada y los resultados esperados en las dos fases concebidas.

Tabla 1. Síntesis de la secuencia empleada.

| | TRABAJO DE CAMPO | RESULTADOS ESPERADOS |
|--------|--|---|
| FASE 1 | 1. Revisión del estado del escáner láser a emplear | - Nube de puntos |
| | 2. Inspección visual y determinación del posicionamiento óptimo en función de las características del inmueble a registrar y del entorno en que se encuentra enclavado | - Imágenes del objeto de estudio |
| | 3. Escaneado del objeto de estudio | |
| |  | |
| | PROCESAMIENTO DE DATOS | RESULTADOS ESPERADOS |
| FASE 2 | 4. Tratamiento de la nube de puntos, optimización y generación de ortoimágenes mediante el uso de los software descritos (Procesamiento de la información obtenida del trabajo de campo) | - Nube de puntos optimizada - Detalles geométricos del objeto de estudio en fichero exportable hacia otros software - Obtención de un único modelo tridimensional texturizado |

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

La adecuada conservación del patrimonio construido exige un conocimiento exhaustivo del mismo, en donde el levantamiento arquitectónico juega un papel importante al ser considerado un método de investigación en sí mismo, cuyos resultados siempre ofrecen una mejor comprensión del edificio histórico. El uso de alta tecnología para el registro y documentación resulta una disciplina muy compleja, por la gran cantidad de variables a procesar, en aras de preservar los valores culturales [6].

Los arquitectos Melero [7] y Almagro [8], reconocidos especialistas del levantamiento arquitectónico de Cuba y España respectivamente, hacen referencia a la Carta del Rilievo de Roma, documento internacional que respalda la importancia que reviste la documentación del patrimonio construido. En la declaración queda expresado de manera íntegra el concepto de levantamiento, concerniente a los valores del objeto arquitectónico,

[6] Angás-Pajas J, Serreta A. Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural. *Virtual Archaeology Review* [Internet]. 2012 May [citado: 2020 Mar 15]; 3(5):38-42. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4497>

[7] Melero N. Análisis y evaluación de edificaciones. Levantamiento, calificación y documentación preliminar para las intervenciones de conservación. La Habana: Ediciones Boloña; 2016.

[8] Almagro A. Levantamiento Arquitectónico. Granada: Universidad de Granada; 2004.

[9] Hernández L, González DA, Garbey LO, Flores DS. Implementación y resultados obtenidos con el escáner láser c10 en la Empresa Geodesa. X Congreso Internacional de Geomática [Internet]. La Habana; Cuba; 2018 Mar 19-23 [Consultado: 2020 Feb 10]. Disponible en: <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencias2018/GE0060.pdf>

su geometría, estructura, materiales empleados, técnicas constructivas, elementos figurativos, condiciones de degradación y las relaciones con el contexto urbano. Un elemento importante dentro de esa definición es la introducción en la construcción de un modelo tridimensional simplificado que facilite la interpretación de las etapas de transformación edilicia.

En Cuba existen instituciones que emplean la medición TLS, aunque es un tema de actualidad, no pudo evidenciarse un predominio de trabajos investigativos en el contexto nacional relacionados con procesos de documentación con la técnica láser, a excepción del trabajo presentado en la XVII Convención de Informática por la Empresa Geodesa [9], que expresa las facilidades que ofrece esta herramienta en el análisis de datos y en la planificación de mantenimientos industriales. No se encontraron otras publicaciones en bases de datos indexadas sobre investigaciones en el patrimonio habanero construido con piedra natural, referidas al uso de esta tecnología o la obtención y uso de ortoimágenes a partir del modelo tridimensional.

En el caso que ocupa la presente investigación, durante todo el proceso investigativo se reconocieron las ventajas y limitaciones del uso del TLS. En dependencia del objeto a estudiar y de las condiciones ambientales del sitio, el estudio requirió del empleo de varias técnicas, conocido como la combinación de métodos directos/indirectos o levantamientos mixtos [10]. El modelo permitió conocer la morfología general del tramo de muralla estudiado, del estado físico de sus materiales pétreos y los procesos de alteración y deterioro presentes en ellos. La fidelidad del empleo de esta tecnología ha quedado demostrada en trabajos precedentes como el de Corso y Roca [11]. Su utilización permite obtener datos de interés histórico y arqueológico, precisar en los detalles de cantería y de la patología de la piedra de fachadas. Supera en precisión los resultados obtenidos por métodos tradicionales.

El tramo de muralla seleccionado constituye actualmente un resto arqueológico, pero inicialmente formó parte de una construcción de tipología militar bien determinada. El paramento está construido de piedras calizas y/o calcarenitas [12], mayormente empleadas en muchas de las edificaciones del Centro Histórico. El derribo del lienzo de la Muralla visto desde la Puerta de la Tenaza permite la observación de su estructura física, compuesta por caras exteriores de sillería, y al centro, un relleno de tierra y piedras de distintas dimensiones. La parte superior es más estrecha, está delimitada por un ángulo de inflexión y constituida solamente de sillares. El entorno se caracteriza por ser un espacio verde que funciona como rotonda vehicular de alto tráfico rodado, rodeado de instalaciones portuarias, y cercano a la termoeléctrica de Tallapiedra y la Estación Central de Trenes.

Las dimensiones entre la vía y el monumento permitieron el fácil estacionamiento del TLS para la toma de datos. La nube de puntos tridimensional del lienzo de muralla constituye un resultado en sí mismo. A partir de ella, y con la aplicación de los diferentes software usados durante el proceso de investigación se crearon cinco ortoimágenes, que se corresponden con cada una de las caras visibles del muro, más la proyección horizontal a la altura de 3,50 metros. Estas imágenes permiten mostrar cuantas vistas y perspectivas se desee en dependencia del tipo de estudio que se realiza, por ejemplo, análisis comparativos con futuros levantamientos que permitan dilucidar si este fragmento de la Muralla ha continuado sufriendo alteraciones.

El área que ocupa el paramento, resultante del cálculo, fue de 75.66 m², las dimensiones de los extremos más alejados fueron de 25.22 m de largo

- [10] Mataix J, León C, Montes FP. Fortalezas y debilidades de la técnica de levantamiento gráfico con escáner láser para la catalogación del patrimonio cultural: Aplicación a la Iglesia de San Francisco (Priego de Córdoba) [Internet]. 2013 Sep [citado: 2020 Jan 30]; *Expresión Gráfica Arquitectónica EGA* 18(21):216-225. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/EGA/article/view/1535>
- [11] Corso JM, Roca J. Herramientas para el análisis Morfológico de Fabra i Coats en Barcelona: Procesamiento de imágenes a partir de la tecnología de Escáner Láser Terrestre. *Revista M* [Internet], 2013 [citado: 2020 Jan 9]; 10(2): 84-99. Disponible en: <http://revistas.ostabuca.edu.co/index.php/REVISTAM/article/view/724/570>
- [12] Arencibia SR, Romeo A, Fernández N. Formas de deterioro presentes en las fachadas de piedra de El Arsenal. *Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo* [Internet]. 2015 Oct [citado: 2020 Apr 12]; 36(3):79-91. Disponible en: <http://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/459/431>

por 3.00 m de ancho. El parque en donde está ubicado el monumento tiene un área total de 2 566.43 m², por lo que el lienzo de muralla representa el 2.95% del área total del espacio público. El muro presentó una variación de alturas en sus extremos de 0.15 m, también posee una inclinación de 9°, y se le resta 1.15 m de grosor en la parte superior. El parapeto mide 1.55 m de alto y un ancho de 0,80 m, espacio destinado para el tránsito y protección de la soldadesca que protegía las Murallas.

El tamaño de los sillares que conforma el muro no es homogéneo y presentan muchas irregularidades, el promedio es de 0.76 m de largo por 0.44 m de alto. Este resultado permitirá estimar las dimensiones del resto de los lienzos, específicamente las partes faltantes de la Muralla para la modelación digital de la misma. Las medidas obtenidas corroboraron la variación en las dimensiones y la forma irregular de los sillares, así como de las formas de alteración y deterioro presentes. Se observó la presencia de pátinas negras y naranjas, pérdida de mortero entre juntas, desagregación granular, plantas superiores, y morteros mal aplicados como resultado de modificaciones antrópicas. El trabajo con las ortoimágenes también permitió determinar y calcular las magnitudes de los signos de alteración de la piedra (Figura 5).

Otro resultado de interés por su aporte para la historia constructiva y social habanera, principalmente para los arqueólogos que laboran en el Centro Histórico La Habana Vieja, es el relacionado con las marcas de cantería de los sillares. Existen varias hipótesis sobre su presencia y significado, pero la más aceptada según los autores de la presente investigación, se corresponde con la necesidad de constructores de distinguir cada bloque que labraban, para lo cual utilizaban un sello específico que permitía al jefe de obra, exigir, contabilizar y pagarles el trabajo realizado por cada uno.

Las ortoimágenes contribuyen al estudio de esas marcas de cantería, permiten a los investigadores, arqueólogos o de otra especialidad, analizar la proporción y ubicación exacta que tiene cada elemento. Se localizó un total de nueve marcas de cantería, ubicadas todas en la parte superior del paramento, y como dato interesante, todas se localizaron hacia la cara externa de la muralla, orientada al suroeste, nunca hacia lo que sería el interior de la ciudad fortificada (Figura 6). Tampoco presentan una disposición coherente, algunas aparecen agrupadas y otras más espaciadas, incluso zonas del muro sin marca alguna, presumiblemente erosionadas por la acción de las lluvias, el aerosol marino y otros factores de degradación de la piedra.

El uso de la tecnología permitió además la creación de animaciones virtuales de la muralla para su difusión como parte del patrimonio cultural de la Ciudad. Las

- [13] Peinado-Checa ZJ. Animaciones virtuales aplicadas a la difusión del patrimonio inmueble. La villa de Ágreda (Soria). *Virtual Archaeology Review* [Internet]. 2014 Oct [citado: 2020 Jan 30]; 5(11):101-108. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/4187>
- [14] Marcos D, García LA, San-José JI, Sánchez JI. Virtualización del patrimonio arquitectónico caído. La torre de la Iglesia de San Esteban en Valdespina, Palencia. *REHABEND* [Internet]. Burgos; España; 2016 May 24-27 [Consultado: 2020 Jan 26]. p. 2463-2470. Disponible en: <http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45991620/REHABEND2016/filename%3DVirtualizaci%3Dondelpatrimonioarquitecto.pdf>.



Figura 5. Determinación a través de ortoimagen del área ocupada por pátinas negras y naranjas. Elaboración propia.

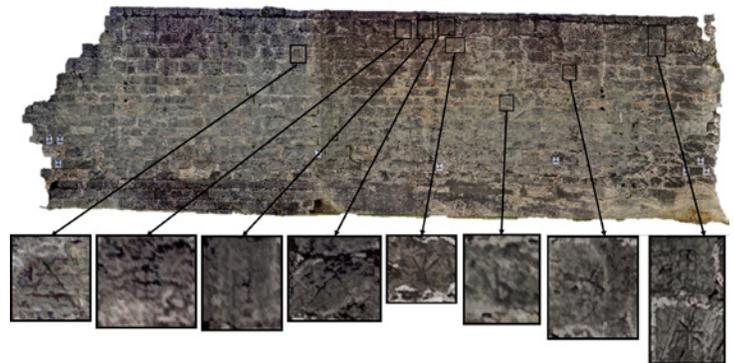


Figura 6. Localización en las ortoimágenes de marcas de cantería. Elaboración propia.

utilidades de la información tridimensional con el uso del TLS se evidencian en trabajos como los de Peinado Checa [13] y Marcos et al. [14]. Ambos constituyen ejemplos del uso de la documentación de inmuebles patrimoniales aplicadas a la difusión del patrimonio construido, mediante animaciones virtuales o reconstrucciones de partes inexistentes de monumentos de España, en Soria y Palencia, respectivamente.

Los artículos citados anteriormente describen la aplicación final al modelo tridimensional obtenido después de cada levantamiento, coinciden en el valor que posee la difusión del patrimonio arquitectónico, mediante las ventajas que brinda el escáner láser. El proceso de modelado del fragmento del lienzo de la Muralla dio como resultado un archivo tridimensional mallado y texturizado disponible para su uso en diferentes plataformas digitales. El modelo pudo ser

insertado en la base de datos del Plan Maestro de la Oficina del Historiador de La Habana, que consiste en un Sistema de Información Territorial (SIT), con modelo tridimensional del Centro Histórico para uso institucional.

Esta fusión aporta una información mucho más precisa del inmueble estudiado, del que poseía anteriormente. A partir de su combinación con otras tecnologías como la Realidad Aumentada, por ejemplo, puede llegar a constituir una herramienta para la realización de proyectos urbanos y arquitectónicos, así como la divulgación del patrimonio cultural construido en general, el existente y el extinto, lo que permite desarrollar nuevas líneas de investigaciones futuras (Figura 7). Basado en esas fusiones, el levantamiento tridimensional también aporta ventajas en el orden académico. Redondo-Domínguez et al. [15] plantean que se puede llegar a establecer procesos educativos y divulgativos del objeto patrimonial, así como un incremento del rendimiento debido a la rapidez y la agilidad en la adquisición de conocimientos.



[15] Fonseca-Escudero D, Redondo-Domínguez E, Valls-Dalmau F. Motivación y mejora académica utilizando realidad aumentada para el estudio de modelos tridimensionales arquitectónicos. *Education in the Knowledge Society* [Internet] Jan 2016 Jan `15 [citado: 2020 Mar 4]; 17(1):45-64. Disponible en: <https://revistas.usal.es/index.php/eks/article/view/14438>

Figura 7. Esquema de realidad aumentada de tramo perdido de muralla. Elaboración propia.

En ese sentido, el escaneado y modelado resultante de la investigación puede considerarse potencialmente el punto de partida del uso de nuevas tecnologías en el Centro Histórico La Habana Vieja, ya que, el lienzo junto con los demás restos, se encuentran en espacios urbanos abiertos, para acceder a ellos no existen obstáculos que dificulten el uso del TLS, por su forma son fáciles de documentar y las partes faltantes resulta fáciles de recrear. Estas últimas se pueden dotar de características similares a las originales, en correspondencia con los materiales y las texturas escaneadas de los fragmentos existentes, que lo convierte en un objeto museable digital en tiempo real. La utilización de la herramienta de medición Escáner Láser Terrestre permitió efectuar un levantamiento de alta calidad y precisión que contribuye potencialmente a la preservación del patrimonio edificado del Centro Histórico La Habana Vieja.

Conclusiones

La medición con escáner láser terrestre permitió obtener toda la información requerida en un solo día de trabajo, suficiente para demostrar la utilidad de la herramienta en cuanto a la agilidad y calidad de la toma de datos, con un registro actualizado detallado y preciso. El trabajo de modelado con la nube de puntos tridimensional y la extracción e interpretación de datos a partir de ella, requiere de entrenamiento, calificación, y computadoras con las características técnicas necesarias.

Los métodos empleados para el levantamiento y modelado del volumen tridimensional referidos sirven de base metodológica para el trabajo con el escáner láser terrestre en el Centro Histórico La Habana Vieja, con posibilidades de ser utilizado en otras edificaciones históricas.

El uso de esta herramienta en el lienzo de la Muralla seleccionado como estudio de caso, constituye un fichero disponible para su exportación a diferentes programas que se emplean en proyectos arquitectónicos y urbanos, y en la divulgación del patrimonio construido; resultados que pueden trascender hacia otros estudios de caso.



Pedro Cuétara-Pérez
Licenciado en Preservación y Gestión del Patrimonio Cultural. Especialista Principal de la subdirección de Diagnósticos de la Empresa Restauradora de la Oficina del Historiador, La Habana, Cuba.
E-mail: pedro.r.cuetara@gmail.com
ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-4458-7483>



Sergio Raymant Arencibia-Iglesias
Arquitecto. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar del Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana. Oficina del Historiador, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
E-mail: sergio@sangeronimo.ohc.cu
ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-9719-4168>



Vivian Mas-Sarabia
Arquitecta. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Titular del Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana. Oficina del Historiador, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
E-mail: vivian@sangeronimo.ohc.cu
ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-8892-9719>

DECLARACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD AUTORAL

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Pedro Cuétara-Pérez: Diseño de la investigación, recolección de los datos, trabajo de campo con escáner láser y de gabinete con software de modelaje 3D, análisis e implementación de los resultados, revisión y redacción del artículo en su versión final.

Sergio Raymant Arencibia-Iglesias: Diseño de la investigación, recolección de los datos, trabajo de campo y de gabinete con software de imágenes, análisis de los resultados, redacción, revisión y aprobación del artículo en su versión final.

Vivian Mas-Sarabia: Diseño de la investigación, recolección de los datos, apoya en la revisión del estado del arte, análisis de los resultados, revisión y redacción del artículo en su versión final.

