

# Universidad de Sevilla

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación



Programa de Doctorado en Arquitectura

Julio 2019

## Tesis Doctoral

Modelado de información y alteraciones geométricas para respaldar el análisis preciso de activos patrimoniales

*Information and geometrical alterations modelling to support accurate analysis of heritage assets*

Doctorando: **Daniel Antón García**

Tutora: **Dra. Dña. Madelyn Rosa Marrero Meléndez.** Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla

Directores: **Prof. Benachir Medjdoub, PhD.** The Creative and Virtual Technologies Research Laboratory. School of Architecture, Design and the Built Environment. Nottingham Trent University

**Dr. D. Juan José Moyano Campos.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla

**Dra. Dña. Madelyn Rosa Marrero Meléndez**



Esta tesis doctoral ha sido financiada por el V y VI Plan Propio de Investigación y Transferencia (VPPI y VIPPIT) de la Universidad de Sevilla (2015-2019) a través de un contrato predoctoral como Personal Investigador en Formación (PIF), convocatoria [CONV-822](#), y las ayudas para estancias de investigación breves en el extranjero, convocatorias [PP2016-5908](#), [PP2017-8696](#) y [PP2018-10628](#) (VPPI y VIPPIT).

La presente tesis doctoral opta a la mención internacional en el Título de Doctor según el RD 99/2011 (normativa regulada por [Acuerdo 7.2/CG 17-6-11](#)).



## **Agradecimientos**

*Considero que estas primeras líneas deben estar reservadas para mis directores de tesis Dr. Juan José Moyano, Dra. Madelyn Marrero y Prof. Benachir Medjdoub, pues su apoyo en distintas etapas ha supuesto llegar asta aquí.*

*Special thanks to Prof. Benachir for having invited me to the Creative and Virtual Technologies Research Laboratory and for opening a wide range of opportunities to me.*

*Deseo también mostrar mi agradecimiento a todos los que han contribuido a que esta tesis sea posible, como Dra. Paloma Pineda, Dr. Alfredo Iranzo, Dr. Raid Shrahily y Dr. Juan Enrique Nieto, coautores de las publicaciones científicas que constituyen la base de esta tesis, así como los expertos que han avalado esta tesis, Dra. Ana Souto y Dr. Alejandro Martínez Rocamora.*

*Además, cabe agradecer la colaboración de Dr. José Antonio Barrera, Dr. Nieto, Roberto Gallardo, Leica Geosystems y Tiago Queiroz en el escaneado 3D, and Jim Sallis for GNSS tuition, esenciales para esta investigación. También debo agradecer el desempeño de los editores y revisores de las revistas científicas que han publicado los distintos trabajos que refuerzan esta tesis, pues han contribuido a mejorarlos significativamente.*

*Asimismo, esta tesis doctoral no podría haber sido posible sin la financiación del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Sevilla y el apoyo de Nottingham Trent University.*

*No sería justo no dar las gracias a quienes me han dado una oportunidad y abierto las puertas de la Universidad para emprender mi carrera investigadora, entre los que se encuentran los compañeros citados anteriormente y Dr. Fernando Rico.*

*Agradecimientos de corazón a mi familia y Marisa por su apoyo incondicional y soportar mis altibajos en estos años de duro trabajo, dedicación, logros y dificultades.*

*Thank you 'habibis' Raid, Haithem, Moulay, Salman and Nacer, Doctors you all, for making me feel part of this team, our family, during my stay in Nottingham.*

*Agradecimientos también a Pepe, mi guía en la sombra, y a tí Macarena, Doctora, por enseñarme que en la Universidad es posible encontrar humanidad.*

*Gracias a Pedro, mi compañero Doctor del departamento, por esas charlas y esos ánimos; un placer.*

*A María Giráldez, por su trato, amabilidad y estar siempre dispuesta a ayudar.*

*A todos mis amigos de Alhaurín, de Sevilla y a Eli y Borja, por hacerme sentir como en casa.*

*A todos, gracias.*



## Resumen

La documentación virtual del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural es un área de conocimiento con una creciente presencia en la literatura científica. Las técnicas de adquisición de datos geométricos como el escaneado tridimensional son ampliamente usadas en investigación y en proyectos de restauración en patrimonio, pues permiten capturar las características geométricas de los activos. En las últimas décadas, estas técnicas han sido implementadas en plataformas *Building Information Modelling* para crear modelos de información de edificios y sitios históricos (HBIM). Sin embargo, la simplificación excesiva en el modelado virtual conlleva no lograr reproducir el estado de conservación real de dichos activos, lo que a su vez imposibilita la obtención de resultados precisos en los análisis que pueden ser realizados en el patrimonio. Por lo tanto, esta tesis doctoral se centra en desarrollar una metodología para generar modelos de información del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural en su estado de conservación actual (modelos *as-built*) a partir de la digitalización 3D, modelando sus alteraciones geométricas, a fin de respaldar el análisis preciso de estos activos con vistas a contribuir a su conservación. Para ello, se lleva a cabo un análisis crítico de las tecnologías de captura 3D (escaneado láser terrestre y escaneado óptico) y metodologías existentes y sus aplicaciones en el contexto del patrimonio. Esto supone validar el proceso de mallado de las nubes de puntos para la constitución de modelos *as-built*. A continuación, se propone un procedimiento semiautomático de tres pasos (nube de puntos — malla 3D — objeto sólido 3D) para la reconstitución virtual en HBIM de edificios históricos y otros activos patrimoniales en su estado de conservación actual.

Con vistas a testar y validar la metodología propuesta, esta tesis aborda la generación de modelos de información de dos casos de estudio (el Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla y las columnas de la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia en Tarifa) para su análisis geométrico y numérico estructural con precisión. Por un lado, el análisis geométrico consiste en estudiar los desplomes o desplazamientos, las distorsiones y las deformaciones superficiales de las columnas, así como la distribución de las alteraciones geométricas. Por otra parte, el análisis numérico se centra en evaluar el comportamiento estructural de la columna más desfavorable en términos de alteraciones geométricas estructurales a través del Método de Elementos Finitos. Estos análisis se llevan a cabo en distintos enfoques de modelado para los casos de estudio en función de sus alteraciones geométricas: (1) *as-built*, (2) simplificado y (3) modelado ideal sin deformaciones. Los resultados del análisis geométrico y el análisis estructural revelan el gran impacto del modelado *as-built* de información y alteraciones geométricas del patrimonio en la precisión de los estudios sobre su estado de conservación. Así, estos modelos *as-built* permiten identificar y medir los elementos o áreas que muestran debilidades a nivel estructural y superficial a través del estudio del alcance de sus alteraciones geométricas y deformaciones. En este sentido, el análisis geométrico de la columna más desfavorable estructuralmente en la Basílica, a partir de la metodología de modelado *as-built* propuesta, permite obtener desplomes y distorsiones de 132% y 235%, respectivamente, frente al resto de columnas y su geometría ideal. En cuanto a su simulación estructural considerando el modelo *as-built*, se obtiene un aumento del 50% en el esfuerzo cortante máximo con respecto al modelo simplificado. Por lo tanto, la contribución principal de esta tesis radica en la propuesta de una metodología para la generación de modelos de información HBIM, a partir de datos de escaneado 3D, que sean de utilidad para diversos análisis y simulaciones que determinen el estado físico de los activos patrimoniales con precisión para su preservación en el tiempo. No obstante, esto no limita la aplicación de la metodología propuesta para el patrimonio a otras disciplinas que pueden beneficiarse del modelado *as-built* de elementos, construcciones o espacios para su posterior análisis.

## **Abstract**

The virtual documentation of the architectural, archaeological and cultural heritage is a field of knowledge with a growing presence in the scientific literature. Geometric data acquisition techniques such as three-dimensional scanning are widely used in research and restoration projects in heritage, since they allow to capture the geometric characteristics of assets. In the latest decades, these techniques have been implemented in Building Information Modeling platforms to create information models of historical buildings and sites (HBIM). However, the excessive simplification in virtual modelling entails failing to reproduce the real conservation status of these assets, which in turn makes it impossible to obtain accurate results in the analyses that can be performed on the assets. Therefore, this doctoral thesis focuses on developing a methodology to generate information models of the architectural, archaeological and cultural heritage in their current conservation status (as-built models) from 3D digitisation, modelling their geometrical alterations, in order to support accurate analysis of these assets to contribute to their conservation. For this purpose, a critical analysis of 3D capture technologies (terrestrial laser scanning and optical scanning) and existing methodologies and their applications in the heritage context is carried out. This involves validating the point cloud meshing process for the constitution of as-built models. Next, a three-step semi-automatic procedure (point cloud — 3D mesh — 3D solid object) is proposed for the virtual reconstitution in HBIM of historical buildings and other heritage assets in their current conservation status.

With a view to test and validate the proposed methodology, this thesis addresses the generation of information models of two case studies (the Pavilion of Carlos V in the Real Alcázar of Seville and the columns of the Basilica in the Archaeological Ensemble of Baelo Claudia in Tarifa) for their accurate structural geometrical and numerical analyses. On the one hand, the geometrical analysis consists of studying the displacements, the distortions and the surface deformations of the columns, as well as the distribution of the geometrical alterations. On the other hand, the numerical analysis focuses on the structural behaviour assessment of the most unfavorable column in terms of structural geometrical alterations through the Finite Element Method. These analyses are carried out in different modelling approaches for the case studies based on their geometrical alterations: (1) as-built, (2) simplified and (3) ideal modelling without deformations. The results of both the geometrical analysis and the structural analysis reveal the great impact of the as-built information and geometrical alterations modelling of heritage on the accuracy of the studies on its conservation status. Thus, these as-built models allow for identifying and measuring the elements or areas which show structural and surface weaknesses through the study of the extent of their geometrical alterations and deformations. In this sense, the geometrical analysis of the most structurally unfavorable column in the Basilica, based on the proposed as-built modelling methodology, allows to obtain displacements and distortions of 132% and 235%, respectively, against the rest of the columns and its ideal geometry. In relation to its structural simulation considering the as-built model, a 50% increase in the maximum shear stress is achieved with respect to the simplified model. Therefore, the main contribution of this thesis lies in proposing a methodology for the generation of HBIM information models, based on 3D scanning data, which are useful for diverse analyses and simulations to accurately determine the physical status of the assets for their preservation over time. Notwithstanding, this does not limit the application of the proposed methodology for heritage to other disciplines that can benefit from the as-built modelling of elements, constructions or spaces for subsequent analysis.



## Índice

<b>Resumen</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>8</b>
<b>Preámbulo</b>	<b>15</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Justificación de la temática	18
1.2. Contribución al conocimiento	20
1.2. <i>Contribution to knowledge</i>	20
<b>2. Estado de la cuestión</b>	<b>21</b>
2.1. Conservación del patrimonio	21
2.2. Revisión de la literatura científica	23
<b>3. Objetivos</b>	<b>29</b>
<b>3. Objectives</b>	<b>29</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>31</b>
4.1. Enfoque metodológico	31
4.2. Metodología de la investigación	32
4.2.1. <i>Adquisición de datos geométricos</i>	33
4.2.2. <i>Mallado tridimensional, validación y tratamiento de mallas</i>	33
4.2.3. <i>Reconstitución digital: modelado sólido 3D</i>	35
4.2.4. <i>Análisis geométrico</i>	35
4.2.5. <i>Modelado y análisis numérico estructural</i>	35
<b>5. Desarrollo experimental</b>	<b>37</b>
5.1. El Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla	38
5.1.1. <i>Adquisición de datos geométricos</i>	39
5.1.2. <i>Validación del proceso de mallado</i>	40
5.1.3. <i>Mallado 3D y tratamiento de mallas</i>	41
5.1.4. <i>Reconstitución digital: modelado sólido 3D</i>	41
5.1.5. <i>Análisis geométrico</i>	43
5.2. La Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia	44
5.2.1. <i>Adquisición de datos geométricos</i>	46
5.2.2. <i>Validación del proceso de mallado</i>	47
5.2.3. <i>Mallado 3D y tratamiento de mallas</i>	48
5.2.4. <i>Reconstitución digital: modelado sólido 3D</i>	48
5.2.5. <i>Análisis geométrico</i>	52
Desplomes de columnas y tambores	54
Distorsión de tambores	54

Alteraciones geométricas superficiales en tambores -----	54
5.2.6. <i>Modelado y análisis numérico estructural</i> -----	55
Generación de mallas 3D FEM-----	55
Modelado y análisis 3D FEM estructurales -----	57
<b>6. Resumen global de los resultados-----</b>	<b>59</b>
6.1. Escaneado 3D -----	59
6.2. Validación del proceso de mallado -----	63
6.2.1. <i>Cenador de Carlos V</i> -----	63
6.2.2. <i>Basílica de Baelo Claudia</i> -----	69
6.3. Reconstitución digital: modelado sólido 3D -----	72
6.4. Análisis geométrico -----	76
6.4.1. <i>Desplomes y distorsiones de columnas y tambores</i> -----	76
6.4.2. <i>Alteraciones geométricas superficiales</i> -----	79
6.4.3. <i>Distribución de alteraciones geométricas</i> -----	81
6.5. Evaluación del comportamiento estructural -----	83
<b>7. Discusión-----</b>	<b>91</b>
<b>8. Conclusiones-----</b>	<b>99</b>
8.1. Futuras investigaciones -----	102
<b>8. Conclusions-----</b>	<b>103</b>
8.1. <i>Future research</i> -----	106
<b>Bibliografía-----</b>	<b>107</b>
<b>Anexo I-----</b>	<b>117</b>
I.1. Indicadores de calidad de la producción científica -----	117
I.2. Copia completa de las publicaciones científicas -----	119
<i>I.2.1. Trabajo primero: Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models</i> -----	121
<i>I.2.2. Trabajo segundo: As-built 3D heritage city modelling to support numerical structural analysis: Application to the assessment of an archaeological remain</i> -----	139
<i>I.2.3. Trabajo tercero: Implementation and management of structural deformations into Historic Building Information Models</i> -----	177
I.3. Otras publicaciones-----	193
<b>Anexo II-----</b>	<b>195</b>
II.1. Materiales suplementarios -----	195
II.2. Equipos usados en la investigación -----	195

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Enfoque de la tesis doctoral. Fuente: propia. ....	31
<b>Figura 2.</b> Flujo de trabajo general. Fuente: propia. ....	32
<b>Figura 3.</b> Flujo de trabajo del proceso ‘nube de puntos — malla — objeto sólido 3D’. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018)...	34
<b>Figura 4.</b> Cenador de Carlos V en contexto. Fuente: propia.....	38
<b>Figura 5.</b> Patologías en viga y pares de la galería norte. Fuente: propia.....	39
<b>Figura 6.</b> Grados de ajuste malla—nube de puntos en función del valor <i>Octree Depth</i> . Fuente: propia. ....	40
<b>Figura 7.</b> Localización del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Nacional (2019) (Antón <i>et al.</i> , 2019). ....	44
<b>Figura 8.</b> Basílica de Baelo Claudia en contexto. Fuente: propia. ....	45
<b>Figura 9.</b> Escaneado 3D de la Basílica en el sitio arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).....	46
<b>Figura 10.</b> Procesos de separación de tambores y modelado de juntas en la columna C1. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	49
<b>Figura 11.</b> Procedimiento de partición de columnas. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).....	50
<b>Figura 12.</b> <i>Script</i> en Grasshopper para la partición de columnas. Fuente: propia. ....	50
<b>Figura 13.</b> Cálculo de distancias para el análisis geométrico. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).....	53
<b>Figura 14.</b> <i>Script</i> en Grasshopper para el cálculo de distancias para el análisis geométrico. Fuente: propia. ....	53
<b>Figura 15.</b> Columna C19. (a) Vista general de la geometría importada y la malla de superficie. (b) Detalle de la basa. (c) Rebanada de la malla hexaédrica 3D (los elementos en color amarillo representan la junta de mortero entre tambores). Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).....	56
<b>Figura 16.</b> Nube de puntos RGB del Cenador de Carlos V. Alzado sur. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de José Antonio Barrera y Enrique Nieto. ....	59
<b>Figura 17.</b> Nube de puntos RGB del Cenador de Carlos V. Perspectiva en ojo de pez de las galerías sur y este. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de José Antonio Barrera y Enrique Nieto. ....	60
<b>Figura 18.</b> Diferencia en la precisión y detalle de TLS y OS para un capitel de columna. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). .....	60
<b>Figura 19.</b> Enlaces automáticos entre escaneos E-x. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). ....	61
<b>Figura 20.</b> Vista en planta de la nube de puntos de la Basílica de Baelo Claudia con numeración de estaciones y columnas. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).....	61
<b>Figura 21.</b> Nube de puntos de la Basílica de Baelo Claudia con intensidades. Perspectiva este. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de Roberto Gallardo y Leica Geosystems. ....	62
<b>Figura 22.</b> Nube de puntos RGB de la Basílica de Baelo Claudia. Alzado oeste. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de Roberto Gallardo y Leica Geosystems. ....	63
<b>Figura 23.</b> Resultados de diferentes <i>plug-ins</i> de mallado en modo de visualización alámbrico. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). ....	64
<b>Figura 24.</b> Muestra de superficie irregular de piedra. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). ....	65
<b>Figura 25.</b> Gráfico de desviaciones de puntos para las mallas de la muestra de piedra. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). .....	66
<b>Figura 26.</b> Comparativa visual e histograma de la desviación de las mallas Artec Studio PLY y Rhinoceros PLY. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). ....	67

<b>Figura 27.</b> Gráfico de desviaciones de puntos para las mallas del capitel de muestra. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018).	68
<b>Figura 28.</b> Precisión de mallado para la columna C1: izquierda) 100.000 caras; centro) 50.000 caras; derecha) 20.000 caras. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	69
<b>Figura 29.</b> Precisión del enfoque de mallado 1: desviación de puntos con respecto a la nube de puntos original. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	70
<b>Figura 30.</b> Desviación de puntos entre malla 1 y malla 2. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	71
<b>Figura 31.</b> Desviación de puntos entre malla 1 y malla 3. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	71
<b>Figura 32.</b> Distintos métodos de conversión de mallas 3D a sólidos. Fuente: propia.	73
<b>Figura 33.</b> Reconstitución digital en el modelo HBIM. Arcos y columnas de la galería sur del Cenador de Carlos V. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018).	73
<b>Figura 34.</b> Reconstitución digital <i>as-built</i> de la Basílica en el Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	74
<b>Figura 35.</b> Reconstitución digital de la columna C19: izquierda) modelo ideal; centro) modelo <i>as-built</i> ; derecha) modelo simplificado. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	75
<b>Figura 36.</b> Representación de desplomes en planta para la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	78
<b>Figura 37.</b> Análisis de deformaciones en la sección media superior de la basa de la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	79
<b>Figura 38.</b> Superposición de malla <i>as-built</i> y modelo ideal de la fachada sur. Fuente: propia.	81
<b>Figura 39.</b> Gráfico de desviaciones de puntos entre malla real y nube de puntos ideal en fachada sur. Fuente: (Nieto-Julián <i>et al.</i> , 2019).	82
<b>Figura 40.</b> Tensiones máximas (S3 principal y cortante (Sxy, Sxz, Syz)) y desplazamientos ( $u_x$ , $u_y$ , $u_z$ ). Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	83
<b>Figura 41.</b> Distribución de desplazamientos (m): arriba) modelo ideal; centro) modelo simplificado; abajo) modelo <i>as-built</i> . Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	84
<b>Figura 42.</b> Distribución S3 de tensión principal (N/m <sup>2</sup> ): izquierda) modelo simplificado; derecha) modelo <i>as-built</i> . Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	85
<b>Figura 43.</b> Distribución Sxz de tensión de cortante (N/m <sup>2</sup> ): izquierda) modelo simplificado; derecha) modelo <i>as-built</i> . Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	85
<b>Figura 44.</b> Formas modales: arriba) modelo ideal; abajo) modelo <i>as-built</i> . Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	88
<b>Figura 45.</b> Factor de cumplimiento (estado límite último axial), y variación máxima de tensión-desplazamiento (modelo simplificado frente a modelos ideal y <i>as-built</i> ). Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019).	88
<b>Figura 46.</b> Defecto en el capitel de columna 5 (ID en el proyecto HBIM: <i>Capitel_5</i> ). Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018).	93

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Comparativa de las características de las mallas entre diferentes <i>plug-ins</i> de mallado. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). .....	64
<b>Tabla 2.</b> Comparativa de las características y formatos para el mallado de la superficie de piedra. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018). .....	65
<b>Tabla 3.</b> Ejemplo explicativo de la desviación estándar. Fuente: propia. ....	66
<b>Tabla 4.</b> Comparativa de las características y formatos para el mallado del capitel. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2018).....	68
<b>Tabla 5.</b> Análisis de la precisión de mallado para la columna C1. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	69
<b>Tabla 6.</b> Análisis de desplomes para la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	76
<b>Tabla 7.</b> Análisis de distorsiones para la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	77
<b>Tabla 8.</b> Análisis de excentricidad para la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	77
<b>Tabla 9.</b> Orientación de inclinación de las columnas con capitel. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	78
<b>Tabla 10.</b> Análisis de desviaciones de puntos en secciones <i>as-built</i> e ideales de tambores para la columna C19. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	80
<b>Tabla 11.</b> Resultados modales: períodos principales. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	86
<b>Tabla 12.</b> Resultados modales: masas efectivas. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	87
<b>Tabla 13.</b> Errores y precisiones en el escaneado 3D. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	94
<b>Tabla 14.</b> Precisiones y características del mallado 3D. Fuente: (Antón <i>et al.</i> , 2019). .....	94



## Preámbulo

La presente tesis doctoral, en el marco del Programa de Doctorado en Arquitectura, se ha desarrollado en el seno del Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla, como contratado predoctoral o Personal Investigador en Formación (PIF), y como Visiting Research Fellow (académico visitante) en Creative and Virtual Technologies Research Laboratory, School of Architecture, Design and the Built Environment en Nottingham Trent University, en Nottingham, Reino Unido.

La adscripción del doctorando al Departamento y al área de Expresión Gráfica Arquitectónica se inició en el año 2013 bajo la figura de becario colaborador para realizar trabajos de escaneado y modelado 3D del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla, siendo tutorizado por Dr. D. Juan Enrique Nieto Julián. A partir de entonces, la temática sobre la aplicación de las tecnologías de escaneado 3D en el patrimonio histórico para su modelado y estudio con precisión ha derivado en la línea de investigación que, actual y principalmente, ocupa al doctorando. Tanto es así, que las diversas estancias de investigación en Nottingham Trent University bajo la tutela de Professor Benachir Medjdoub, además de suponer una especial evolución a nivel académico y personal, han permitido desarrollar la investigación que ha dado lugar a las publicaciones científicas que sirven de base para esta tesis y otros trabajos que derivan de ella y que han sentado las bases del conocimiento raíz para la elaboración de este trabajo. Asimismo, es preciso destacar el desempeño de los coautores de cada una de las publicaciones, así como del equipo de directores de tesis, del que forman parte Dr. Juan José Moyano Campos, Professor Medjdoub y Dra. Madelyn Marrero Meléndez.





## 1. Introducción

La evolución de los modelos de gestión en el sector de la construcción garantiza la eficiencia y la eficacia en proyectos de gran envergadura. La directiva europea 2014/24/UE (The European Parliament and the Council of the European Union, 2014) sobre contratación pública, obliga a que todos los proyectos públicos cuyo valor superen determinados umbrales, adopten sistemas *Building Information Modelling* (BIM) o modelado de información en la construcción. Como respuesta a estas directrices, surgen ciertas asociaciones a nivel internacional que tienen como objetivo prioritario el intercambio de información entre programas del sector de la construcción. El formato IFC, (Industry Foundation Classes), formato de datos de especificación abierta, desarrollado por IAI (International Alliance for Interoperability) y promovido en la actualidad por BuildingSMART International (2017), facilita la interoperabilidad del software y la conexión entre operadores del sector de la construcción e ingeniería, como en simulaciones y cálculos. El formato IFC es fundamental dentro de la metodología BIM para transferir la información del modelo entre distintas aplicaciones de *software* específicas de cada rama de la ingeniería y las propias plataformas BIM de arquitectura. Se trata de una concepción del proyecto que reúne toda la información necesaria para su desarrollo: geometría, estructuras, sistemas constructivos, instalaciones, mediciones y presupuestos, sostenibilidad y gestión. En esta línea, los diferentes usos de los edificios influyen en la aplicación de BIM. Las partes involucradas, como son los promotores, los constructores y la administración, exigen en los procesos de diseño, construcción, mantenimiento y deconstrucción el nivel de desarrollo y detalle (LOD) de los modelos (Volk *et al.*, 2014).

Buena parte de la literatura científica que estudia la preservación del patrimonio cultural reconoce la importancia de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para generar modelos geométricos del edificio y con aspectos de planificación multidisciplinar en la fase de procesos de información y diagnóstico del mismo. Sin embargo, estos proyectos están basados generalmente en simples planimetrías y campañas fotográficas que no reconocen el edificio en su totalidad (Nieto-Julián *et al.*, 2019). En el proceso de restauración arquitectónica es esencial contar con un modelo geométrico que sirva como catálogo de bien de interés cultural, donde queden registrados sus metadatos asociados a aspectos de planificación multidisciplinar.

La tecnología BIM en patrimonio es un campo de conocimiento que se está desarrollando a gran velocidad a nivel de investigación y en un ámbito profesional. No obstante, uno de los grandes retos en la actualidad es solventar la gestión de la información, dispersa por los distintos agentes y operadores que intervienen en la restauración. El procesado de la información debe estar digitalizado e interconectado, de modo que se evite la incoherencia de la información y la duplicidad de esfuerzos.

En esta línea, el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) (International Council on Monuments and Sites, 2019) establece sus bases, aunque todavía no se ha pronunciado específicamente al respecto de introducir tecnologías BIM en los proyectos de conservación y salvaguarda del patrimonio. Sin embargo, se espera que, en breve, dicha organización no gubernamental que tiene como cometido promover la teoría, la metodología y la tecnología aplicada a la conservación, manifieste su postura frente a estas nuevas tecnologías que ya han sido impuestas legalmente en otros países en el sector de los edificios de nueva construcción.

Es precisamente la aplicación de diversas tecnologías a la conservación del patrimonio lo que ocupa principalmente a la presente tesis doctoral, lo cual, a su vez, se justifica en la siguiente sección.

## 1.1. Justificación de la temática

La documentación 3D de edificios y sitios históricos es una necesidad hoy en día para la conservación y la gestión del patrimonio arqueológico, arquitectónico y cultural (Remondino & Rizzi, 2010). El escaneado láser terrestre (TLS, del inglés *Terrestrial Laser Scanning*) (Bakker *et al.*, 2009), como fuente de datos de teledetección, es una tecnología ampliamente utilizada en la literatura científica y en trabajos de rehabilitación para la digitalización del patrimonio. Esta tecnología permite capturar la condición real de esos bienes patrimoniales, incluyendo sus alteraciones estructurales (Mosalam *et al.*, 2014), que pueden ser registradas en las nubes de puntos resultantes. En las últimas décadas, estas técnicas han sido implementadas en plataformas BIM para crear modelos de información de edificios y sitios históricos (HBIM, de *Historic Building Information Modelling*) (Murphy *et al.*, 2009) a través del enfoque *Scan-to-BIM* (de escaneo a BIM) para el modelado virtual de edificios patrimoniales a partir de nubes de puntos. No obstante, esto se lleva a cabo habitualmente utilizando herramientas de modelado BIM estándar y, por lo tanto, no considerando las características reales, dimensiones y singularidades de los edificios históricos (Antón *et al.*, 2018). Tanto el modelado siguiendo los métodos tradicionales de adquisición de datos como otros enfoques con excesiva simplificación en los modelos, como se puede apreciar en otros trabajos de investigación, no representan el estado real de conservación de los activos. Por su parte, la literatura científica demuestra grandes esfuerzos actualmente en la automatización del proceso *Scan-to-BIM*, cuyo desarrollo consiste generalmente en diseñar algoritmos que sean capaces de trazar los límites de las formas que definen los edificios y generar superficies a partir de nubes de puntos, siguiendo reglas de procedimiento para crear objetos paramétricos. Sin embargo, además de implicar una simple aproximación a la geometría de los edificios históricos, si estos complejos algoritmos automáticos no están integrados en *software* comercial, es posible que no estén disponibles a nivel de usuario estándar. El resultado de esta ausencia o insuficiencia de alteraciones geométricas en los modelos imposibilita la obtención de resultados precisos en los diversos análisis que pueden ser realizados en los bienes patrimoniales (Antón *et al.*, 2019). Como consecuencia, surgen las preguntas de investigación que han motivado la presente tesis doctoral: ¿es necesario generar modelos de información del estado actual de conservación del patrimonio? ¿Dichos modelos permiten respaldar análisis precisos?

La respuesta a estas preguntas pasa por evaluar el modelado 3D representativo del estado actual de conservación (enfoque de modelado *as-built*) del patrimonio, basado en datos precisos de teledetección y procesos semiautomáticos, para respaldar mediciones, análisis y simulaciones (Barazzetti *et al.*, 2015; Bassier *et al.*, 2016; Clemente *et al.*, 2006; Compán *et al.*, 2017; Murcia-Delso *et al.*, 2009) precisas a fin de contribuir a la conservación de los activos. Se habla aquí de modelado representativo del estado actual de los activos gracias al uso de las técnicas de teledetección y modelado respetando la geometría original. En esta tesis se defiende que la reconstitución virtual precisa del patrimonio es el paso lógico hacia la consecución de modelos *as-built*, para lo cual se emplea el escaneado 3D —tanto TLS como el escaneado óptico o de luz estructurada (*Optical Scanning* (OS))— como técnica de adquisición de la geometría. Para desarrollar un modelo HBIM riguroso, basado en geometrías realistas, uno de los retos que se presenta es convertir las nubes de puntos procedentes de TLS —o mallas OS— en un modelo de información tridimensional lo más preciso posible. No obstante, a lo largo de este proceso surgen determinadas dificultades, especialmente relacionadas con el propio *hardware* y el *software*. Los archivos que contienen las nubes de puntos de los edificios o sitios históricos pueden llegar a adquirir dimensiones significativas debido a la gran densidad de datos geométricos que incluyen. Por consiguiente, el procesado de las mallas generadas a partir de estas masivas nubes de puntos, que serán la base para la creación de los objetos sólidos que constituyan los modelos HBIM, se enfrenta a las limitaciones computacionales que presentan los sistemas informáticos disponibles. Por su parte, el *software* debería experimentar un mayor desarrollo en lo que respecta a la eficiencia, ya que el tiempo excesivo que actualmente se invierte en el procesado debe experimentar una mejora importante en tareas como la visualización y las operaciones entre objetos 3D.

A pesar de estas dificultades técnicas, en esta tesis doctoral se evalúa la idoneidad y precisión de los métodos y tecnologías existentes para su uso en la creación de HBIM, fin último para el cual se propone un procedimiento semiautomático, partiendo de datos TLS, su conversión a mallas 3D y finalmente a objetos sólidos 3D que pueden ser importados en diversas plataformas como formato IFC. Cabe señalar que cada edificio o sitio histórico es único, por lo que sus componentes también pueden ser significativamente diferentes, ya que no forman parte de las bibliotecas BIM estandarizadas. Por lo tanto, siguiendo el citado procedimiento semiautomático y utilizando equipos y *software* asequibles, los distintos elementos se extraen manual e individualmente de las nubes de puntos, ya que, ante la falta de algoritmos específicos que demuestren su efectividad, es posible identificar fácilmente los distintos elementos y sus relaciones en el espacio con elementos adyacentes. Posteriormente, su conversión a malla con ajuste preciso a su geometría real permite su ensamblaje como objetos sólidos 3D para la reconstitución histórica digital de los edificios o sitios históricos en modelos HBIM. Esta fase se desarrolla en el caso de estudio del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla.

A partir de estos modelos de información HBIM precisos, la tesis aborda la validación del método evaluando el efecto de la geometría detallada en el análisis estructural, tanto a nivel geométrico como de comportamiento. Esto se realiza en el caso de estudio de las columnas de la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia, en Tarifa, España. Primeramente, la reconstitución digital de las columnas de la Basílica (Antón *et al.*, 2019) se lleva a cabo mediante el mencionado procedimiento semiautomático, partiendo del escaneado 3D de la estructura, complementado con programación visual para la composición de las columnas en función de los elementos que las componen y la geometría de su superficie. Esta investigación, implementando el estudio de desviaciones visto en Antón *et al.*, (2018), conlleva el análisis crítico de algoritmos y *software* para el mallado de las nubes de puntos, así como la evaluación de la técnica del escaneado láser a nivel de precisión y de nivelación del equipo. Esto se acomete a fin de validar el método de modelado sólido que genera las columnas y sus alteraciones geométricas. La evaluación del estado de conservación de las columnas del caso de estudio tiene lugar a través de un análisis geométrico —para el cálculo de desplomes, distorsiones y alteraciones geométricas estructurales— y mediante análisis numérico para la evaluación de su comportamiento estructural —método de elementos finitos (FEM, *Finite Element Method*) (Roca, Cervera, Gariup, & Pelà, 2010; Zienkiewicz & Taylor, 2000)—. Los resultados del estudio demuestran el gran impacto del modelado *as-built* en el análisis de los activos patrimoniales con respecto a otros enfoques de modelado sin alteraciones geométricas (ideal) y realizados siguiendo métodos tradicionales o con una simplificación excesiva (modelo simplificado). Asimismo, las áreas que muestran debilidades a nivel estructural se pueden identificar y medir evaluando el alcance de sus alteraciones geométricas y deformaciones. Por lo tanto, a partir de una reconstrucción geométrica precisa, es posible mejorar el estudio del estado de conservación de los bienes patrimoniales de las ciudades.

Una vez justificada la temática de la investigación, cabe enumerar las distintas secciones que constituyen la presente tesis doctoral. Tras describir la contribución de este trabajo al conocimiento, se presenta el estado de la cuestión, el cual se centra, primeramente, en la teoría de conservación del patrimonio y, en segundo lugar, comprende la revisión de la literatura científica sobre las tecnologías y metodologías relacionadas con esta tesis. A continuación, se plantean los objetivos de la investigación. El enfoque metodológico marco de la tesis y la propia metodología de la investigación se presentan para, posteriormente, ser desarrollados a través de los dos casos de estudio que se contemplan en la tesis doctoral. Los resultados de la investigación se recogen y discuten seguidamente. Además, se proporcionan las conclusiones de las investigaciones y futuros trabajos, así como la bibliografía que ha servido para realizar este trabajo. Finalmente, las publicaciones científicas que han dado lugar a esta tesis y sus índices de calidad conforman el *Anexo I*, mientras que el *Anexo II* contiene materiales suplementarios a las investigaciones y los equipos que se han empleado para llevarlas a cabo.

## 1.2. Contribución al conocimiento

La aportación de la presente tesis doctoral a la comunidad científica se sintetiza a continuación:

- Se lleva a cabo un análisis crítico de aplicaciones, algoritmos, tecnologías y procesos disponibles relativos a la digitalización y la reconstitución virtual del patrimonio para el fin de constituir modelos HBIM precisos.
- Se proporciona un procedimiento semiautomático para el modelado de información HBIM preciso de activos del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural a partir de técnicas de escaneado 3D, a fin de que pueda ser usado para el análisis y la gestión de dichos activos.
- Se verifica la relevancia del modelado *as-built* de alteraciones geométricas del patrimonio para su análisis con precisión con vistas a recoger información de índole cuantitativa que tenga utilidad para la conservación de los activos.
- El procedimiento semiautomático para el modelado *as-built* no es de aplicación exclusiva al patrimonio, sino que también puede ser empleado en la reconstitución virtual de activos de diversas ramas de conocimiento donde la captura del volumen de los elementos mediante digitalización 3D sea posible. Ejemplos de ello pueden comprender: edificación existente o de nueva construcción —activos no patrimoniales—; construcciones relativas a la ingeniería civil, tales como puentes, canales, presas, elementos estructurales en puertos, etc.; modelado de esqueletos en el ámbito de la paleontología o biología; mayor entendimiento de los espacios o estructuras habitacionales en la arqueología; estudio de formaciones rocosas o cuevas en geología y espeleología; fines artísticos, entre otros.

## 1.2. Contribution to knowledge

The contribution of this doctoral thesis to the scientific community is next summarised:

- A critical analysis of available applications, algorithms, technologies and processes regarding the digitisation and virtual reconstitution of heritage is conducted to create accurate HBIM models.
- A semi-automatic procedure is provided for the accurate HBIM information modelling of architectural, archaeological and cultural heritage assets from 3D scanning techniques, so that it can be used for the analysis and management of these assets.
- The relevance of the *as-built* geometrical alterations modelling in heritage is verified for the accurate analysis in order to collect quantitative information useful for the conservation of assets.
- The application of the *as-built* modelling semi-automatic procedure is not limited to heritage, but it can also be used for the virtual reconstitution of assets from diverse fields of knowledge where the volume capture of the elements through 3D scanning is feasible. Examples of this may include: existing or new constructions —non-heritage assets—; constructions related to civil engineering, such as bridges, canals, dams, structural elements in ports, etc.; modelling of skeletons in the field of palaeontology or biology; greater understanding of spaces or housing structures in archaeology; the study of rock formations or caves in geology and speleology; artistic purposes, among others.

## 2. Estado de la cuestión

### 2.1. Conservación del patrimonio

En palabras de La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2019):

*<< el patrimonio es nuestro legado del pasado, con lo que vivimos hoy y lo que transmitimos a las generaciones futuras. Nuestro patrimonio cultural y natural son fuentes insustituibles de vida e inspiración. Los sitios del Patrimonio Mundial pertenecen a todos los pueblos del mundo, independientemente del territorio en el que se encuentren. >>*

Por su parte, según la Guía Operacional para la Implementación de la Convención de Patrimonio Mundial (The Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention) de los Estados Miembros de UNESCO (UNESCO World Heritage Committee, 2017):

*<< el patrimonio cultural y natural se encuentra entre los bienes invaluable e irremplazables, no solo de cada nación, sino de la humanidad en su conjunto. La pérdida, por deterioro o desaparición, de cualquiera de estos activos más preciados constituye un empobrecimiento del patrimonio de todos los pueblos del mundo. Partes de ese patrimonio, debido a sus cualidades excepcionales, pueden considerarse de “Valor Universal Excepcional” y, como tales, merecen una protección especial frente a los peligros que, cada vez más, los amenazan. >>*

Esta Convención o tratado, en cuya redacción también participó ICOMOS (International Council on Monuments and Sites, 2019), aporta una definición más exhaustiva del patrimonio cultural, distinguiendo entre:

- los monumentos: obras arquitectónicas, de escultura o de pintura monumentales, elementos o estructuras de carácter arqueológico, inscripciones, cavernas y grupos de elementos, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia,
- los conjuntos: grupos de construcciones, aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les dé un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia,
- los lugares: obras del hombre u obras conjuntas del hombre y la naturaleza, así como las zonas, incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico.

Por lo tanto, dado el gran valor del patrimonio, cabe resaltar el desempeño de organizaciones sin ánimo de lucro para su protección y defensa, como la UNESCO (2019), cuya misión es fomentar la identificación, protección y preservación del patrimonio cultural y natural en todo el mundo considerado de valor excepcional para la humanidad, involucrando a los países y las poblaciones locales a tal fin. No obstante, la preocupación por el patrimonio ya fue contemplada siglos atrás desde la Convención Nacional de Francia en 1794 (Niglio, 2016; Souto Galván, 2004), pero destaca especialmente el siglo XX por los Congresos Internacionales de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos en los años 1931 y 1964, a partir de los cuales surgieron la Carta de Atenas (International Council on Monuments and Sites, 2011), también denominada Carta del Restauero, y la Carta Internacional de Restauración, mejor conocida como Carta de Venecia (International Council on Monuments and Sites, 2004), respectivamente. En ellas se resaltaba la importancia de proteger el patrimonio y su entorno, así como del mantenimiento constante de

los monumentos, de forma que no sean alterados a nivel físico, histórico o artístico, a no ser que sea estrictamente necesario para asegurar su conservación. Fue precisamente a partir del segundo Congreso de 1964 cuando la UNESCO propuso la creación del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) en el año 1965.

Estas Cartas, aunque relevantes a lo largo de la historia contemporánea, no son las únicas en pro de la conservación del patrimonio que han visto la luz, pues como indica López Morales (2016), otras convenciones, cartas, resoluciones y documentos han sido redactados desde mediados del siglo XX hasta comienzos del nuevo milenio: Convención de la Haya ante conflicto armado (1954); Convención del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural (1972); Resolución de Brujas sobre la rehabilitación de ciudades históricas (1975); Carta de Florencia de ICOMOS sobre jardines y sitios históricos (1981); Carta de Cracovia sobre los principios para la conservación y restauración del patrimonio construido (2000); entre otros.

Merece la pena mencionar la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1972), que fue adoptada por la UNESCO en el año 1972, pues se sigue desarrollando en la actualidad. La idea de crear un movimiento internacional para proteger el patrimonio surgió con posterioridad a la Primera Guerra Mundial. Desarrollada a partir de la fusión de dos movimientos separados —el primero se centró en la preservación de los sitios culturales, mientras que el otro trata la conservación de la naturaleza—, la Convención de 1972 aúna la preocupación sobre las amenazas del patrimonio y, por ende, de la riqueza de los pueblos del mundo en este sentido, así como sobre la escasez de recursos para la protección de los activos. Por ello, el tratado establece un sistema de protección colectiva e internacional que complemente —no que sustituya— las estrategias propias de los Estados donde se encuentre el patrimonio. La citada Guía Operacional para la Implementación de la Convención de Patrimonio Mundial (UNESCO World Heritage Committee, 2017), que se ha venido actualizando prácticamente todos los años para reflejar nuevos conceptos, conocimientos o experiencias, es desarrollada por el Comité de Patrimonio Mundial (World Heritage Committee), y recoge criterios precisos para la inscripción de propiedades en la Lista del Patrimonio Mundial y para la prestación de asistencia internacional en virtud del Fondo del Patrimonio Mundial.

Finalmente, es preciso comentar que tanto la Carta de Atenas como la de Venecia establecían la posibilidad de utilizar técnicas y materiales modernos en la restauración de los monumentos, pero siempre dando prioridad a las técnicas tradicionales. Además, en la Carta de 1964 se establecía que los trabajos de conservación, de restauración y de excavación debían ir siempre acompañados de documentación precisa, en forma de informes analíticos y críticos, ilustrados con dibujos y fotografías. Esto refleja cómo los trabajos que contribuyen a proteger el patrimonio, en las distintas fases del proceso, pueden beneficiarse de la evolución de la técnica. López *et al.*, (2018) explican que la creación de modelos virtuales estructurados como parte del proceso de mejora del patrimonio arquitectónico es una necesidad urgente hoy en día, dada la escasez generalizada de documentación del patrimonio (Remondino & Rizzi, 2010). Según Historic England (2017), diversos expertos y especialistas constituyen una colaboración multidisciplinar en el patrimonio, para lo cual debe garantizarse que la adición, el intercambio y la interpretación de los datos relativos a los activos patrimoniales han de informar su valor e importancia. La tecnología BIM, basada en datos geométricos precisos a partir del escaneado 3D, admite datos cualitativos y cuantitativos para proporcionar la visión del estado de conservación real y el comportamiento de los activos a fin de generar nuevo conocimiento de utilidad para su ciclo de vida. Consecuentemente, la implementación de las nuevas tecnologías en este ámbito patrimonial constituye un avance significativo para la conservación de los activos, y es precisamente esto lo que motiva la presente tesis doctoral.

## 2.2. Revisión de la literatura científica

Es preciso establecer el contexto científico en el cual se desarrolla esta tesis doctoral, que implementa varias de las tecnologías más utilizadas en la literatura científica para la captura de la geometría y la creación de modelos digitales del patrimonio. Además de revisarse las tecnologías TLS y BIM, se aborda la revisión de trabajos sobre análisis numérico estructural en activos patrimoniales.

En primer lugar, tal como describen Thomson y Boehm (2015), BIM, del inglés *Building Information Modelling*, es un flujo digital de datos basados en un modelo 3D paramétrico que contiene información acerca de los activos —ya sean nuevos o históricos—, a pesar de que, según Barlish y Sullivan (2012), la definición de BIM no está claramente definida. La adopción de BIM en el sector AEC (Architecture, Engineering and Construction) se ha ido desarrollando a gran velocidad, aunque su implementación en la gestión de estos activos es más pausada, lo cual genera una necesidad que los últimos avances en investigación están comenzando a satisfacer (Volk *et al.*, 2014). Considerando que esta implementación concierne, o debería, al ciclo de vida completo del edificio, la metodología BIM se convierte en una opción interesante para lograr la eficiencia en los recursos naturales, el coste y el tiempo (Volk *et al.*, 2014). En el caso de los edificios patrimoniales, aunque hay una necesidad real de conservar, restaurar y gestionar estos activos históricos, BIM aplicado al patrimonio cultural es bastante reciente (Nieto-Julián *et al.*, 2019). Esta tecnología no ha sido aún implementada en todo su potencial, si bien esta situación se está invirtiendo en los últimos años (Logothetis *et al.*, 2015; Logothetis & Stylianidis, 2016).

Una vez presentada la tecnología BIM y analizado el carácter investigativo de la tesis doctoral en el modelado de información del patrimonio, resulta interesante indagar en ello con mayor profundidad. Penttilä, Rajala y Freese (2007) fueron los primeros investigadores que evaluaron la posibilidad de aplicar BIM a edificios históricos, y mencionaron la complejidad para modelar sus fachadas. El trabajo es una mera intención de modelar en *software* básico, ya que las herramientas paramétricas aún no se implementaron. Pauwels *et al.* (2008) trabajaron bajo el término AIM + Virtual Heritage para proponer el modelado tridimensional de información arquitectónica (AIM) para los procesos de digitalización y archivo aplicados al patrimonio cultural internacional. Por su parte, Arayici (2008) abordó la aplicación de BIM a estructuras de edificios existentes a través de la captura de datos mediante escaneo láser terrestre (TLS), procesado automático de datos y reconocimiento de patrones. En cambio, la creación de un modelo 3D de estructuras históricas a partir del escaneo láser e imágenes digitales, incluidos datos relacionados con sus métodos de construcción, materiales, etc., fue abordada por primera vez por (Murphy *et al.*, 2009), quienes definen el sistema como *Historic Building Information Modelling* (HBIM, modelado de información de edificios históricos). Este sistema mejoró la aplicación del lenguaje geométrico de figuras para crear objetos paramétricos a fin de representar geometrías más complejas, basadas en los patrones de Vitrubio. Desde entonces, otros autores han empleado HBIM (Barazzetti *et al.*, 2015; Brumana *et al.*, 2014; Chiabrando *et al.*, 2016; Hichri *et al.*, 2013; Oreni, 2013; Simeone *et al.*, 2014) como una aplicación de BIM al patrimonio arquitectónico, lo que Murphy *et al.* (2013) definen como una novedosa biblioteca prototipo de objetos paramétricos. Para López *et al.* (2018), la metodología HBIM se compone de la geometría —a partir de técnicas de detección remota (*remote sensing*)— y la identidad (información) de los edificios analizados. En base a este sistema, Nieto *et al.* (2016) subrayan la importancia de la interoperabilidad de la información que manejan las diversas disciplinas involucradas en el proceso de conservación y restauración patrimonial. De hecho, la conservación, consolidación y restauración del patrimonio arquitectónico precisan de un tratamiento multidisciplinario, considerando la intervención desde el punto de vista de la integridad dentro del contexto cultural al que pertenece (Lombillo y Villegas, 2008). Las habilidades de coordinación del equipo de intervención pueden favorecer la investigación histórica y descubrir fenómenos y comportamientos estructurales. El objetivo del estudio de los edificios patrimoniales es comprender la concepción, las habilidades y las técnicas de construcción que se han producido en su estructura, el entorno y los eventos que pueden haber causado el daño. Con el desarrollo de HBIM, ha habido un importante avance científico en los sistemas de modelado de información que se traduce en la

diversidad y complejidad de la tecnología BIM, para la cual existen numerosas plataformas de *software* (Logothetis *et al.*, 2015). Como se indica en la revisión de la literatura realizada por Megahed (2015), la variedad en la semántica de los sistemas de construcción muestra dicha complejidad.

Para (Volk *et al.*, 2014), la captura, el procesado y la creación de modelos BIM a medida son tareas que requieren mucho tiempo para los edificios existentes. Como resultado, existe un reto de investigación en la automatización de esos procesos, especialmente cuando las geometrías abordadas se derivan de TLS o de cualquier otra fuente de detección remota. Aunque el trabajo de Thomson y Boehm (2015) no está orientado hacia el patrimonio, primero revisan la literatura científica sobre la automatización del escaneado 3D al modelado paramétrico 3D en plataformas BIM, y luego proporcionan un flujo de trabajo para este propósito. Sin lugar a dudas, es más probable que los edificios históricos contengan elementos decorativos complejos en comparación con los edificios nuevos, lo que hace necesario utilizar técnicas de captura de datos precisas.

La reconstrucción o reconstitución virtual de los bienes patrimoniales es el paso lógico hacia la implementación de BIM para la generación de modelos *as-built* (Hichri *et al.*, 2013; Saygi & Remondino, 2013; Tang *et al.*, 2010). Por lo tanto, para evitar el modelado 3D manual de elementos, esta reconstitución virtual debe obtener un modelo HBIM preciso a partir de los datos de escaneo 3D (Logothetis *et al.*, 2015). Sin embargo, puede ser deseable modelar determinados elementos dependiendo de las necesidades del proyecto. Por ejemplo, Boeykens *et al.* (2012) abordan la reconstrucción virtual de una sinagoga destruida durante la guerra mediante el uso de BIM, que requiere elementos no estandarizados y, por lo tanto, no que no se encuentran disponibles en las bibliotecas de las plataformas BIM. En este sentido, Baik *et al.* (2014) proponen bibliotecas de elementos arquitectónicos creados mediante escaneo láser e imágenes. Estas bibliotecas se han utilizado en diferentes proyectos HBIM al tiempo que reducen el tiempo de modelado. Otros autores, como Nabil y Saleh (2014) emprenden la reconstitución 3D de artefactos de museo utilizando la técnica fotogramétrica Structure-From-Motion (SFM), que es una opción de bajo coste y fácil de usar para la digitalización 3D.

Por su parte, el escaneo láser se ha utilizado con éxito en la detección de alteraciones físicas en estructuras de edificios durante el proceso de construcción y mantenimiento: El-Hakim *et al.*, (2004) reconstruyen en 3D sitios históricos de grandes dimensiones a través del modelado basado en imágenes y TLS; Barber *et al.* (2006) examinan la aplicación de TLS en la conservación arquitectónica; Olsen *et al.* (2009) estudian la detección de daños y el cambio volumétrico; Armesto-González *et al.* (2010) combinan TLS con procesamiento digital de imágenes para estudiar daños en materiales pétreos de edificios históricos; Guarnieri *et al.* (2013) utilizan TLS, estación total y fotogrametría para la monitorización de la estabilidad con análisis de modelo de elementos finitos (FEM) aplicado a un edificio histórico, y también revelan las dificultades del uso de la técnica de escaneo; Pesci *et al.* (2013) estiman el error en las mediciones de TLS para interpretar correctamente los rastros de deformación en edificios después de los terremotos. En particular, estos autores detectan y evalúan los cambios de una torre bajo carga sísmica con el fin de proporcionar datos precisos para el diagnóstico urgente. Además, utilizan TLS en diferentes momentos y evalúan el comportamiento estructural del edificio. Chellini *et al.* (2014) usan TLS y FEM para evaluar la vulnerabilidad sísmica; Kim *et al.* (2015) abordan el control de calidad mediante la localización y cuantificación de los defectos de desprendimiento del hormigón; Lezzerini *et al.* (2016) mapean la fachada de piedra de una iglesia en Pisa, Italia, utilizando un *software* de diseño asistido por computadora (CAD) y sistema de información geográfica (SIG) con datos de escaneo láser e imágenes de alta resolución; o Mukupa *et al.* (2017), quienes proponen un modelo de procesamiento de tres etapas para el análisis de deformación estructural, basado en la revisión de la literatura sobre el uso de TLS en la detección de cambios estructurales y la monitorización de deformaciones. Esos autores hallan problemas importantes no resueltos, tales como procedimientos de calibración estrictos, registro preciso de datos de nubes de puntos y georreferenciación. Vežočník *et al.* (2009) proponen una metodología para la monitorización de alta precisión para deformaciones a largo plazo, basada en TLS asistida por taquimetría



y posicionamiento mediante el sistema de navegación global por satélite (GNSS), a fin de evaluar el desplazamiento de los datos de la nube de puntos en un terreno no estable. Baraccani *et al.* (2016) desarrollan modelos FEM para investigar los diferentes factores que tienen un efecto en el comportamiento estructural. Su trabajo se centra en la Catedral de Módena, que, debido a su complejidad, les lleva a utilizar el sistema estático de monitorización de salud estructural (SHM) y el escaneo láser 3D en diferentes etapas. Shen *et al.* (2018) usan TLS para capturar nubes de puntos densas con vistas a cuantificar los cambios en las pendientes de roca debido a la erosión del agua, mediante el cálculo de la distancia de nube a nube y con una técnica de rango de imagen. Xu *et al.* (2018) monitorizan las deformaciones de una presa en China durante diferentes períodos mediante la integración de TLS y NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) para crear los modelos 3D a comparar. En cuanto al uso de TLS en sitios arqueológicos, Lerma *et al.* (2010) y Cortés-Sánchez *et al.* (2018), combinando el escaneo láser con la fotogrametría y el escaneo óptico 3D, respectivamente, realizan la digitalización fotorrealista de los grabados del Paleolítico en cuevas de la Península Ibérica (España) para producir modelos 3D precisos y planimetría tradicional. Finalmente, cabe describir algunas publicaciones donde se utiliza el escáner láser Leica BLK360, el dispositivo TLS considerado en el caso de estudio de Baelo Claudia en esta tesis doctoral. Calantropio *et al.* (2018) discuten los métodos y analizan los resultados de la digitalización 3D utilizando este TLS portátil y un pequeño dron (UAV, Unmanned Aerial Vehicle). Los autores también resumen las características y el rendimiento de estos dispositivos, de los cuales el escáner BLK360 demuestra ser una buena solución para la digitalización. Sun y Zhang (2019) utilizan este dispositivo y la fotogrametría para crear los modelos 3D con el fin de evaluar la precisión de la videogrametría aplicada al patrimonio arquitectónico chino.

A fin de resaltar la importancia de usar equipos de alta resolución para capturar y modelar deformaciones estructurales y superficiales de manera precisa, se describe a continuación el trabajo de Moisan *et al.* (2018). Los autores evalúan una técnica alternativa y reciente para levantamientos 3D en entornos submarinos confinados: el escaneo mecánico de sonar (MSS). Obviamente, el MSS tiene como objetivo producir datos de nubes de puntos, por ejemplo, de infraestructuras subacuáticas, pero su comparación con la precisión de TLS en el mismo estudio de caso, cuando no hay agua, revela su papel crucial para las deformaciones superficiales. Los resultados de la evaluación demuestran que el escaneo láser terrestre es capaz de capturar más detalles que el escaneo por sónar, especialmente cuando estos detalles tienen un tamaño inferior a 4 cm, a pesar de los resultados de MSS podrían mejorarse al colocar el escáner más cerca de la superficie. Es posible que las deformaciones y características específicas no se puedan registrar, modelar ni analizar cuando se utilizan técnicas que carecen de la resolución requerida. Teniendo en cuenta esa diferencia en la precisión de la nube de puntos, se aprecia con claridad su impacto en la precisión de modelado superficial o estructural en los activos patrimoniales, lo cual es tenido en cuenta en la presente tesis doctoral.

Según Xiong *et al.* (2013), en el ámbito de la ingeniería, la ingeniería inversa ha permitido que los modelos superficiales de piezas mecánicas se conviertan en modelos volumétricos. Por el contrario, a pesar del uso generalizado de TLS en la literatura científica para la captura tridimensional de los edificios históricos existentes, no se saca provecho de esta técnica para obtener un modelo de información preciso (Antón *et al.*, 2018). En el campo del modelado 3D aplicado a edificios históricos existentes para plataformas BIM, se afirma que el uso de técnicas de escaneo 3D conlleva la obtención de modelos *as-built*, producidos mediante la adquisición de nubes de puntos, la segmentación y reconocimiento de elementos (Baik, 2017; Chiabrando *et al.*, 2016; Hichri *et al.*, 2013; Huber *et al.*, 2011; Murphy *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2010; Thomson & Boehm, 2015; Xiong *et al.*, 2013). Pu y Vosselman (2009) no utilizaron el término *Scan-to-BIM* expresamente, quizás porque el concepto de esta automatización estaba en sus primeras etapas. Su trabajo consistió en la reconstrucción automática de aberturas de fachadas y elementos a partir de datos de nubes de puntos de escaneo láser terrestre. Un año después, Hajian y Becerik-Gerber (2010) plantearon las inexactitudes de la nube de puntos del modelo 3D insertado en BIM. Zeibak-Shini *et al.* (2012) desarrollaron un método para generar un modelo de información de las estructuras deformadas de

los edificios existentes en caso de terremotos mediante escaneo láser. Después de estos trabajos iniciales, varias publicaciones tratan la automatización de los datos de la nube de puntos (Jung *et al.*, 2014; Previtali *et al.*, 2014; Thomson & Boehm, 2015; Zhang & Zakhor, 2014), y más recientemente, aparece un extenso estado de la cuestión de BIM aplicado al edificio histórico por Dore y Murphy (2017). Se puede prestar especial atención al trabajo de Thomson y Boehm (2015), quienes utilizan algoritmos para la reconstrucción de la geometría a partir de nubes de puntos y su clasificación en modelos IFC (Industry Foundation Classes) de intercambio entre plataformas BIM. Hong *et al.* (2015) proponen un método semiautomático para la creación de modelos BIM en interiores, generando un modelo de estructura alámbrica en 3D combinado con nubes de puntos. Jung *et al.* (2014) abordan la segmentación de nubes de puntos a través del algoritmo RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) y la eliminación de su ruido de fondo, rastreando así los contornos de las figuras. En esa investigación, las características de los planos y puntos se incorporaron al *software* BIM para su uso como referencias para la construcción de los elementos paramétricos. Zhang y Zakhor (2014) proponen un algoritmo para identificar automáticamente sectores de ventanas en fachadas exteriores a través de nubes de puntos. Su investigación se limita a obtener los resultados de la segmentación en lugar de facilitar el procesamiento de objetos BIM.

Con todo lo anterior, una de las grandes ventajas de los procedimientos de automatización del proceso *Scan-to-BIM* es el ahorro de tiempo y recursos humanos en el manejo y la gestión desde la nube de puntos hasta la construcción de los objetos paramétricos del modelo. Sin embargo, Thomson y Boehm (2015) afirman que uno de los problemas a resolver es la dificultad de representar geometrías irregulares en las plataformas BIM. En este sentido, por ejemplo, hay deformaciones en edificios históricos, así como complejos elementos singulares en iglesias y catedrales. Bassier *et al.* (2016) modelan una estructura de cubierta de madera tradicional a partir de datos de nubes de puntos TLS, realizando una segmentación manual, pero no especifican en qué medida las mallas se ajustan a la nube de puntos para evaluar su precisión. Habiendo modelado el conjunto, evalúan el comportamiento estructural del modelo 3D. Esto muestra la relevancia y la utilidad de las metodologías que modelan los edificios del patrimonio de manera más realista.

El modelado 3D de elementos a partir del reconocimiento de patrones o contornos —bordes generados automáticamente mediante una serie de algoritmos— transfiere las formas originales, irregulares y detalladas existentes en las nubes de puntos a formas excesivamente simplificadas en algunos casos. Los edificios también pueden modelarse en BIM tomando la nube de puntos como referencia, pero el resultado es un modelo teórico que carece de las alteraciones geométricas del propio edificio y, por lo tanto, de su condición real. Además, incluso deformando posteriormente este modelo teórico, sigue siendo una tarea puramente manual y propensa a errores. Esto puede apreciarse en los trabajos de Fai *et al.* (2011) y Mill *et al.* (2013), quienes integran los datos de nube de puntos TLS, asistidos por otras técnicas, en el *software* BIM para crear modelos de información. Por su parte, Dore y Murphy (2013) modelan huecos en fachadas de edificios de forma semiautomática a partir de estas nubes de puntos utilizando el lenguaje de programación GDL (Geometric Description Language) del *software* ArchiCAD (Graphisoft, 2016), también en modelos teóricos. En otras ocasiones, ciertos elementos arquitectónicos se implementan en modelos de información, pero no como base para el modelo en sí, sino como complemento de su visualización (Nieto *et al.*, 2016). Otras investigaciones (Altuntas, 2015; Altuntas *et al.*, 2016) integran nubes de puntos a partir de la imagen, ya sea mediante cámaras de tiempo de vuelo (TOF, *Time Of Flight*) o por fotogrametría, en las nubes de puntos obtenidas por TLS aplicadas a geometrías complejas en patrimonio arquitectónico, pero su finalidad es generalmente la visualización (Oreni *et al.*, 2014). Dore *et al.* (2015) aproximan la geometría de su modelo a través de la segmentación y la generación de secciones a partir de nubes de puntos a diferentes alturas, creando superficies que constituyen recintos con un cierto grado de deformación. Como resultado, la generación de múltiples secciones podría conllevar la omisión de la información gráfica (alteraciones geométricas en este caso) que realmente existe entre ellas. Nieto-Julián *et al.* (2019), por su parte, abordan la implementación y gestión de deformaciones estructurales de edificios históricos en modelos de información HBIM, para lo que siguen dos procedimientos de modelado a fin de

generar elementos paramétricos de los elementos estructurales. No obstante, los propios autores reconocen la escasa operatividad del primer procedimiento, basado en el ajuste manual de la superficie externa del elemento estructural paramétrico con respecto a la nube de puntos. El segundo procedimiento de modelado, basado en operaciones booleanas para obtener elementos estructurales paramétricos con alteraciones geométricas, cuenta con un gran potencial para elementos puntuales. Sin embargo, la reconstitución digital de los edificios históricos conlleva el modelado *as-built* de todos los elementos estructurales que los componen, elementos cuyo volumen requiere de procedimientos que reflejen la totalidad de las alteraciones geométricas de los elementos estructurales, más allá de las imperfecciones superficiales que presenta el muro del caso del caso de estudio en dicha investigación. En este sentido, en esta tesis doctoral se presenta un procedimiento de modelado de alteraciones geométricas para elementos volumétricos a partir de la geometría capturada por escaneado tridimensional que, una vez convertidos a objetos sólidos, constituyen los objetos paramétricos del proyecto HBIM.

Por otra parte, dados los objetivos de esta tesis, se debe revisar la literatura científica al respecto de las simulaciones que los modelos simplificados y los modelos *as-built* permiten. Estas simulaciones pueden ser aplicadas a distintas tipologías de edificios y sitios históricos, y pueden ser de diversa naturaleza, como por ejemplo la evaluación del comportamiento estructural bajo patrones de carga estática y dinámica a través de FEM (Zienkiewicz & Taylor, 2000; Roca *et al.*, 2010), simulaciones energéticas, de humedad, de erosión, entre otros.

A fin de evaluar los beneficios y limitaciones de los métodos actuales para la evaluación sísmica, de Felice *et al.* (2017) testan y analizan dos modelos de mampostería a escala real en una mesa de agitación a través de dinámicas de bloques múltiples, FEM y DEM (Método de Elementos Discretos), y llevan a cabo predicciones de pruebas ciegas y simulaciones de los resultados experimentales obtenidos. Destacan que la definición de modelos simplificados puede conllevar un error de estimación, y el análisis de los modelos macro FEM puede comprometer los resultados cuando existen grandes desplazamientos de cuerpo rígido o rotaciones cerca del colapso. AlShawa *et al.* (2017) testan los mismos modelos combinando FEM y DEM para evaluar el comportamiento estructural fuera del plano en edificios de mampostería. Los autores defienden la discretización de bloques gruesos y elementos, ya que estos modelos coinciden con los resultados experimentales. No obstante, los enfoques de modelado menos precisos pueden conducir a peores resultados. Como es bien sabido, siempre se requiere un análisis de sensibilidad de malla para garantizar la exactitud de los resultados, así como la no dependencia con respecto a la malla. Cannizzaro y Lourenço (2017) realizan el análisis con mesa de agitación de modelos de mampostería que, lejos de lograr una gran precisión en las formas, simulan la respuesta no lineal fuera del plano bajo las premisas de modelos simplificados para reducir los esfuerzos computacionales. Otro ejemplo de la relevancia de la discretización refinada es la investigación de Mordanova y de Felice (2018), quienes utilizan el DEM para analizar la capacidad sísmica de un muro del Coliseo y los arcos de un acueducto en Roma, teniendo en cuenta el patrón detallado de mampostería de bloques de los elementos que integran dichos casos de estudio.

En un trabajo anterior en el conjunto arqueológico de Baelo Claudia —caso de estudio que también se integra en esta tesis—, Pineda e Iranzo (2017) predicen la evolución del daño bajo carga dinámica de viento en el 'Cardo de las columnas' utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD), donde las pequeñas partículas de arena suspendidas tienen un alto potencial de erosión debido a los vientos de alta velocidad. Los resultados de esta investigación son útiles para la predicción de la pérdida de masa de piedra en las columnas. Sin embargo, aunque se obtienen resultados relevantes por medio de geometrías simplificadas, el uso de geometrías más detalladas podría enriquecer los resultados. Al Aqtash *et al.* (2017) emplean FEM para mostrar el efecto de la humedad en muros de adobe bajo carga lateral en el plano. Aunque optan por elementos de cáscara (sin espesor) para modelar las paredes, los autores resaltan que, si la longitud es inferior a 20 veces el grosor, se podrían aplicar geometrías *as-built*. Finalmente, Riveiro *et al.* (2011) abordan el modelado 3D de un arco de un puente a partir de la fotogrametría y las herramientas

CAD para posteriormente realizar un análisis mecánico FEM en dichos modelos. Los autores destacan las ventajas de considerar geometrías precisas de naturaleza menos regular en los resultados del análisis estructural. Castellazzi *et al.* (2017) afirman que la precisión que utilizan para el modelado a través de la creación de secciones transversales y de unidades discretización es suficiente para el análisis estructural global del edificio histórico, pero en dicha investigación se puede apreciar cómo la geometría irregular resultante difiere de la continuidad de las superficies de las paredes y las dimensiones y proporciones reales de los elementos. No obstante, este enfoque global se beneficia de una reducción de los recursos computacionales en un estudio de caso de semejante magnitud, como sucede en el trabajo de Garofano y Lestuzzi (2016), quienes desarrollan una evaluación sísmica de un edificio histórico masivo siguiendo un enfoque de modelado macro. Utilizan la técnica del Método de Elementos Aplicados (AEM) combinada con el análisis dinámico no lineal en lugar de usar FEM. Los autores afirman que este enfoque considera la precisión y la eficiencia, lo que también es importante en el análisis estructural de activos patrimoniales complejos.

Con vistas a cerrar esta sección, el trabajo de Korumaz *et al.* (2017) es un ejemplo de la aplicación de la nube de puntos TLS en la evaluación de la salud estructural de construcciones históricas. Esta evaluación se lleva a cabo mediante el análisis de desviación (geométrica) (DA) y el análisis FEM de un minarete que presenta una inclinación severa. Como resultado, se registran y miden las alteraciones estructurales. Sin embargo, en comparación con los datos y los parámetros considerados en la Basílica de Baelo Claudia en esta tesis, las nubes de puntos TLS de baja densidad que los citados autores emplean en la superficie exterior del edificio se utilizan para crear el modelo sólido 3D del minarete en *software* CAD, asistido por fuentes documentales para reconstruir su interior. La insuficiencia de las que los autores denominan geometrías *as-built*, junto con la carencia de datos en la parte superior del minarete debido a su gran altura, complican la adquisición de modelos precisos del patrimonio estudiado. Asimismo, el DA llevado a cabo podría ser más exhaustivo a fin de proporcionar mediciones de alteración más precisas.

Como conclusión, a partir de esta revisión de la literatura se puede destacar la importancia del modelado de información HBIM *as-built* del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural. Registrar su geometría de forma detallada es esencial para respaldar análisis precisos de su estado de conservación para contribuir a su mantenimiento, restauración e incluso diseminación de la riqueza que estos activos conllevan.

### 3. Objetivos

El propósito de esta tesis doctoral es desarrollar una metodología para generar modelos de información del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural en su estado de conservación actual a partir de la digitalización 3D, modelando sus alteraciones geométricas, para respaldar el análisis preciso de estos activos con vistas a contribuir a su conservación. Esto se desarrolla a través de los siguientes objetivos:

- Analizar de forma crítica las tecnologías y metodologías existentes para la captura y el modelado 3D, así como sus aplicaciones en el contexto del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural.
- Proponer una metodología semiautomática para la reconstitución virtual de edificios históricos y otros activos patrimoniales en su estado de conservación actual en modelos de información histórica HBIM precisos, considerando las alteraciones geométricas que realmente presentan, en base a técnicas de escaneado 3D para el levantamiento gráfico de los casos de estudio considerados.
- Testar y validar la metodología propuesta por medio del análisis de las alteraciones geométricas de los casos de estudio y la simulación para su análisis numérico estructural en distintos enfoques de modelado en función de dichas alteraciones geométricas.

### 3. Objectives

The aim of this thesis is to develop a methodology to generate information models for the architectural, archaeological and cultural heritage in their current conservation status from 3D digitisation, modelling their geometrical alterations, to support the accurate analysis of these assets with a view to contribute to their conservation. This is developed through the following objectives:

- Critically analyse existing technologies and methodologies for 3D capture and modelling, as well as their applications in the context of architectural, archaeological and cultural heritage.
- To propose a semi-automatic methodology for the virtual reconstitution of historical buildings and other heritage assets in their current conservation status in accurate HBIM historical information models, considering their actual geometrical alterations, based on 3D scanning techniques for the graphic survey of the case studies considered.
- Test and validate the proposed methodology through the analysis of the geometrical alterations of the case studies and the simulation for the structural numerical analysis in different modelling approaches according to those geometrical alterations.



## 4. Metodología

En esta sección, se describe el enfoque metodológico de la tesis doctoral y se sintetiza la propia metodología, la cual está basada en casos de estudio, para dar detalles de los objetivos, procesos e hipótesis planteados a fin de orientar al lector de este documento.

### 4.1. Enfoque metodológico

El enfoque de la tesis doctoral se fundamenta en la experiencia adquirida a lo largo del desarrollo de las publicaciones científicas que la respaldan, por lo que responde a la naturaleza de una investigación empírica. Así, la identificación de los problemas o preguntas que dan lugar a esta investigación conlleva la recopilación de información, planteamiento y comprobación de hipótesis, y análisis de los resultados (Radrián, 2005). Según Díaz Narváez (2006), es en el proceso de formación intelectual del investigador donde se asimilan “las teorías, sistemas de principios, leyes, conceptos e hipótesis teóricas que orientan el proceso de búsqueda, registro e interpretación de los hechos a la luz de los conocimientos”. Este conocimiento heurístico comprende técnicas, habilidades y métodos prácticos aplicados para dar respuesta a los objetivos en base a las hipótesis planteadas. Cabe mencionar que la heurística es aquí referida a partir de su acepción como técnica de la indagación y del descubrimiento (Real Academia Española, 2019), no como la búsqueda de la solución lo suficientemente válida para el fin, una racionalidad aproximada que podría ser empleada por quien posee información y habilidades limitadas (Simon, 1955, 1956). Según Papantoniou *et al.* (2015), las heurísticas son reglas generales para el razonamiento, una simplificación o una suposición educada que reduce o limita la búsqueda de soluciones en dominios que son difíciles y poco conocidos. A diferencia de las estructuras formales como los algoritmos, las heurísticas no garantizan soluciones óptimas, ni siquiera factibles, y se utilizan a menudo sin garantía teórica. Por el contrario, la tesis doctoral que aquí se presenta establece objetivos realistas en base a casos de estudio para su desarrollo con rigor científico y con una base cuantitativa, de modo que se contempla la validación de los procesos para su posterior aplicación. La Figura 1 resume el enfoque de la tesis doctoral, destacando especialmente su carácter metodológico.

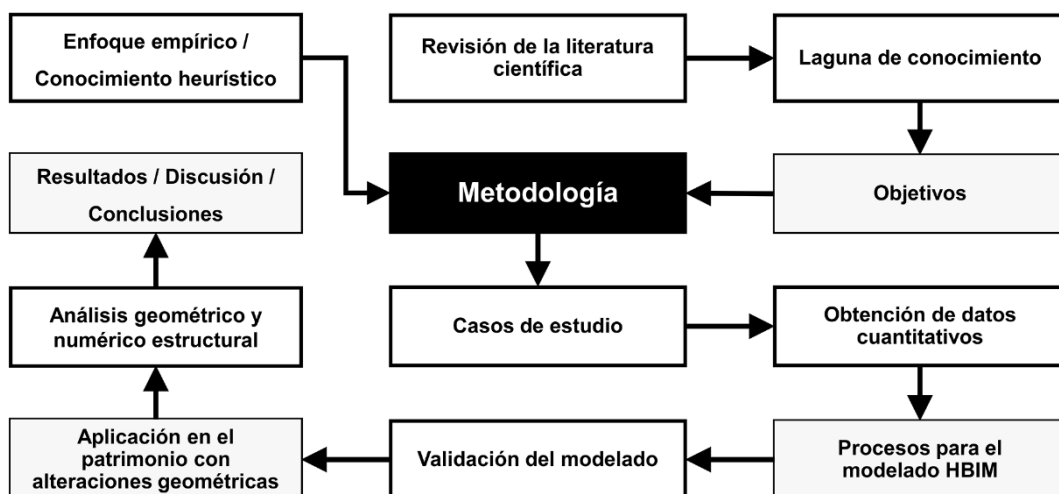


Figura 1. Enfoque de la tesis doctoral. Fuente: propia.

## 4.2. Metodología de la investigación

Con anterioridad a presentar la investigación derivada de los trabajos que respaldan esta tesis, ilustrar la metodología llevada a cabo permite describir las distintas etapas y los procesos que se han diseñado y así proporcionar una visión global del planteamiento. La Figura 2 abarca desde una perspectiva general —el interrogante principal que motiva esta investigación— centrada en los casos de estudio considerados, hacia la descripción exhaustiva de los procesos semiautomáticos que conducen a generar los modelos de información del patrimonio con alteraciones geométricas para su análisis con precisión.

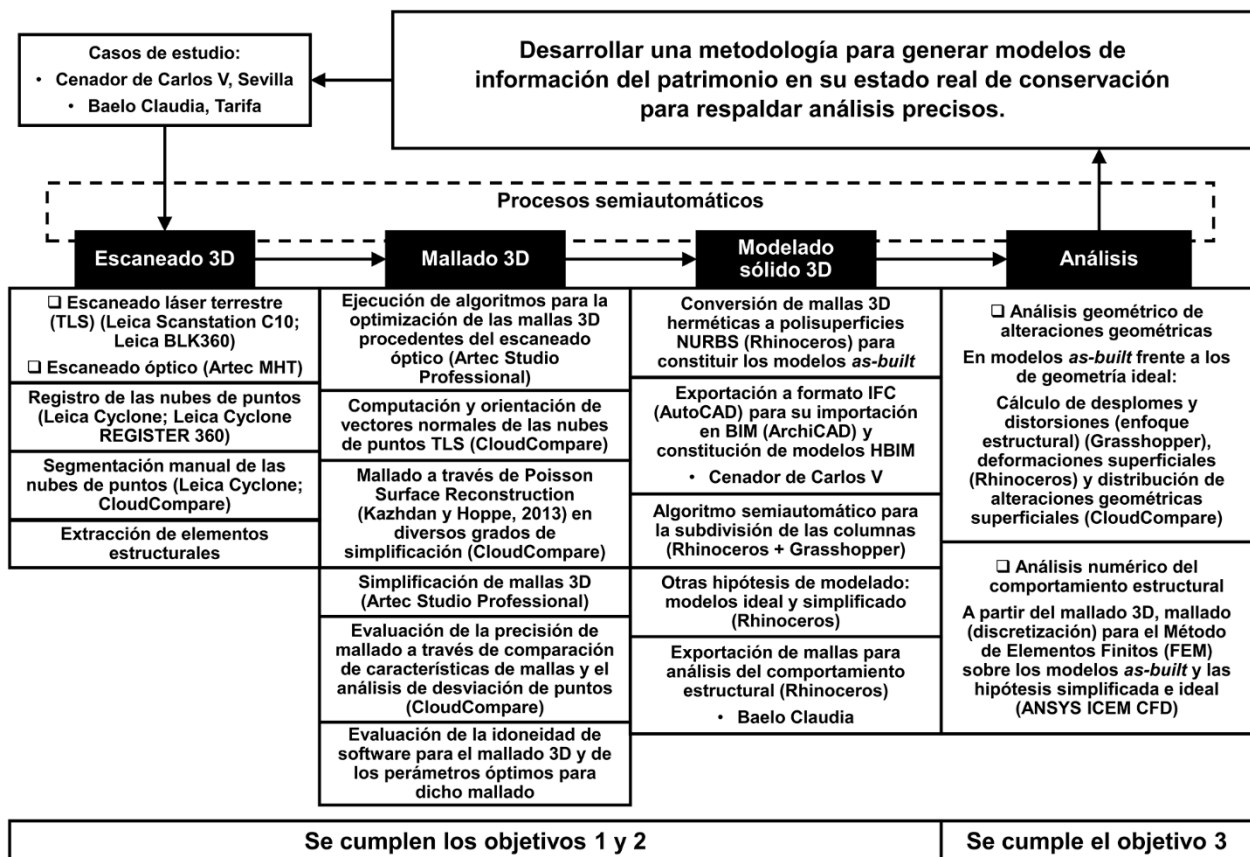


Figura 2. Flujo de trabajo general. Fuente: propia.

De este modo, se sintetizan las técnicas y *software* empleados e integrados en dichos procesos semiautomáticos, con su parte fundamental en el procedimiento de tres pasos ‘nubes de puntos — mallado 3D — modelado sólido 3D’, con vistas a poner de manifiesto la utilidad de los modelos precisos *as-built* en el análisis del patrimonio arquitectónico, arqueológico, y cultural para su conservación.

La presente sección *Metodología de la investigación* se compone de las subsecciones que se recogen a continuación, que a su vez abarcan las etapas fundamentales de la tesis doctoral: escaneado 3D, mallado 3D, modelado sólido 3D y análisis de los modelos del patrimonio.



#### 4.2.1. Adquisición de datos geométricos

El objetivo de crear modelos que reflejen el estado de conservación actual del patrimonio (modelos *as-built*) requiere de la captura precisa de la geometría que los define. Para este fin, en la tesis doctoral se contempla el uso de TLS, pues se trata de una técnica ampliamente utilizada en investigaciones y restauraciones en patrimonio. Bakker *et al.* (2009) profundizan en los fundamentos de esta tecnología, si bien resulta conveniente introducirla en estas líneas, a fin de facilitar la comprensión.

Los escáneres de tiempo de vuelo (*time of flight*), como los empleados en esta tesis doctoral para la captura de la geometría, se basan en el tiempo que tarda la luz láser en ser emitida por el equipo, reflejada en el objeto a escanear y recogida en el sensor, estableciendo así la distancia al objeto. A diferencia de una estación total de topografía, un escáner láser es capaz de capturar hasta del orden de millones de puntos por segundo, hasta 120 metros de distancia (esto puede aumentar dependiendo del modelo de escáner). Estos puntos, sean en un único *estacionamiento* (posicionamiento del equipo) o en varios, quedan registrados en un conjunto de puntos (coordenadas en el espacio), lo cual recibe el nombre de *nube de puntos*.

En cada caso de estudio se describen los equipos y procesos seguidos para capturar su geometría.

#### 4.2.2. Mallado tridimensional, validación y tratamiento de mallas

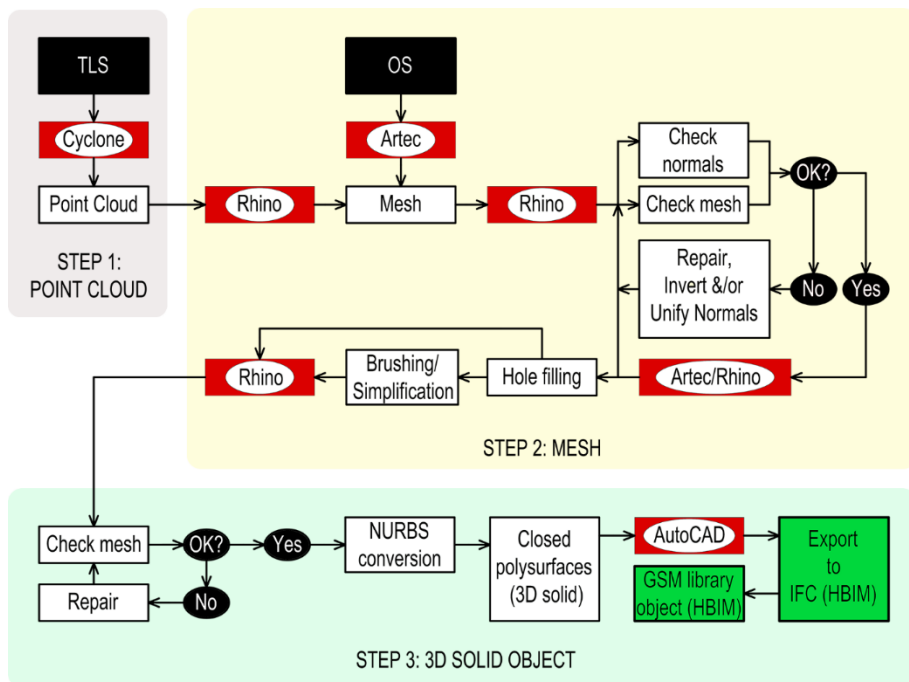
La obtención de modelos *as-built* de los casos de estudio a partir de datos TLS precisa de objetos tridimensionales dotados de superficie, dado que las nubes de puntos únicamente representan lo que se podrían considerar volúmenes aparentes. La creación de caras o polígonos que conecten los puntos o vértices que conforman las nubes constituye la base del mallado tridimensional ideal. Se introduce aquí el término ideal pues, a efectos prácticos, los distintos algoritmos que se analizan en esta sección tratan de ajustar la geometría de las mallas 3D a los vértices de las nubes de puntos mediante diversos grados de suavizado y simplificación para así respetar lo más posible la fisonomía de los activos patrimoniales.

##### *Validación del proceso de mallado*

Con anterioridad al proceso de reconstitución digital de los edificios o sitios históricos contemplados en esta tesis, es preciso validar los métodos de mallado empleados en cada caso. Para ello, se analizan y comparan distintos programas y algoritmos, pues ofrecen distintas precisiones en las mallas 3D resultantes.

##### *Mallado 3D y tratamiento de mallas*

Una vez se ha capturado la geometría de los activos patrimoniales y validado el proceso de mallado, se completa el segundo paso del procedimiento semiautomático 'nube de puntos — malla — objeto sólido 3D' propuesto en esta tesis doctoral. La Figura 3 ilustra el proceso completo.



**Figura 3.** Flujo de trabajo del proceso ‘nube de puntos — malla — objeto sólido 3D’. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

El *software* mencionado en la Figura 3 se corresponde con el empleado en Antón *et al.* (2018), pero esto no limita la utilización de otras aplicaciones o algoritmos para el mallado, tratamiento de mallas o cualquier otro proceso del procedimiento semiautomático propuesto. Esto puede observarse en Antón *et al.* (2019).

En este procedimiento semiautomático, la primera etapa comprende el escaneado 3D del patrimonio mediante TLS y el posterior procesado de las nubes de puntos resultantes. En esta tesis, se emplea el *software* nativo de los escáneres —Leica Cyclone (Leica Geosystems, 2016a) y Leica Cyclone REGISTER 360 (Leica Geosystems, 2018b)—, así como CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2016a), para alinear y optimizar las nubes de puntos que representan los activos en cuestión.

El mallado y el tratamiento de las mallas constituyen la segunda etapa. El proceso de mallado consiste en generar polígonos con ajuste a las nubes de puntos para así generar objetos 3D (mallas) que definen la superficie de los activos patrimoniales. Asimismo, se hace indispensable tratar estas mallas a fin de optimizarlas. En esta tesis, este tratamiento implica comprobar la orientación de las caras (polígonos, triángulos; comprobación de los vectores normales a las mismas), duplicidad de caras o vértices, bordes desnudos, rellenado de huecos, simplificación y cepillado en caso de ser necesario, entre otros. Respecto al suavizado de las mallas para eliminar imperfecciones, con herramientas como el citado cepillado, otros algoritmos como el remallado o la homogeneización de la densidad de polígonos podrían ser usados, pero esto alteraría la geometría superficial global de las mallas, lo cual no resulta apropiado para el propósito de esta investigación, que es preservar la geometría de los activos patrimoniales para su reconstitución digital precisa. Por su parte, el escaneado óptico (OS) produce mallas directamente a través de Artec Studio 10 Professional (Artec 3D, 2015), pero para el mallado de las nubes de puntos TLS de los casos de estudio se contempla el uso de Mesh Flow (Mesh Reverse, 2016), un *plug-in* de Rhinoceros (Robert McNeel & Associates, 2014b) para el Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla y el algoritmo *Screened Poisson Surface Reconstruction* (Kazhdan & Hoppe, 2013) integrado en CloudCompare para las columnas de la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia en Tarifa.

La tercera etapa consiste en importar las mallas optimizadas y cerradas en Rhinoceros para su conversión a polisuperficies cerradas (objetos NURBS). Estas polisuperficies constituyen los objetos sólidos a

ensamblar en modelos de información HBIM para completar la reconstitución digital de los casos de estudio. Si bien AutoCAD (Autodesk, 2014) permite la conversión de estos sólidos en formato IFC de intercambio para plataformas BIM, estas últimas también han experimentado una evolución en cuanto a la compatibilidad con diversos formatos digitales, por lo que también es posible la reconstitución de los casos de estudio directamente a partir de Rhinoceros.

Finalmente, cabe señalar que este procedimiento para lograr modelos HBIM precisos comprende tanto tareas manuales como procesos automáticos. Por un lado, las tareas manuales son la segmentación de la nube de puntos, el cepillado (en caso de ser necesario) para eliminar desperfectos en las mallas 3D, la conversión de archivos, la implementación en BIM a través del formato IFC y la alineación y orientación de sólidos procedentes de las mallas OS. Por otro lado, los procesos automáticos incluyen la captura de datos OS, el mallado, la subsanación de huecos en las mallas, la reparación e inversión/unificación de los vectores normales, la simplificación (en caso de ser necesaria) y la conversión a objetos NURBS, que se explicará posteriormente en los casos de estudio.

#### **4.2.3. Reconstitución digital: modelado sólido 3D**

La tercera etapa del procedimiento semiautomático (Figura 3) para la generación de los modelos *as-built*, (véase Antón *et al.* (2018)), conlleva la conversión de las mallas 3D a objetos sólidos para la constitución de los modelos HBIM. Esta reconstitución digital es desarrollada posteriormente para cada caso de estudio, pues precisan de distintos procesos derivados de dicho procedimiento semiautomático. En síntesis, la conversión de las mallas herméticas optimizadas a polisuperficies cerradas en Rhinoceros mediante objetos NURBS produce los sólidos a ensamblar para llevar a cabo la reconstitución digital del edificio o sitio histórico. La creación del modelo HBIM en plataformas BIM es posible a través de la importación directa a partir de formatos compatibles de aplicaciones de modelado 3D o a través del formato IFC de intercambio. Asimismo, distintos enfoques de modelado son llevados a cabo para posteriores análisis sobre los modelos virtuales del patrimonio —modelos *as-built* o representativo del estado de conservación actual, modelo simplificado siguiendo métodos tradicionales de medición y modelo ideal—.

#### **4.2.4. Análisis geométrico**

Esta subsección está destinada a cumplir el tercer objetivo de esta tesis doctoral sobre testar y validar la metodología propuesta por medio del análisis de las alteraciones geométricas de los casos de estudio en distintos enfoques de modelado en función de dichas alteraciones geométricas. Como consecuencia, se evalúa el estado de conservación de los activos patrimoniales en cuestión, determinando así las zonas que presenten patologías de carácter estructural y superficial.

#### **4.2.5. Modelado y análisis numérico estructural**

También centrada en el tercer objetivo de esta tesis, la finalidad de la presente subsección es determinar el comportamiento estructural de uno de los casos de estudio, la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia (Antón *et al.*, 2019). El propósito es validar la metodología propuesta, concretamente considerando la columna más desfavorable previamente determinada a través del análisis geométrico anterior. Para ello, se centra tanto en la precisión como en la idoneidad del modelo geométrico, realizando así análisis estáticos y modales en los modelos 3D —*as-built*, simplificado e ideal— por medio de FEM.

Las mallas numéricas (mallas FEM) se generan con el *software* ANSYS-ICEM v.14 (ANSYS Inc., 2018), y el *software* de elementos finitos ANSYS (ANSYS Inc., 1998) se utiliza para construir los modelos numéricos y analizar el comportamiento estructural.

Estos análisis numéricos son pasos previos y cruciales para controlar la respuesta estructural. Permiten:

- Comprender el comportamiento estructural general;
- Detectar debilidades estructurales;
- Obtener las principales propiedades dinámicas;
- Determinar el nivel de precisión de los diferentes modelos geométricos

## 5. Desarrollo experimental

Dar respuesta a las preguntas de investigación para cumplir los objetivos de esta tesis doctoral pasa por desarrollar su metodología experimentalmente a través de casos de estudio que constituyan un manifiesto ejemplo de la aplicabilidad de la tesis en el patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural para contribuir a su conservación. Las características de ambos casos de estudio permiten desarrollar los objetivos planteados, dadas sus patologías de carácter estructural. De esta forma, la reconstitución digital en modelos de información HBIM y los análisis geométrico y numérico de comportamiento estructural precisan de edificios o estructuras acorde a dicha finalidad, como son el Cenador de Carlos V en el Real Alcázar de Sevilla y la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia en Bolonia, Tarifa. Los casos de estudio que a continuación se describen son de utilidad para ajustar las estrategias y metodologías propuestas para el modelado o digitalización precisos de edificios o sitios históricos para su conservación.

### 5.1. El Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla

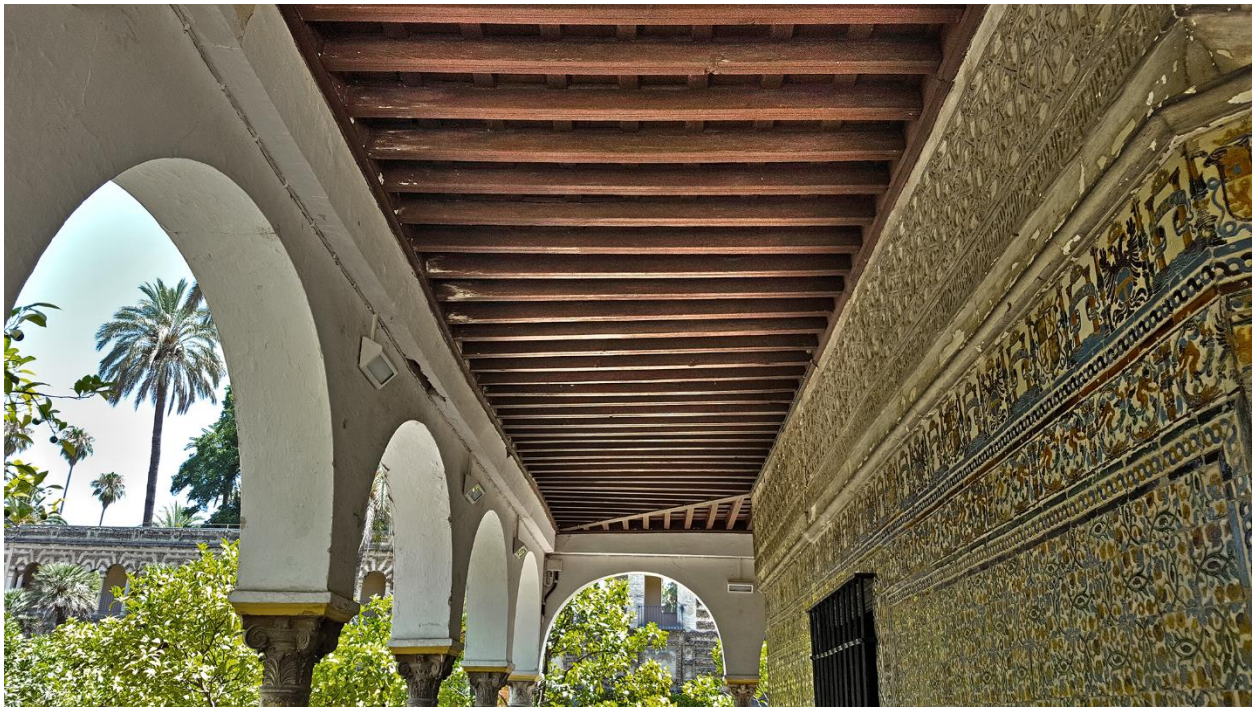
El Cenador de Carlos V, también denominado Cenador de la Alcoba, se encuentra en el Jardín de la Cruz del complejo monumental del Real Alcázar de Sevilla, incluido en 1987 en *World Heritage List* de UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1987) y declarado como Bien de Interés Cultural en 1931 (Gerencia de Urbanismo de Sevilla, 2012) debido a su gran valor patrimonial. Esta *Musalla* en forma de *qubba* (Robador, 2017), hoy conocida como Pabellón o Cenador de Carlos V, fue construida en el siglo XII, y transformada a mediados del siglo XVI (entre los años 1543 y 1546) siguiendo los diseños de Juan Hernández (Nieto *et al.*, 2016), con carácter renacentista e influencia mudéjar (Figura 4). De planta cuadrada y cubiertas a cuatro aguas en dos niveles, el edificio contiene capiteles corintios labrados por canteros italianos (Nieto-Julián *et al.*, 2019) en las 20 columnas de mármol que sustentan los arcos de medio punto que a su vez delimitan las cuatro galerías exteriores, y aplacados de yeso en la parte superior del paramento exterior de los muros alicatados que conforman el núcleo del edificio, con una bóveda semiesférica en su parte superior.



**Figura 4.** Cenador de Carlos V en contexto. Fuente: propia.

El estudio del Cenador de Carlos V resulta de interés para el modelado de información HBIM *as-built*, dadas sus características y sencillez estructural, su riqueza arquitectónica y las patologías que presenta.

Debido al transcurso del tiempo y la escasez de mantenimiento, el edificio presenta patologías en su estructura, pavimento y alicatados (Antón *et al.*, 2018). Se aprecian: desplomes en las columnas; daños en la viga de la galería norte, lo que provoca un desplazamiento de los pares de la cubierta del primer nivel, además de éstos encontrarse deteriorados en extremo norte (ver Figura 5); abombamientos en los alicatados, especialmente en la fachada sur junto a la puerta; y roturas en algunos capiteles.



**Figura 5.** Patologías en viga y pares de la galería norte. Fuente: propia.

Una vez presentado el caso de estudio del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla, es preciso profundizar en las tecnologías, métodos y procesos contemplados en la sección 4.2 *Metodología de la investigación* para dicho caso de estudio.

### 5.1.1. Adquisición de datos geométricos

Según Hichri *et al.*, (2013b), un modelo *as-built* se logra mediante tres procesos fundamentales: adquisición de datos, segmentación y modelado 3D.

Para esta sección, los datos geométricos se adquirieron utilizando dos técnicas diferentes de escaneo 3D: escaneo láser terrestre (TLS) y escaneo óptico (OS) —OS produce directamente *mallas trianguladas*—. Los equipos utilizados para este fin fueron un escáner láser 3D Leica ScanStation C10 (Leica Geosystems, 2016b) y un escáner óptico 3D Artec MHT (Artec 3D, 2010), respectivamente. La resolución del escáner TLS se configuró para alcanzar 5 mm (distancia de punto a punto próximo) a 10 metros, mientras que el dispositivo OS logra 1 mm. Se utilizó TLS para generar el modelo global del edificio histórico, que contiene aquellos elementos cuya geometría (especialmente alteraciones geométricas) se puede capturar con una resolución más baja sin alterar significativamente la precisión de los volúmenes; por ejemplo, paramentos, arcos o ejes de columnas. Por el contrario, en el caso de elementos constructivos con gran número de detalles, como son los capiteles de las columnas o los cuarterones de puertas y ventanas (Nieto Julián *et al.*, 2013), el registro de su geometría se llevó a cabo utilizando OS. Esta última técnica también puede ser de utilidad para escanear aquellos elementos que muestran características o defectos que deben registrarse debido a su impacto en el modelo en términos de visualización, clasificación u otros usos (Chaza Chimeno *et al.*, 2018). Merece la pena mencionar que el uso de OS se limita a escanear elementos constructivos detallados y específicos, ya que la alta resolución de estos modelos (mallas) hace que el tamaño del archivo aumente. Es por ello que las citadas limitaciones en *hardware* y *software* imposibilitan el uso de OS para modelar el edificio completo.

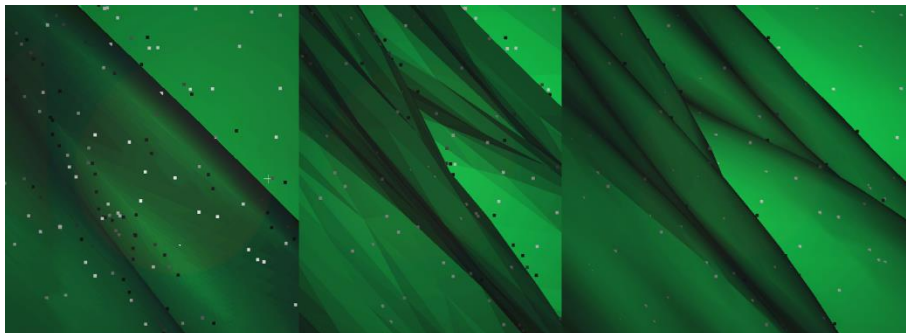
Para obtener datos fiables de las nubes de puntos de los edificios y sus elementos, la captura debe garantizar ciertas características en los datos 3D. Los volúmenes deben estar correctamente definidos, por lo que debe realizarse una exploración completa alrededor de los elementos a escanear. En el caso de llevar a cabo un escaneado incompleto de un elemento del edificio, como puede ser únicamente capturar determinadas caras, esto resultará en un número insuficiente de superficies para crear un volumen cerrado. Además, la nube de puntos debe ser lo suficientemente densa para producir una malla precisa, considerando una malla precisa como una malla triangulada que se ajusta a la nube de puntos de la que obtiene su geometría después de un proceso de mallado.

Según Tang *et al.* (2010), la nube de puntos TLS debe alinearse en un sistema de coordenadas común; esto se conoce como proceso de *registro*. En el trabajo de campo, se ubicaron tres dianas para posteriormente referenciar los distintos estacionamientos del escáner mediante el *software* Leica Cyclone 9.1 (Leica Geosystems, 2016a), que también detecta áreas coincidentes y crea restricciones de nube a nube automáticamente para mejorar el registro. Con respecto a otros componentes estructurales detallados escaneados por medio de OS, como los capiteles de las columnas, cabe realizar un proceso de alineación de las mallas con respecto al sistema de coordenadas TLS. Este registro de mallas OS se puede ejecutar después de que los elementos procedentes de la nube de puntos TLS también se hayan mallado, a fin de facilitar la identificación de puntos de control y los bordes de dichos elementos —una superficie tridimensional, opaca, conlleva mayor visibilidad que un conjunto de puntos con espacio entre ellos—.

El mallado tridimensional de las nubes de puntos TLS requiere previamente importar la nube de puntos global registrada en Leica Cyclone para posteriormente, basándose en el conocimiento heurístico del investigador o usuario, realizar la *segmentación* (Vosselman *et al.*, 2004) de la nube de puntos con vistas a extraer los diversos sectores y elementos que se desea estudiar.

### 5.1.2. Validación del proceso de mallado

Una vez que las nubes de puntos se han segmentado, deben convertirse en mallas trianguladas para producir los modelos 3D que posibiliten la reconstitución digital de los activos patrimoniales. Para este proceso de mallado 3D, se han testado diferentes aplicaciones para comparar su funcionalidad e idoneidad para convertir los datos TLS a mallas 3D. El objetivo es evaluar cualitativa y cuantitativamente el ajuste de las mallas 3D con respecto a las nubes de puntos resultado del levantamiento gráfico, como se muestra en la Figura 6 como ejemplo.



**Figura 6.** Grados de ajuste malla—nube de puntos en función del valor *Octree Depth*. Fuente: propia.



Esta evaluación consiste en el estudio estadístico de la dispersión de puntos entre mallas producidas por *software* distinto y la cuantificación de las características físicas de dichas mallas, lo cual supone estudiar el número de vértices y caras, así como la superficie promedio de estas últimas. Los algoritmos y aplicaciones que produzcan mallas más semejantes a los datos de referencia (las nubes de puntos), se consideran válidos para generar las mallas que den lugar a la mencionada reconstitución digital de los activos.

### 5.1.3. Mallado 3D y tratamiento de mallas

El segundo paso del procedimiento descrito en 4.2.2. *Mallado tridimensional, validación y tratamiento de mallas* (Figura 3) consiste en importar las nubes de puntos TLS segmentadas en el *software* Rhinoceros V5 (Robert McNeel & Associates, 2014b) (referido como 'Rhino' en la Figura 3), para que el proceso de mallado se pueda realizar utilizando el *plug-in* Mesh Flow (Mesh Reverse, 2016) en el caso del Cenador de Carlos V. Con respecto a las mallas OS de los capiteles de columna, los datos de nubes de puntos se combinan automáticamente en Artec Studio 10 Professional (Artec 3D, 2015) (referido como 'Artec' en la Figura 3), que es el *software* nativo del escáner óptico empleado; el primer paso de subdivisión de la nube de puntos (segmentación) se omite en este caso. Posteriormente, resulta interesante utilizar la herramienta "Reparar" en Artec Studio o el comando "Verificar" en Rhinoceros en algunas etapas de este procedimiento, especialmente cuando las mallas se importan a un *software* diferente, ya que se debería verificar que las mallas muestren una geometría válida. Las caras duplicadas, los bordes de cara desnudos o no conectados y las normales incoherentes son ejemplos de errores en las mallas. Los vectores normales de los triángulos deben estar orientados hacia afuera, tal como se describió con anterioridad; de lo contrario, la superficie del objeto no es coherente. Para este fin, estas normales se deben unificar (Robert McNeel & Associates, 2015), lo que puede realizarse ejecutando el comando `_UnifyMeshNormals`, invirtiendo así los vectores que apuntan hacia el interior del volumen del objeto. Asimismo, se deben rellenar los posibles huecos en la superficie de las mallas para que éstas puedan ser estancas y así definan volúmenes cerrados. Esto se puede llevar a cabo directamente en Rhinoceros o utilizando Artec Studio, que además muestra una interfaz intuitiva y herramientas para tratar la malla, como por ejemplo 'borrador', 'cepillo suave' y el pincel o brocha de eliminación de desperfectos superficiales para eliminar o reducir triángulos fuera de contexto. El cepillado manual de imperfecciones visibles permite reducir geometrías como los puentes que conectan superficies opuestas o formas afiladas, posiblemente causadas por una densidad heterogénea de puntos en la nube antes del mallado. Cuando se manejan archivos de gran tamaño, la simplificación de las mallas es otra opción a considerar, al igual que en el segundo caso de estudio de las columnas de la Basílica. El nivel de simplificación debe ser de acuerdo con los detalles (geometría) y las dimensiones de los objetos, en la medida en que se debe garantizar una geometría reconocible en la malla simplificada resultante (análisis cualitativo), como tampoco debe perderse geometría en exceso (análisis cuantitativo). De lo contrario, los modelos no serían representativos de los elementos constructivos y edificios y sitios históricos estudiados.

### 5.1.4. Reconstitución digital: modelado sólido 3D

Para garantizar la correcta orientación de todos los elementos del edificio, una vez segmentada y mallada la nube de puntos, se deben capturar referencias posicionales. Se tomaron cuatro puntos de control para la identificación en los bordes y vértices de cada uno de los arcos en las mallas originales (OS), con apoyo de fotografías durante el levantamiento gráfico. La orientación de los elementos con respecto al eje Z se basó en estas referencias o puntos de control. Por su parte, la alineación horizontal de los capiteles se llevó a cabo considerando su plano XY en la base superior de los capiteles al nivel de la línea de imposta

de los arcos. La obtención de un sistema de coordenadas único garantiza que la localización de los elementos estructurales en el edificio se mantiene para el posterior ensamblaje en el modelo HBIM.

La citada tercera etapa del procedimiento semiautomático comienza con la conversión de las mallas cerradas de los elementos en polisuperficies cerradas NURBS (*Non Uniform Rational Basis-Splines*), que constituyen los objetos sólidos 3D de los elementos escaneados. Esto se lleva a cabo para los datos TLS y OS, ejecutando el comando `_MeshToNURB` en Rhinoceros. Aunque este método de modelado cumple con los objetivos de la presente investigación, existen otras opciones para obtener objetos 3D sólidos a partir de las mallas 3D, incluyendo: 1) importar polisuperficies NURBS individuales en AutoCAD Architecture 2015 (Autodesk, 2014) y ejecutar el comando `_SURFSCULPT`, que recorta y combina un conjunto de superficies o mallas que encierran un volumen para crear un sólido 3D; 2) importar una malla cerrada en AutoCAD, convertirla en un 'elemento de masa' y, posteriormente, en un objeto sólido 3D.

Estas polisuperficies NURBS difieren de las creadas por Murphy *et al.* (2013), quienes construyeron perfiles 2D a partir de partes de elementos utilizando operaciones booleanas y posterior repetición para conformar los elementos; o los objetos NURBS generados por Oreni *et al.* (2014), superficies que surgen de la deformación espacial de una cuadrícula de superficies cuadradas (superficies de parche) en las que las posiciones de los puntos de control determinan la deformación. De nuevo, las superficies NURBS han sido utilizadas por Barazzetti *et al.* (2015) y Fregonese *et al.* (2017) para la creación de elementos. Especialmente en las bóvedas, extrajeron distintas secciones de sus nubes de puntos por interpolación para obtener los modelos 3D. Aunque todos estos métodos se aproximan a la forma de los complejos elementos, estos métodos no representan las geometrías *as-built* que defiende esta tesis doctoral. Además, los modelos 3D sólidos obtenidos en la presente investigación se difieren de los anteriores porque no se modelan matemáticamente sobre la base de superficies cuadráticas como paraboloides o cilindros, sino que provienen directamente de mallas cerradas de las nubes de puntos TLS segmentadas y malladas, utilizando NURBS como método de obtención de polisuperficies cerradas (sólidos).

Para verificar los resultados del modelado sólido, se pueden realizar operaciones booleanas (unión, diferencia e intersección) entre estos objetos sólidos 3D y entidades 3D primitivas, como cubos o cilindros. Cuando los segundos restan determinado volumen de los primeros, el resultado también debe ser sólido en lugar de hueco, lo cual ocurre en el caso de mallas cerradas. Además, estas operaciones pueden ser aplicables para combinar objetos sólidos con el fin de crear el elemento constructivo deseado.

Consecutivamente, los objetos sólidos 3D (polisuperficies cerradas, NURBS) se pueden importar en plataformas BIM a fin de constituir modelos HBIM. En esta tesis, esto se lleva a cabo pieza a pieza, de acuerdo con la lógica constructiva Oreni *et al.* (2014), reconstruyendo la disposición original de los elementos constructivos del edificio. La importación se resuelve considerando el formato de archivo de especificación abierta IFC (buildingSMART International, 2017; International Organization for Standardization (ISO), 2013), debido a su compatibilidad nativa con el *software* BIM, aunque también se puede realizar a través del formato propio de Rhinoceros en las últimas versiones de ArchiCAD (Graphisoft, 2016), que es la plataforma BIM empleada en esta investigación. De esta manera, por ejemplo, los objetos sólidos 3D de los capiteles de columnas se pueden convertir en objetos paramétricos GSM a través del lenguaje de programación GDL, como llevaron a cabo Dore y Murphy (2013) usando ArchiCAD. Propiedades posicionales, físicas y estructurales son algunos de los parámetros que se pueden establecer para estos objetos. Del mismo modo, la visualización se puede personalizar de acuerdo con las necesidades de la investigación o del proyecto.

### 5.1.5. Análisis geométrico

Gracias a la generación de modelos *as-built*, es posible realizar el análisis de las alteraciones geométricas del Cenador de Carlos V, que aquí se realiza de la desviación de puntos del modelo realista con respecto al modelo ideal. Este análisis es de utilidad para cuantificar la distribución de los puntos que definen las alteraciones superficiales que presenta el modelo *as-built*.

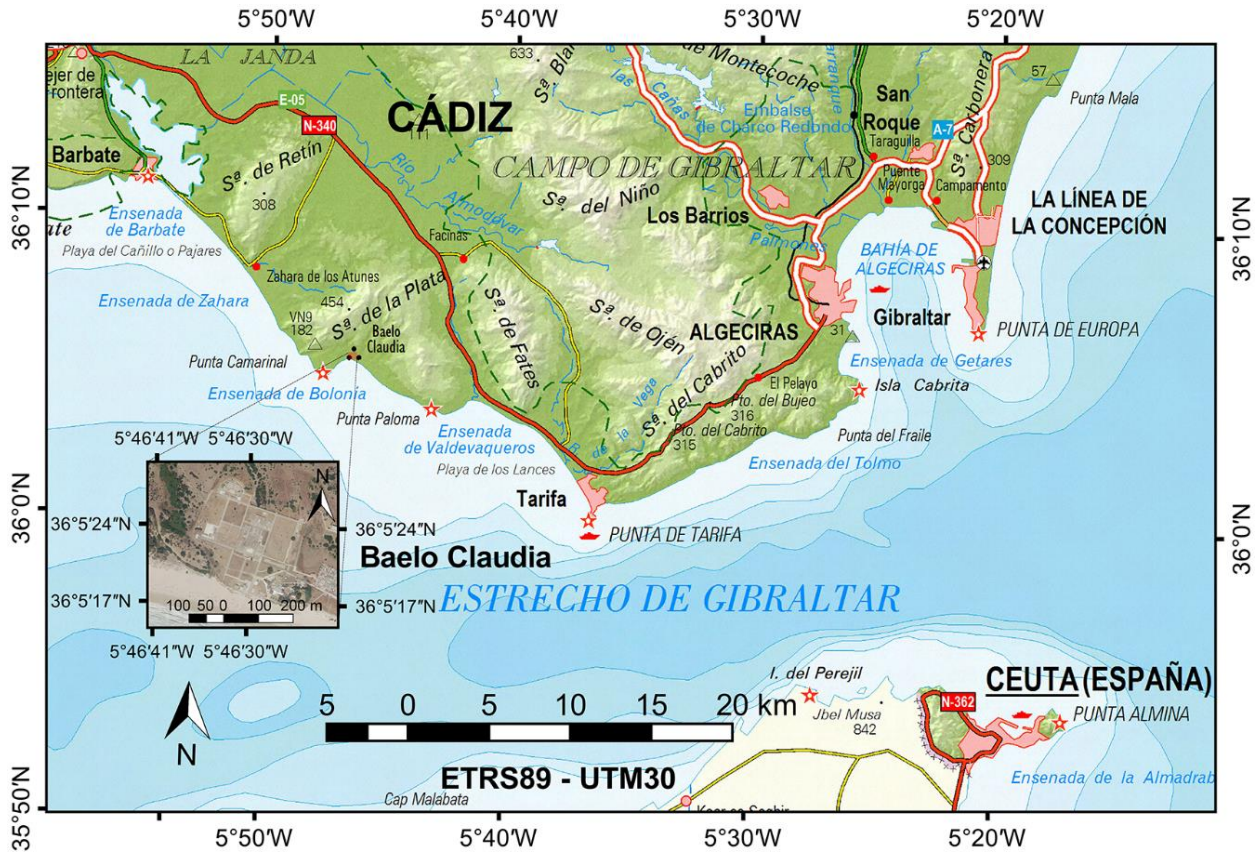
Como se ha descrito en este caso de estudio, el Cenador presenta patologías estructurales importantes en su fachada sur. Es por ello que la investigación realizada por Nieto-Julián, Antón y Moyano (2019) lleva a cabo la comparativa entre los modelos HBIM *as-built* y HBIM ideal en dicha localización.

A fin de cuantificar la desviación entre la geometría ideal y la real, cabe analizar la dispersión de los puntos pertenecientes a la malla y llevar a cabo su comparación con el muro vertical sin deformaciones. Para ello, se ha decidido emplear CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2016a). En este sentido, gracias a la exportación desde la plataforma BIM ArchiCAD a Rhinoceros en su formato específico 3DM, se ha producido una nube de puntos para los elementos ideales. En este caso, con vistas a que la comparativa entre la nube de puntos y la malla deformada sea coherente, se ha decidido usar las coordenadas —consideradas XY— de los puntos de la malla simplificada en el plano vertical del paramento ideal. Es decir, si se mantienen dichas coordenadas en el plano vertical, la deformación de la malla con respecto a la nube de puntos ideal, se dará únicamente en la coordenada Z (véase Figura 38). Por tanto, es preciso proyectar los puntos de la malla en los paramentos exteriores de los muros del modelo BIM teórico, por lo que se ha empleado el comando `_ProjectToCPlane` de Rhinoceros para aplanar los objetos seleccionados en los planos de construcción —planos CY— definidos previamente en dichos paramentos.

Una vez se ha obtenido la nueva nube de puntos ideal con las coordenadas planas de la malla *as-built*, se puede proceder a la comparación a través de CloudCompare. Cabe decir que, a fin de evitar errores de alineación de las entidades 3D a comparar, se han mantenido sus coordenadas originales. Una vez importadas dichas entidades, se necesita computar los vectores normales de la nube de puntos ideal para poder calcular las distancias con respecto a la malla y así realizar el análisis de la distribución de las alteraciones geométricas en el muro sur del Cenador de Carlos V.

## 5.2. La Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia

El Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia (Antón *et al.*, 2019) se encuentra en la Ensenada de Bolonia en Tarifa, Cádiz, cerca del Estrecho de Gibraltar. La Figura 7 muestra la ubicación del sitio en el contexto geográfico de la región.



**Figura 7.** Localización del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Nacional (2019) (Antón *et al.*, 2019).

La evidencia arqueológica más antigua del asentamiento prerromano en Baelo data de mediados del siglo II a.C., con anterioridad a su consideración como municipio romano (Padilla, 2010), cuando fue nombrada "Claudia" en honor al emperador Claudio (Pineda & Iranzo, 2017). La actividad industrial en esta ciudad hispano-romana fue la producción de salazón de pescado, principalmente atún, *garum* y salsas mixtas que se han encontrado en las ánforas del período republicano romano (Bernal *et al.*, 2003a; Bernal *et al.*, 2003b; Bernal *et al.*, 2007). Este desarrollo económico disminuyó durante la segunda mitad del siglo II d.C., pero las actividades comerciales restauraron la importancia de la ciudad desde el siglo III al IV. Posteriormente, Baelo Claudia comenzó a decaer hasta que fue completamente abandonada en el siglo VII (Muñoz & Expósito, 2017).

Según Bernal y Expósito (2017), Baelo Claudia es un gran ejemplo de la implementación de los modelos urbanos romanos en el sur de Hispania, la Península Ibérica. La diversidad arqueológica y arquitectónica de Baelo Claudia es claramente perceptible, pues existen multitud de edificios e infraestructura romanos, tales como un teatro, palacio de justicia (basílica), templos religiosos, termas, *macellum* o mercado cubierto, fábrica, trazado viario, etc.

Baelo Claudia está ubicada en un área con un riesgo sísmico de bajo a moderado, pero que fue afectada por terremotos energéticos como los que tuvieron lugar en Lisboa (1755) y en el cabo San Vicente (1969) (Amaro-Mellado *et al.*, 2017; Amaro-Mellado *et al.*, 2018).

Fue declarado Monumento Nacional en 1925 y delimitado en 1991 (Dirección General de Bienes Culturales, Consejería de Cultura y Medio Ambiente, 1991), y fue instituido como Conjunto Arqueológico en el año 1989 por la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 1989).

Concretamente, esta tesis doctoral estudia la Basílica de Baelo Claudia, pues sus columnas presentan desplomes, distorsiones y deformaciones superficiales significativas. Es por ello que supone un caso de estudio propicio para los análisis geométrico y numérico estructural contemplados en Antón *et al.* (2019), dando así respuesta a los objetivos de esta tesis doctoral. La Figura 8 muestra la Basílica junto al *macellum*, la plaza sur y el *decumanus maximus* o vía principal de la ciudad, que la cruza de dirección sureste a suroeste (Fincker *et al.*, 2010). Se encuadra en el centro de Baelo Claudia, entre el cardo 3 y el cardo 4, que son los caminos que dan al noreste y son perpendiculares al decumano.



**Figura 8.** Basílica de Baelo Claudia en contexto. Fuente: propia.

La Basílica o palacio de justicia contiene actualmente 18 columnas —de las 20 que existían en su momento— que se erigen hasta un máximo de 5,5 metros de altura desde el nivel del terreno, formando una planta rectangular de aproximadamente 23,3 x 10 metros.

### 5.2.1. Adquisición de datos geométricos

Dadas las dimensiones y las características de la Basílica, se utilizó la técnica de TLS para capturar la geometría de las columnas Figura 9.



**Figura 9.** Escaneado 3D de la Basílica en el sitio arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

El dispositivo utilizado fue el escáner 3D BLK360 de Leica Geosystems (Leica Geosystems, 2018a), que cuenta con un alcance máximo de 120 m (60 m de radio), una tasa de medición de puntos de 360,000 puntos por segundo y una precisión de 4 mm a 10 m cuando se selecciona el perfil de configuración de resolución más alta. También se tomaron imágenes de alto rango dinámico (HDR) en el escaneado para mapear la nube de puntos y las posteriores mallas 3D de las columnas, aunque una combinación adicional de TLS con fotogrametría podría mejorar la digitalización del sitio en caso de que fuera necesario mapear texturas de mayor calidad (Lerma *et al.*, 2010).

No se utilizaron dianas en el escaneado 3D para los 19 estacionamientos, que se definieron estratégicamente para facilitar la alineación, dada la suficiente superposición entre esas posiciones; es decir, las mismas columnas fueron capturadas desde diferentes ángulos. Se estableció un itinerario lo más regular posible para minimizar tanto los errores como la posible disminución de la calidad de la nube de puntos (Soudarissanane *et al.*, 2008). Así, a fin de garantizar la captura completa de la geometría de las columnas, también se evitaron las sombras —zonas no leídas por el escáner— en la superficie lateral de aquéllas debido a la oclusión del rayo láser (Riquelme *et al.*, 2017). En el levantamiento gráfico, debido a problemas técnicos, no se pudieron tomar puntos de control GCP (*Ground Control Points*) mediante GNSS, por lo que el nivel sistema de coordenadas se niveló empleando tanto la Unidad de Medición Inercial (IMU) como el sensor de inclinación o nivelación integrado en el escáner láser BLK360 y la correspondencia automática de nube a nube de puntos. Las diferentes lecturas, procedentes de los estacionamientos, se importaron al *software* Leica Cyclone REGISTER 360 (Leica Geosystems, 2018b) en el ordenador portátil a través de la red Wi-Fi del escáner, de modo que la alineación en el mismo sistema de coordenadas se hiciera automáticamente (Sun & Zhang, 2019).

### 5.2.2. Validación del proceso de mallado

Una vez que las nubes de puntos de las columnas se han segmentado por separado, deben convertirse en mallas trianguladas para producir los modelos 3D para análisis posteriores. Es necesario distinguir entre estas mallas (esta tesis se refiere a ellas como mallas 3D) y las mallas FEM que se construirán para el análisis estructural. Para lograr la malla 3D, el *software* CloudCompare requiere el cálculo de los vectores normales (Girardeau-Montaut, 2016b) de las nubes de puntos. Si bien la mayoría de las nubes de puntos proporcionaron resultados adecuados en la orientación de las normales, la complejidad y el ruido de algunas de las nubes pudo haber causado una orientación incoherente en este proceso. Para producir mallas correctas que se ajusten a las nubes de puntos, las normales deben estar orientadas hacia afuera del volumen del objeto (Unity Technologies, 2016), evitando así la generación de normales invertidas (hacia adentro). Esto requirió la modificación de los parámetros del cálculo. Los ajustes óptimos se seleccionaron comprobando experimentalmente los resultados adecuados de la orientación de la nube de puntos. Se seleccionó el modo 'Plano', con la casilla de verificación 'Orientación' activada y 6 (puntos) vecinos para cada punto determinado.

Es en este punto donde tiene lugar el proceso de mallado 3D. El algoritmo *Screened Poisson Surface Reconstruction* diseñado por Kazhdan y Hoppe (2013), que se incluye en CloudCompare como *plug-in*, genera mallas herméticas (cerradas) a partir de nubes de puntos orientadas (nubes de puntos con vectores normales calculados). Si bien este algoritmo fue descartado para la reconstitución digital del Cenador de Carlos V por producir un exceso de volumen en aquellos elementos cuya nube de puntos no representaba un volumen cerrado, sí ha sido de aplicación en el mallado de las columnas de la Basílica de Baelo Claudia, pues la captura de su superficie lateral completa se pudo llevar a cabo en el escaneado 3D. Se escoge el algoritmo de Poisson en este caso frente a otros algoritmos de mallado como Marching Cubes (Lorensen & Cline, 1987), incluido en el *software* MeshLab (Cignoni *et al.*, 2008) como *plug-in*, ya que este último, centrado en una nube de puntos de muestra de una basa de columna, produjo una malla abierta y ruido excesivo para construir la superficie. Además, Marching Cubes necesitó un tiempo significativamente más elevado para producir la malla en comparación con Poisson (229 s contra 29 s para la calidad de malla considerada en esta investigación), lo que conlleva un mayor impacto en la reconstitución digital completa de la Basílica de Baelo Claudia. La generación de mallas cerradas es adecuada para el propósito de esta investigación, ya que la ausencia de huecos en las mismas permite la creación posterior de polisuperficies cerradas (sólidos 3D) para el modelado *as-built* de las columnas de la Basílica. En el *plug-in* de Poisson, se pueden seleccionar diferentes valores del parámetro *Octree Depth* (profundidad de la estructura de datos en árbol); estos valores conllevan diversos resultados de calidad de malla y número de triángulos (véase Figura 6). Por lo tanto, cabe evaluar estos aspectos cualitativa y cuantitativamente en esta investigación para validar el proceso óptimo de mallado 3D. Los valores elevados de *Octree Depth* generan mallas que se ajustan con mayor precisión a las nubes de puntos, pero esto puede producir un relieve excesivo cuando existe ruido en las nubes de puntos, lo que no representa la geometría real de las columnas.

Esto puede deberse a errores en el registro, donde dos o más escaneos se superponen con un ajuste insuficiente, o bien por el error del rayo láser, lo que produce superficies inexactas. Por el contrario, las mallas configuradas a valores más bajos de este parámetro se ajustan en menor medida a las nubes de puntos, lo que simplifica la discretización (triangulación) en exceso (la geometría presenta una geometría más suave). Sin embargo, aunque el objetivo de esta investigación es lograr la óptima precisión de la malla 3D, se considera cierto grado de simplificación para disminuir el número de caras (triángulos) con el fin de mejorar el tiempo de procesado y reducir los esfuerzos computacionales en las operaciones de modelado 3D posteriores. La simplificación de la malla consiste en reducir la cantidad de triángulos en ellas usando un *software* específico como Artec Studio 10 Professional (Artec 3D, 2015).

Con el fin de validar el proceso de mallado 3D y decidir el grado de suavizado o simplificación, en esta tesis se realiza una evaluación para las mallas de la columna C1 (véase la Figura 20 para identificar la columna), que fueron producidas empleando el algoritmo Poisson (Kazhdan & Hoppe, 2013) en CloudCompare. Para hacer esto, un análisis cuantitativo de la precisión de mallado compara primeramente las características principales de las mallas: (i) número de vértices (puntos de las nubes / mallas); (ii) número de caras (triángulos, polígonos); (iii) superficie (área) de las mallas; (iv) superficie media de sus triángulos; (v) volumen de las mallas; y (vi) desviación estándar. Para ello, CloudCompare requiere de dos nubes de puntos, o una nube de puntos y una malla, para computar las distancias (Girardeau-Montaut, 2015). En segundo lugar, se estudia la desviación entre las mallas o nubes correspondientes a los diferentes grados de simplificación. Como resultado, se pueden establecer los parámetros óptimos del proceso de mallado 3D. Los resultados de esta validación se recopilan y explican en la sección correspondiente en Resumen global de resultados.

### 5.2.3. Mallado 3D y tratamiento de mallas

A diferencia del caso del Cenador de Carlos V, el mallado 3D de las columnas de la Basílica de Baelo Claudia se ha efectuado usando el algoritmo Poisson en CloudCompare, como se ha descrito en el apartado anterior de validación del mallado, pero considerando los valores óptimos (véase subsección 6.2.2. *Basílica de Baelo Claudia*) para preservar lo más posible la geometría de referencia (nubes de puntos TLS).

Por su parte, la eliminación de polígonos es útil para suprimir aquellos sectores cuyas deformaciones no se analizarán, como el terreno restante que rodea las bases de la columna tras la segmentación manual de la nube de puntos global.

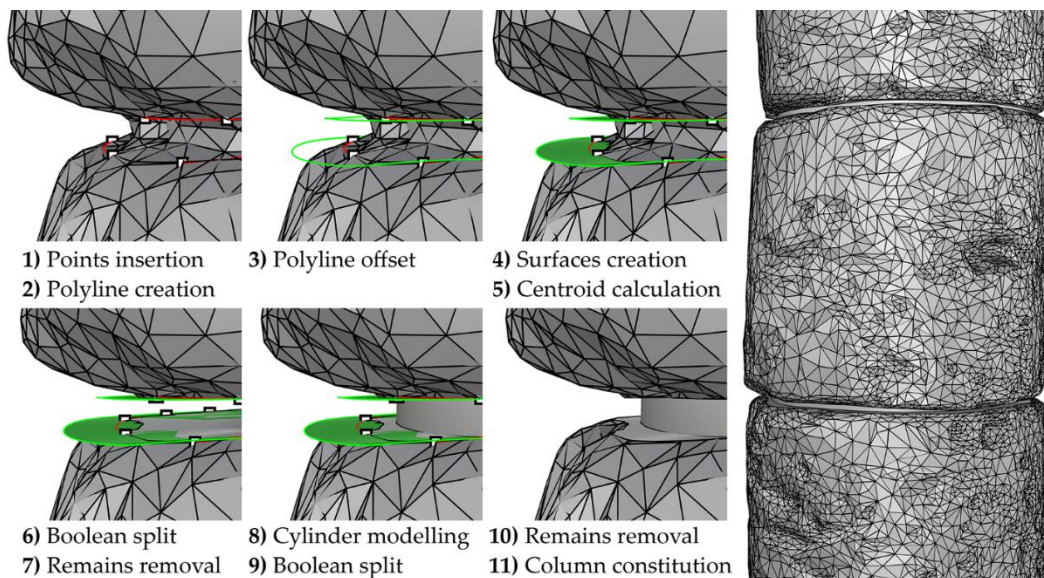
Finalmente, aunque es posible ejecutar el remallado de una malla 3D para producir una malla isotrópica —es decir, homogeneizar el tamaño y la distribución de los triángulos—, se descartó de esta investigación en favor de las mallas originales (simplificadas). El motivo es que el remallado requiere de un tiempo de procesado significativo, además de que conlleva que el número de triángulos aumente si se selecciona una resolución más detallada. Esto implica un mayor alisado (*smoothing*) en las mallas a pesar de dicho aumento, lo que a su vez supone cierta pérdida de relieve y, en consecuencia, de geometría para la posterior reconstitución digital *as-built* en HBIM.

### 5.2.4. Reconstitución digital: modelado sólido 3D

La reconstitución digital *as-built* de las columnas de la Basílica posibilita el análisis de su geometría y de su comportamiento estructural, lo que implica la necesidad de trabajar con sus tambores separados y las uniones que existen entre ellos. Tratar con modelos sólidos en lugar de mallas 3D facilita el uso de operaciones booleanas a fin de dividir la columna completa mallada en sus distintas partes. Para ello, primeramente se ejecutan dos procesos del procedimiento de modelado semiautomático según lo descrito por Antón *et al.* (2018) en el entorno de Rhinoceros V5 (Robert McNeel & Associates, 2014b): 1) comprobar la integridad de las mallas, aunque no debería haber ninguna inconsistencia pues esto ya se comprobó en Artec Studio cuando se produjeron las mallas óptimas; 2) convertir las mallas cerradas en polisuperficies cerradas (objetos sólidos).



En segundo lugar, se consideran procesos manuales y automáticos adicionales para dividir la columna sólida completa para los análisis precisos posteriores. La división de estas polisuperficies se realiza creando superficies ('parche') de corte desde puntos insertados en las bases superior e inferior de cada tambor cerca de las juntas de mortero entre ellos. En lo que respecta a las uniones entre tambores, la captura de su geometría no fue posible en el levantamiento 3D, ya que el nivel del escáner era más bajo que el de las juntas, que se encontraban ocultas entre los tambores, ocasionando sombras en la nube de puntos (Riquelme *et al.*, 2017). Por lo tanto, se decidió definir el volumen de las juntas considerando las superficies de corte modeladas previamente y un cilindro de nueva creación entre ellas. El centro de este cilindro se corresponde con el centroide calculado a partir de las superficies. Tras esto, a través de la operación de partición booleana, es necesario restar del cilindro el volumen que intersecta los tambores. La Figura 10 muestra el proceso para obtener tambores separados y juntas de modelo como se explica en este párrafo —las seis figuras en detalle muestran el mismo área en la cara norte de la tercera junta de mortero en la columna C1 (junta inferior en la imagen derecha de la Figura 10)—.



**Figura 10.** Procesos de separación de tambores y modelado de juntas en la columna C1. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Este proceso de división de tambores se puede semiautomatizar utilizando un simple *script* bajo el entorno Grasshopper (compilación 0.9.0076) (Robert McNeel & Associates, 2014a). Grasshopper, un lenguaje de programación visual para Rhinoceros V5, es un *plug-in* que permite crear algoritmos de forma intuitiva, basado en el entorno de trabajo de Rhinoceros para operar el modelo 3D en tiempo real. La siguiente secuencia de comandos (que se muestra como un diagrama en la Figura 11) se creó *ad hoc* para esta investigación para reproducir los procesos explicados anteriormente con vistas a dividir las columnas en partes (tambores).

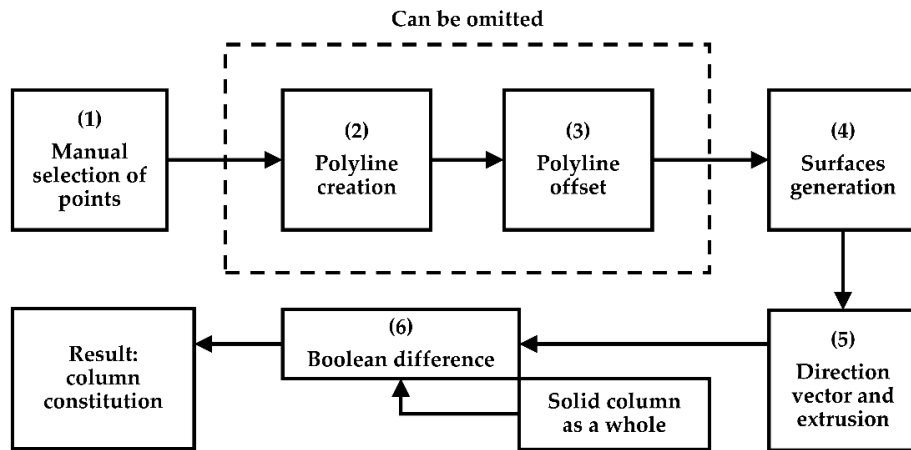


Figura 11. Procedimiento de partición de columnas. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

La Figura 12 muestra el *script* diseñado en Grasshopper.

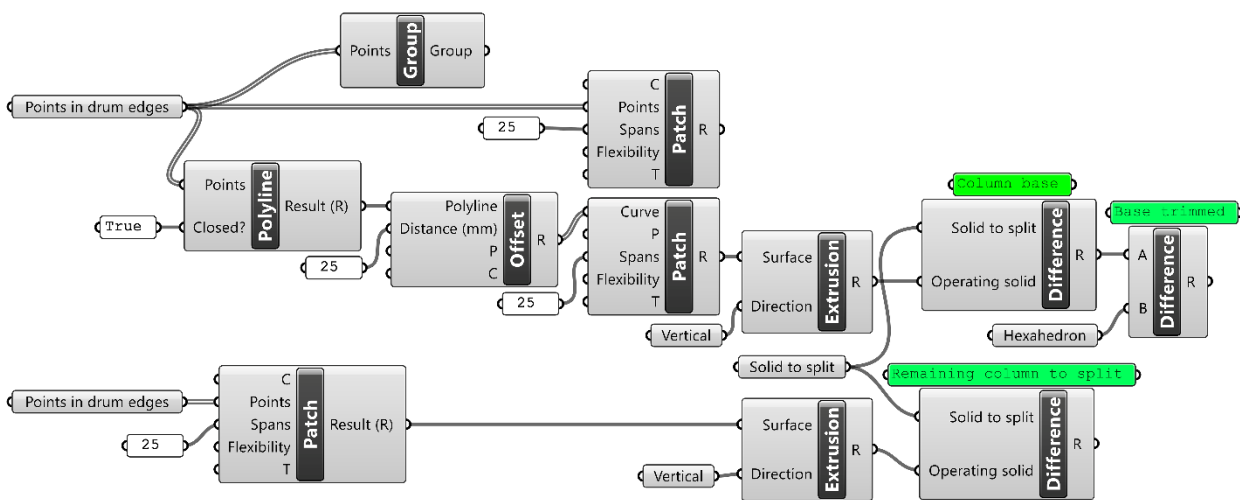


Figura 12. *Script* en Grasshopper para la partición de columnas. Fuente: propia.

El *script* realiza el siguiente algoritmo semiautomático: 1) selección de puntos insertados manualmente en los bordes de los tambores cerca de las juntas; 2) creación de polilínea a partir de dichos puntos; 3) equidistancia a la polilínea anterior; 4) generación de superficies en la base de los tambores; 5) extrusión de superficie a lo largo de una dirección dada; 6) diferencia booleana de toda la columna sólida con la extrusión como operador. Los pasos 2 y 3 se pueden omitir, ya que los puntos en 1 también pueden ser ‘parcheados’ directamente para producir superficies, sin necesidad de polilíneas. Para completar el proceso de división del resto de tambores, es necesario seleccionar el resto de los puntos en las bases de los tambores y repetir el algoritmo. La aplicación de este *script* a todas las columnas de la Basílica debería ahorrar un tiempo considerable en su reconstitución digital.

En esta investigación, se asume que el modelado de elementos menores, como las uniones entre tambores como entidades simplificadas, no debería conllevar un gran impacto en la simulación estructural, en comparación con la geometría real de las uniones entre tambores. También cabe destacar que el uso de operaciones booleanas produce superficies de contacto uniformes y precisas que conectan las distintas partes, lo cual resulta esencial para la evaluación del comportamiento estructural (Roca *et al.*, 2010).

Asimismo, se presentan métodos de modelado adicionales (simplificado e ideal) en Rhinoceros para lograr el objetivo de esta tesis doctoral en lo relativo a validar el sistema propuesto a través del uso de herramientas de simulación estructural en los distintos enfoques de modelado del patrimonio en función de sus alteraciones geométricas. Estos enfoques se materializan para la columna más desfavorable (C19) (véase Figura 20 para ubicar la columna). La indagación sobre cuál es la columna que presenta mayores desplomes y distorsiones se basa en los métodos descritos en la siguiente sección de Análisis geométrico. Los resultados completos se recogen en el *Anexo II* en la Tabla A1: Desplazamientos y distorsiones en columnas. Antes de emprender los procesos de modelado, es necesario calcular los centroides de las bases de cada tambor del modelo *as-built* para garantizar que la posición de dichos tambores y sus uniones se mantienen en los modelos simplificado e ideal. Para ello, las bases (superficies) de los tambores deben ser extraídas de los mismos.

Por un lado, se describe el *enfoque simplificado*. Este método de modelado, desarrollado en Rhinoceros, considera horizontales las juntas de mortero entre tambores y los desplazamientos del tambor con respecto al eje vertical de la columna, como modelando siguiendo métodos de medición tradicionales:

1. Generar 3 secciones horizontales del tambor: una en el centro de su altura para extraer su diámetro general; dos para sus bases inferior y superior, respectivamente, para representar la reducción de diámetro y producir juntas horizontales.
2. Insertar múltiples puntos en las curvas (dividir las curvas).
3. Trazar automáticamente una circunferencia con ajuste a esos puntos.
4. Clonar la sección central (circunferencia) donde el diámetro cambia con respecto al diámetro general del tambor, de modo que el tambor pueda modelarse como siguiendo mediciones tradicionales.
5. Hacer coincidir la dirección de todas las circunferencias para establecer un conjunto coherente de curvas.
6. Crear una transición de ajuste abierta con orientación de punto de costura automática, secciones rectas y 10 puntos de control, seleccionando las circunferencias en la parte superior, inferior y las dos curvas donde varía el diámetro (4 circunferencias en total).
7. Cerrar la transición cubriendo los huecos de la parte inferior y la parte superior de los tambores con superficies planas a fin de obtener polisuperficies cerradas (objetos sólidos).
8. Crear cilindros en las juntas según el método estándar de modelado de juntas presentado anteriormente, tomando los centroides de las bases como centros de los cilindros, de manera que la altura de estos cilindros exceda el espacio en la junta. Realizar diferencias booleanas para eliminar el volumen que se encuentra más allá de las bases e interseca con los tambores.
9. Seccionar el capitel de la columna original (*as-built*) para extraer las dimensiones promedio de la parte superior (rectángulo), la parte media y la parte inferior (circunferencias), y modelar usando geometrías primitivas en función de dichas dimensiones y formas. Realizar diferencia booleana para eliminar del modelo la parte del volumen perdido en el capitel *as-built*.

Por otro lado, se explica el *enfoque ideal* sin desplazamientos, distorsiones ni alteraciones geométricas superficiales:

1. Crear 3 secciones horizontales equidistantes entre sí que dividan la altura del tambor en 4 partes.
2. Generar la sección promedio / característica (curva) a partir de las tres curvas anteriores dos a dos, haciéndolas coincidir las originales.
3. Insertar múltiples puntos en la curva (dividir la curva).
4. Trazar automáticamente una circunferencia con ajuste a esos puntos.
5. Crear una superficie plana a partir de esa circunferencia.
6. Extruir dicha superficie hacia los centroides de las bases para obtener la altura de cada tambor, produciendo así juntas horizontales entre ellos.
7. Crear cilindros en las juntas según el método estándar de modelado de juntas presentado anteriormente, tomando los centroides de las bases como centros de los cilindros, de manera que la altura de estos cilindros exceda el espacio en la junta. Realizar diferencias booleanas para eliminar el volumen que se encuentra más allá de las bases e interseca con los tambores.
8. Seccionar el capitel de la columna original (*as-built*) para extraer las dimensiones promedio de la parte superior (rectángulo), la parte media y la parte inferior (circunferencias), y modelar usando geometrías primitivas en función de dichas dimensiones y formas.

Una vez obtenidos los modelos de la columna más desfavorable (C19) siguiendo los tres enfoques de modelado previstos, es preciso estudiar el flujo de trabajo entre los modelos 3D y la plataforma de simulación. Se ha escogido ANSYS ICEM CFD 18.0 (ANSYS Inc., 2018) para producir la malla FEM para el posterior análisis numérico estructural. Teniendo en cuenta que, siguiendo el procedimiento de modelado propuesto, cada objeto individual mantiene sus coordenadas dentro del mismo sistema, se facilita el procedimiento de importación, ya que la ubicación de los elementos está automáticamente definida. Finalmente, se ha optado por el formato STL como formato de archivo para la importación de las mallas 3D de los tambores y las juntas, por separado, en la plataforma de simulación, pues se trata de un formato de archivo común entre las aplicaciones relacionadas con HBIM y ANSYS.

### 5.2.5. Análisis geométrico

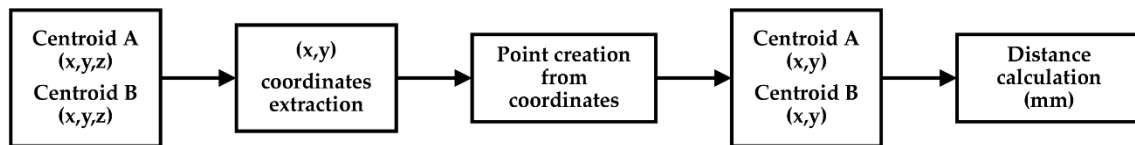
Aunque los métodos para extraer estos datos geométricos de los modelos *as-built* se describen a lo largo de esta subsección, Grasshopper también se usó para calcular la distancia entre los puntos (centroides) analizados en los tambores. La distancia euclidiana según la ecuación (1) (Anton & Rorres, 2010) entre estos puntos se ha calculado en el espacio vectorial  $R^2$ .

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} , \quad (1)$$

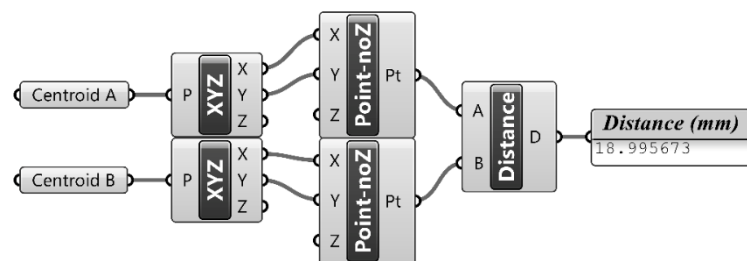
donde  $D$  es la distancia euclidiana entre los puntos en mm,  $x$  representa la coordenada de abscisas de los puntos en mm,  $e$  y es su ordenada en mm.

Las distancias calculadas se recogen en el *Anexo II* en la Tabla A1: Desplazamientos y distorsiones en columnas. Las alteraciones geométricas estructurales de todas las columnas con capitel y sus tambores se recogen en la Figura A1. Desplazamientos de centroides.

El siguiente *script* creado en Grasshopper (presentado en formato diagrama en la Figura 13 y como *script* en la Figura 14) tiene como objetivo automatizar el cálculo de la distancia euclidiana.



**Figura 13.** Cálculo de distancias para el análisis geométrico. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).



**Figura 14.** *Script* en Grasshopper para el cálculo de distancias para el análisis geométrico. Fuente: propia.

Este sencillo *script* también se creó *ad hoc* en esta investigación, con vistas a medir los desplomes y las distorsiones en las bases de los tambores y sus centroides de volumen, respectivamente, para analizar geoméricamente las columnas. Con la intención de evitar la medición manual de distancias, con el tiempo que esto conlleva, el *script* realiza el siguiente algoritmo semiautomático: 1) selección de puntos (manual); 2) extracción de coordenadas X e Y; 3) proyección de los puntos en el plano XY; 4) Cálculo de la distancia euclidiana; 5) resultado. Básicamente, este procedimiento evita la coordenada Z con el fin de calcular la distancia entre esos dos puntos, pero referidos al plano XY, dado que los desplazamientos y las distorsiones se miden fácilmente a partir de una vista en planta.

Finalmente, cabe mencionar que el modelado preciso de las columnas en la Basílica permite el cálculo de la superficie de las mallas 3D y su área de triángulo promedio, así como el volumen de todos los tambores (véase Tabla A2. Superficie y volumen de columnas. (*Anexo II*)). Teniendo en cuenta la densidad de los materiales, el volumen es esencial para calcular la masa de los diferentes tambores mediante la siguiente ecuación (2).

$$m = dV, \quad (2)$$

donde  $m$  es la masa del elemento en kg,  $d$  representa su densidad en  $\text{kg}/\text{m}^3$  y  $V$  es el volumen en  $\text{m}^3$ .

Los enfoques específicos para realizar el análisis geométrico se describen en las siguientes subsecciones.

### *Desplomes de columnas y tambores*

El desplome global de las columnas se calcula en esta investigación teniendo en cuenta los centroides de la parte superior de la basa de la columna y la base inferior del capitel. Este procedimiento proporciona el desplazamiento del eje de la columna en la parte superior, o lo que es lo mismo, la distancia en que el capitel se desplaza desde la base de la columna. Por lo tanto, dado que las columnas sin capitel (C1, C4, C5, entre otras) no están completas porque carecen de varios tambores, el cálculo del desplome general no se aborda en estos casos. Además, el desplome de cada tambor se determina teniendo en cuenta sus respectivos centroides en las bases superior e inferior de los tambores.

En lugar de empleando un método algorítmico como en el *script* (Figura 14), el desplome podría también calcularse matemáticamente a través de las coordenadas X, Y y Z de los centroides (este es esencialmente el objetivo del *script*, pero midiendo la distancia entre ellos en el plano horizontal), o geoméricamente creando un eje vertical desde el primer centroide y midiendo la distancia perpendicular a dicho eje desde el segundo punto.

### *Distorsión de tambores*

El análisis geométrico también comprende el cálculo de la distorsión de los tambores con respecto al eje vertical de la columna ideal sin deformaciones. Para hacer esto, tanto las columnas *as-built* como las de geometría ideal se alinean tomando como referencia los centroides de la base superior de las basas. De esta manera, las dos versiones de columna se colocan en el mismo sistema de coordenadas. El *script* de Grasshopper desarrollado también se puede aplicar para calcular la distancia (distorsión) seleccionando el centroide específico y cualquier punto en ese eje como referencia. De manera similar, los enfoques matemáticos y geométricos permiten medir la distancia perpendicular al eje ideal desde cada centroide, calculando así sus distorsiones. Sin embargo, no se consideró la distorsión del tambor de los capiteles de las columnas, dada la imposibilidad de capturar su base superior con TLS, y por lo tanto de modelarlos con precisión. Así, el cálculo del centroide del volumen de los capiteles implicaría errores significativos, por lo que se optó por medir la distorsión de sus bases inferiores en su lugar.

Además, resulta interesante calcular las distorsiones de los tambores en relación con los tambores inferiores, lo que representa la excentricidad de estos elementos. El cálculo con el *script* es sencillo, ya que requiere únicamente seleccionar el centroide del volumen de cada tambor para mostrar la distancia entre ellos en el plano XY. Esto proporciona una visión directa de los tambores que más se desplazan entre sí.

### *Alteraciones geométricas superficiales en tambores*

Las alteraciones geométricas superficiales de los tambores también se pueden analizar cuantitativamente. Esto se lleva a cabo de forma detallada para la columna más desfavorable C19 a nivel estructural. Tal como ya se ha descrito, los modelos *as-built* de las columnas integran sus deformaciones, mientras el enfoque de modelado ideal contempla superficies basadas en geometrías primitivas pero que contienen sus dimensiones generales. De esta manera, el análisis de las diferentes secciones de ambos modelos para cada tambor proporciona una idea de las irregularidades de la superficie *as-built* y, por lo tanto,

permite la restauración de las áreas que presentan patologías. Para ello, ambos modelos deben estar alineados. La metodología propuesta para la reconstitución digital garantiza que todos los elementos de la basílica en la mantienen su posición original dentro del mismo sistema de coordenadas. La alineación de los tambores *as-built* se realiza de forma automática, pues proceden directamente del mallado (y tratamiento) de las nubes de puntos. Sin embargo, el modelado ideal se realizó por separado para facilitar el flujo de trabajo, por lo que se hace necesario alinear los tambores ideales con sus correspondientes versiones deformadas tambor a tambor, como si no hubiera distorsión con respecto al eje vertical. Así, se alinean los centroides de volumen de los tambores *as-built* con el centro de las secciones ideales (circunferencias). Las secciones horizontales de los tambores se crean en tres niveles —inferior, intermedio y superior— y son nombradas en consecuencia, salvo en el caso de las basas más complejas, para las cuales se realiza una segunda sección intermedia.

El análisis cuantitativo de las alteraciones geométricas superficiales consiste en estudiar la desviación de los puntos en las curvas (secciones) con respecto a las secciones ideales. Estos puntos se pueden extraer directamente de las polisuperficies (sólidos), pero se considera que la inserción de 32 puntos en las secciones *as-built* permite una interpretación clara de las deformaciones. Estos puntos, numerados y alineados con el cuadrante de las secciones ideales, facilitan la identificación de las partes débiles en los tambores. Además, se mide la distancia entre las secciones alineadas. Estas curvas se intersecan unas con otras, ya que las secciones *as-built* no son regulares. Con el fin de distinguir entre las áreas donde los puntos en la sección *as-built* se localizan bajo la sección ideal —se consideran las distancias negativas ( $x < 0$ )—, o sobre ella —distancias positivas ( $x > 0$ )—, cabe partir la curva *as-built* utilizando la ideal. De esta manera, es posible hallar las distancias mínimas y máximas entre ellas, respectivamente.

Finalmente, la desviación general entre ambas secciones se calcula en Rhinoceros. Las distancias desde los puntos insertados en la curva *as-built* hasta la sección ideal (circunferencia) se analizan para obtener mediciones estadísticas sobre las deformaciones del tambor, como el promedio, la mediana y la desviación estándar. El análisis de alteraciones geométricas superficiales de todas las secciones de la columna C19 se recogen en el *Anexo II* en la Figura A2. Análisis de deformaciones.

## 5.2.6. Modelado y análisis numérico estructural

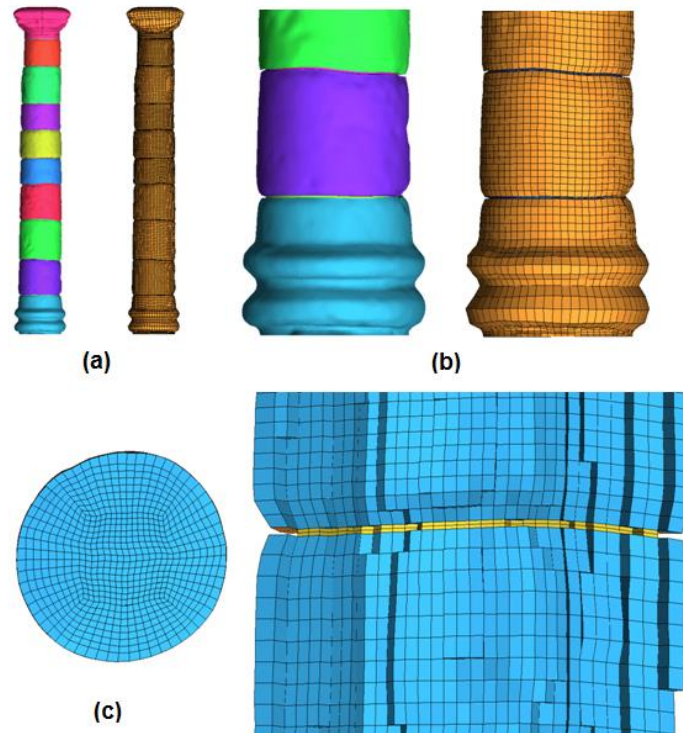
### *Generación de mallas 3D FEM*

Para el objetivo del modelado FEM, la columna C19 ha sido mallada con elementos hexaédricos con el software ANSYS - ICEM CFD hexa (ANSYS Inc., 2018). La geometría en formato STL se ha importado desde Rhinoceros, tal como se ha descrito en la subsección 5.2.4. *Reconstitución digital: modelado sólido 3D*.

Los tres distintos enfoques de modelado 3D que se consideran para el análisis numérico en la Basílica de Baelo Claudia ya se han descrito previamente, pero cabe describirlos como recordatorio:

1. Modelo *as-built*, procedente de la geometría real obtenida mediante TLS y mallado 3D.
2. Modelo simplificado. Representa los métodos de medición convencionales. Cuenta con desplome general y distorsiones entre tambores, pero no refleja imperfecciones geométricas superficiales.
3. Modelo ideal, sin desplomes, distorsiones ni alteraciones geométricas.

Con respecto al modelo *as-built*, en la Figura 15 (a) se muestra una vista general de la geometría importada y la malla de superficie resultante, con una vista detallada en (b). (c) presenta la malla 3D interna (rebanada y detalle de una vista frontal). La topología *O-grid* se usó para mallar (FEM) correctamente la geometría de forma cilíndrica con una calidad de malla adecuada (c).



**Figura 15.** Columna C19. (a) Vista general de la geometría importada y la malla de superficie. (b) Detalle de la basa. (c) Rebanada de la malla hexaédrica 3D (los elementos en color amarillo representan la junta de mortero entre tambores). Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

La columna C19 se malló con un total de 174.360 elementos hexaédricos (153.284 nodos). Se establecieron 20 elementos de malla para la altura de cada tambor, así como para el capitel y la base. Por su parte, se utilizaron dos elementos para representar el espesor de la junta del mortero, cuyo espesor promedio es 12 mm. El ángulo de cara del elemento hexaédrico promedio superó  $75^\circ$ , pero debido a la complejidad del capitel (en particular de la geometría *as-built*), hubo algunos elementos con menores ángulos, con un valor mínimo de  $18^\circ$ . La relación de aspecto mínima de los elementos de malla (tamaño del borde mínimo del elemento dividido por el tamaño del borde máximo del elemento) fue 0,05, y la asimetría mínima 0,15. El factor de expansión de malla más alto fue 45. La resolución de malla promedio ( $\Delta x$ ) fue 3 mm, lo que garantiza un refinamiento de malla adecuado para la estructura que se analiza. Se debe considerar que la resolución de la malla conlleva un impacto en los resultados de FEM y, por lo tanto, se requiere generalmente un estudio de independencia de la malla para garantizar resultados de FEM precisos. Los tres tipos de geometría se mallaron con los mismos parámetros y, por consiguiente, el número de elementos y nodos y la resolución general de malla son los mismos para dichas geometrías.



### *Modelado y análisis 3D FEM estructurales*

Después de modelar las tres mallas 3D FEM (*as-built*, simplificada e ideal), se construyen modelos estructurales 3D FEM, y los tres modelos de columna se prueban numéricamente y se comparan.

Los elementos sólidos tridimensionales de ocho nodos, SOLID 65, se implementan dentro de la malla. El elemento SOLID 65 comprende ocho nodos, con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Los análisis numéricos estructurales se realizan en esta investigación bajo carga por gravedad. El comportamiento estructural se analiza en el rango lineal, centrándose en la verificación del estado límite último (*Ultimate Limit State*). Si bien el enfoque no lineal es el análisis de referencia para evaluaciones de seguridad integrales, el rango lineal hace posible obtener datos significativos tanto desde una perspectiva cuantitativa general como cualitativa (Pineda, 2016; Pineda *et al.*, 2017). Además, los análisis lineales son los pasos preliminares y necesarios para futuras evaluaciones exhaustivas bajo fenómenos de carga dinámica y envejecimiento (Pineda, 2016a). Teniendo en cuenta el alcance principal de esta investigación, los datos proporcionados por el rango lineal son de especial interés.

Un modelo macro con propiedades homogeneizadas se implementa en la formulación matemática. Se supone un modelo homogeneizado, teniendo en cuenta que los materiales estructurales son inicialmente isotrópicos hasta que se excede bien la resistencia a la tracción o la resistencia a la compresión. Por lo tanto, las unidades de piedra, el mortero y la interfaz se homogeneizan en el continuo, y el patrón de daño se inserta en el modelo ajustando la matriz de tensión-deformación.

Los parámetros de control de material de los modelos 3D sólidos se determinan sobre la base de las propiedades de material obtenidas en investigaciones anteriores (Pineda & Irazo, 2017; Elhaddad *et al.*, 2018). Los materiales estructurales son piedra de calcarenita (capitel, basa y tambores) y mortero de cal (juntas). De lo mencionado anteriormente, el peso específico  $w$  es igual a  $21.000 \text{ N/m}^3$ , el módulo de Young  $E$  es igual a  $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  y la relación de Poisson  $\nu$  es igual a  $0,2$ .

En lo que respecta a las condiciones de contorno, la base de la columna C19 está completamente empotrada.

Para verificar los estados límite últimos, se realizan análisis estáticos siguiendo las prescripciones de Eurocódigo (AENOR, 2000). Además, también se llevan a cabo análisis modales (autovalores) para obtener las propiedades dinámicas: frecuencias naturales,  $\omega_n$  y formas modales,  $\zeta_n$ .

Después de realizar los análisis numéricos mediante FEM, se obtiene el factor de cumplimiento  $\alpha$ . Con este factor, la resistencia o la capacidad de deformación (relacionada con el estado límite último, en correspondencia con los valores de resistencia a compresión) con respecto a los efectos de carga por gravedad, ( $\alpha = R/D$ ). Si el factor de cumplimiento  $\alpha$  alcanza un valor mayor o igual a uno, los requisitos de seguridad se cumplen completamente.

Además, se comparan los gradientes de tensión-deformación, así como las variaciones de valor máximo (en términos de campos de tensión-desplazamiento) entre los modelos. El factor  $\alpha$  y los análisis comparativos proporcionan datos valiosos sobre la precisión y la idoneidad de cada modelo.

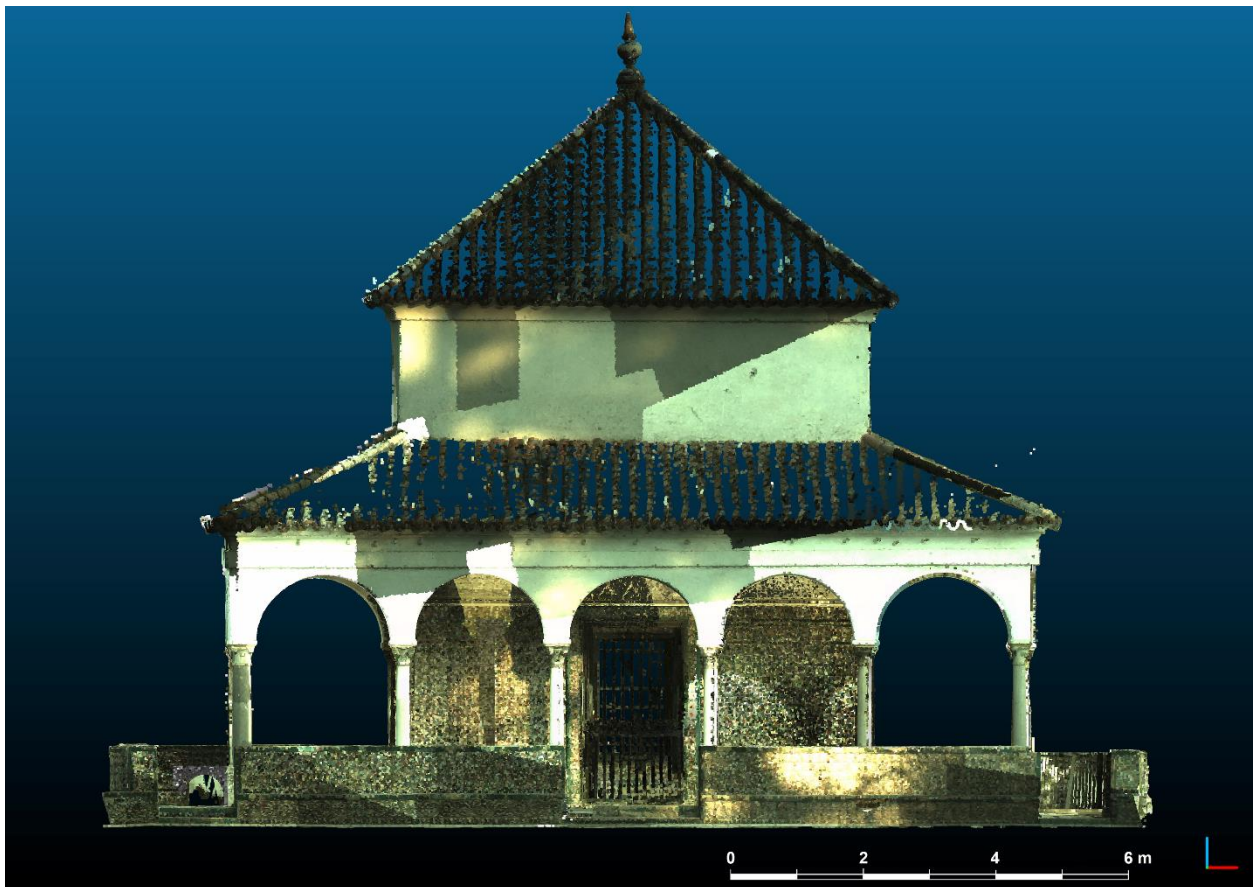


## 6. Resumen global de los resultados

Los resultados de la investigación se presentan estructurados según la propia metodología de la tesis doctoral, a fin de poder relacionar con facilidad los métodos empleados y los resultados obtenidos.

### 6.1. Escaneado 3D

El escaneado 3D del Cenador de Carlos V produjo una nube de puntos global que registra las alteraciones geométricas de muros, vigas, pares de cubierta y columnas. Las imágenes RGB (*Red, Green, Blue*) que capta el escáner se mapean automáticamente en la nube de puntos con vistas a dotarla de mayor realismo, además de para identificar distintas patologías superficiales.

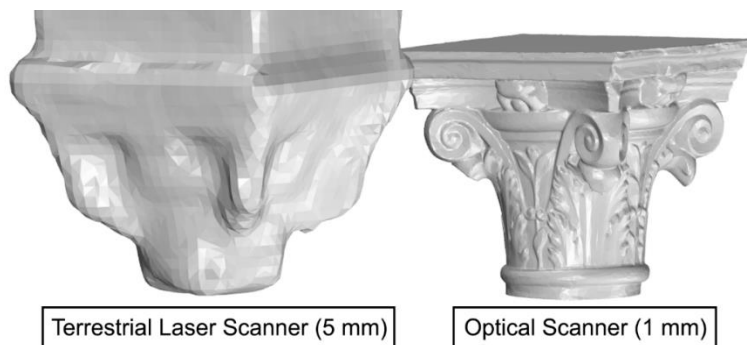


**Figura 16.** Nube de puntos RGB del Cenador de Carlos V. Alzado sur. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de José Antonio Barrera y Enrique Nieto.



**Figura 17.** Nube de puntos RGB del Cenador de Carlos V. Perspectiva en ojo de pez de las galerías sur y este.  
Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de José Antonio Barrera y Enrique Nieto.

Para determinados elementos más detallados, como los capiteles de las columnas, la Figura 18 justifica la adquisición de datos mediante OS, el cual, por norma general, proporciona mayor resolución que TLS una vez malladas las nubes de puntos.



**Figura 18.** Diferencia en la precisión y detalle de TLS y OS para un capitel de columna. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Con respecto al caso de estudio de Baelo Claudia, el proceso de registro de los 19 escaneos en Cyclone REGISTER 360, llevado a cabo utilizando la función de alineación automática en el *software*, produjo 101 enlaces de escaneos o conexiones entre las diferentes nubes (datos de las diferentes posiciones o estaciones de escaneo). Ciertos errores de registro se ejecutaron automáticamente por medio de la correspondencia de nube a nube. Los valores promedio en el informe final de escaneado fueron 81% de fuerza, 54% de superposición y 0,006 m de error de grupo de escaneos en el registro global. La Figura 19 muestra los enlaces producidos automáticamente para conectar las 19 estaciones (escaneos E-x), las cuales aparecen en la posterior Figura 20.

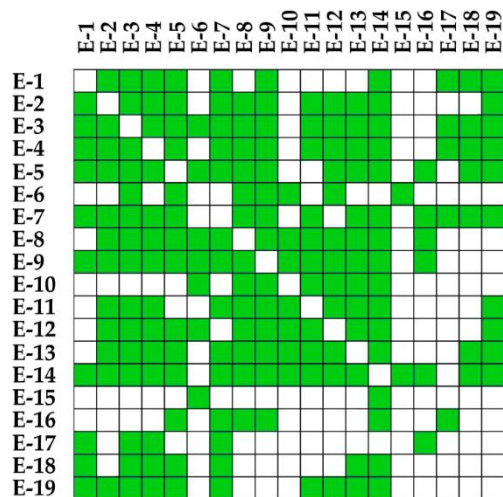


Figura 19. Enlaces automáticos entre escaneos E-x. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

El resultado de este proceso fue una nube de puntos masiva con aproximadamente 426 millones de puntos para un tamaño de archivo total de 18.27 GB en formato PTS. La Figura 20 muestra las columnas numeradas (etiquetas Cx) y las posiciones del escáner, estaciones o estacionamientos (etiquetas E-x) en una vista en planta de la nube de puntos de la Basílica de Baelo Claudia y sus alrededores. Nombrar las columnas es esencial para el posterior modelado y análisis 3D abordados en esta tesis. Es preciso destacar la ausencia de las columnas C16 y C18, como describía la sección de casos de estudio, pero su número se tendrá en cuenta a lo largo de la investigación a fin de mantener un orden riguroso. En la Figura 20, las distancias entre estaciones y columnas se pueden medir utilizando la escala gráfica.

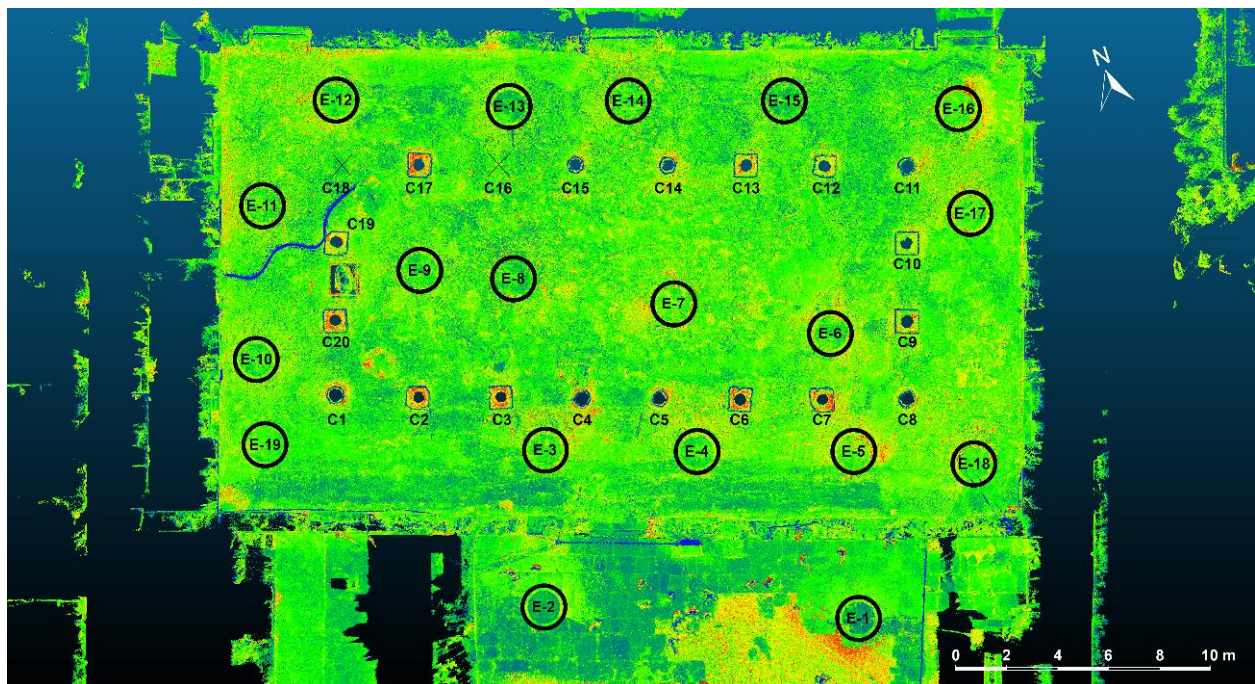
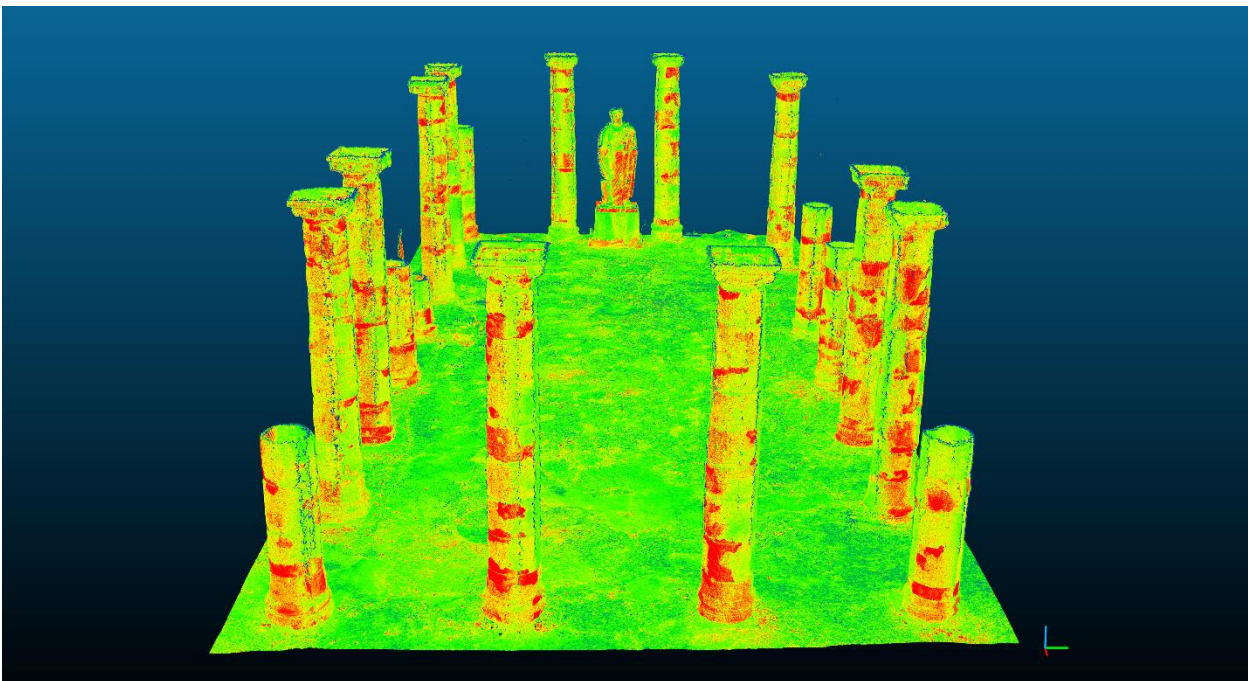


Figura 20. Vista en planta de la nube de puntos de la Basílica de Baelo Claudia con numeración de estaciones y columnas. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

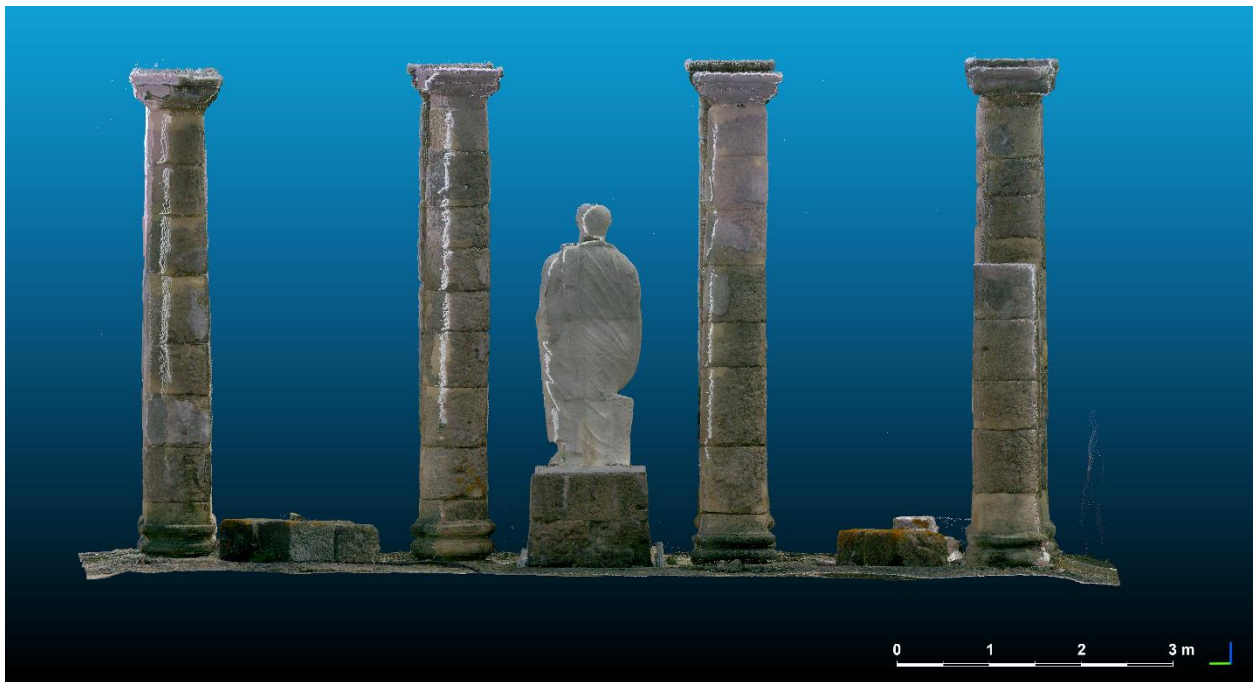
Dada la gran cantidad de información producida, fue necesario realizar un proceso de segmentación de la nube de puntos global para reducir la cantidad de puntos según las necesidades de esta investigación y posteriormente seleccionar el área deseada para su estudio, el conjunto de columnas de la Basílica. Para esta tarea, se creó manualmente un polígono de recorte en la vista en planta para eliminar los alrededores de la Basílica. CloudCompare v2.91 (Girardeau-Montaut, 2016a) para Microsoft Windows de 64 bits se utilizó para llevar a cabo esta segmentación manual. La nube de puntos resultante contenía aproximadamente 160 millones de puntos para 12.85 GB, incluido el terreno en torno a las columnas. El algoritmo Cloth Simulation Filter (CSF) (Zhang *et al.*, 2016), integrado en CloudCompare como *plug-in*, es un método de filtrado para separar el terreno de los datos TLS o LiDAR (*light detection and ranging*). Sin embargo, las partes inferiores de las basas de columnas de la Basílica también se eliminaron junto a los datos del terreno al usar este algoritmo. Por esta razón, se requirió un proceso de segmentación manual adicional para eliminar el terreno, dado que tanto su irregularidad como los diferentes niveles de la parte inferior de las columnas también imposibilitaron el establecimiento de umbrales de elevación para dicha eliminación, pero de forma automática. Los nuevos polígonos de recorte que enmarcaban las columnas permitieron extraerlas de la nube de puntos global de la Basílica, conservando así sus coordenadas reales con el fin de modelarlas y analizarlas dentro de su contexto original.

El escaneado 3D de la zona en la que se enmarca la Basílica, siguiendo el proceso descrito en esta tesis, produjo la nube de puntos que se muestra en la Figura 21, incluyendo el terreno entre las columnas, según el modo de visualización *Scalar field*, que, en este caso, representa la intensidad de reflexión de la luz láser sobre las superficies, lo que a su vez permite apreciar los distintos materiales y patologías superficiales en las columnas.



**Figura 21.** Nube de puntos de la Basílica de Baelo Claudia con intensidades. Perspectiva este. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de Roberto Gallardo y Leica Geosystems.

Además, tal como se ha descrito en la subsección del caso de estudio relativa al escaneado 3D, este también se realizó tomando fotografías con el equipo tras la captura geométrica. Las imágenes RGB de la nube de puntos permiten identificar distintas irregularidades en la superficie de las columnas. La Figura 22 ilustra la nube de puntos coloreada, así como la imperfecta alineación de las columnas y su desplome.



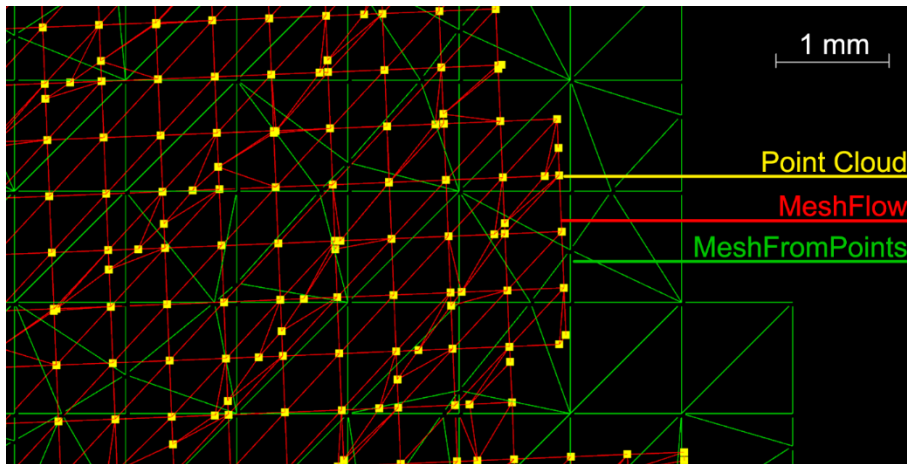
**Figura 22.** Nube de puntos RGB de la Basílica de Baelo Claudia. Alzado oeste. Fuente: propia basado en datos TLS con la colaboración de Roberto Gallardo y Leica Geosystems.

## 6.2. Validación del proceso de mallado

Dada la extensión y la complejidad de este apartado, es preciso subdividirlo en los dos casos de estudio a fin de facilitar su comprensión.

### 6.2.1. Cenador de Carlos V

En esta investigación, se han testado diferentes aplicaciones para comparar su funcionalidad e idoneidad para convertir nubes de puntos TLS a mallas 3D. En algunos casos, el proceso de mallado no produjo resultados adecuados. Empleando SolidWorks (Dassault Systèmes & SolidWorks Corporation, 2017) en una nube de puntos de muestra, se crearon caras no válidas en la malla, lo que hace imposible exportar la geometría en estos sectores como objetos 3D válidos. Por su parte, se decidió descartar para el Cenador el uso del algoritmo de Poisson en las aplicaciones de código abierto CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2016a) y MeshLab (Cignoni *et al.*, 2008), debido a la falta de información en la nube de puntos global por no cerrar el volumen en el escaneado 3D, además de existir normales invertidas. Como resultado, se producían burbujas que conectaban los bordes correctos, lo cual no define una geometría válida de los elementos que conforman el caso de estudio. Finalmente, el *plug-in* de Rhinoceros MeshFromPoints (Robert McNeel & Associates, 2014b) (Figura 23), conlleva una precisión insuficiente en el mallado, ya que las mallas (en color verde) no se ajustan a las nubes de puntos (en amarillo) como sí ocurre empleando el *plug-in* Mesh Flow (Mesh Reverse, 2016) (en rojo).



**Figura 23.** Resultados de diferentes *plug-ins* de mallado en modo de visualización alámbrico. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

El escaso ajuste de las mallas 3D a las nubes de puntos supone una merma en el relieve de las mallas, lo cual no es apropiado para registrar las alteraciones geométricas de los elementos constructivos.

La diferencia en los resultados tras el uso de ambos *plug-ins* debe especificarse cuantitativamente. Con este fin, la Tabla 1 muestra las características de las mallas producidas por ambos algoritmos, a fin de justificar la elección de Mesh Flow (1) frente a MeshFromPoints (2), seleccionando el primero como la malla de referencia para la comparativa. En esta investigación, se emplea la desviación estándar, dado que esta herramienta estadística cuantifica la dispersión de los valores de los conjuntos de datos, correspondientes a los vértices cuya ubicación ha cambiado con respecto a la malla original o de referencia al realizar el proceso de mallado. Tal como se explica en la subsección correspondiente en la metodología de esta tesis, se procede a validar el proceso de mallado por medio del cálculo de desviaciones de puntos en CloudCompare. La computación de distancias entre mallas se realiza en dos muestras malladas empleando ambos *plug-ins*.

**Tabla 1.** Comparativa de las características de las mallas entre diferentes *plug-ins* de mallado. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

<i>Plug-ins</i> y formato de archivo	Número de vértices	Número de caras	Superficie de malla (mm <sup>2</sup> )	Superficie de malla por triángulo (promedio) (mm <sup>2</sup> )	Desviación estándar ( $\sigma$ )
1 PLY	2.593.806	1.296.903	119.598	0,092	0*
2 PLY	174.519	343.911	121.791	0,354	1183,550

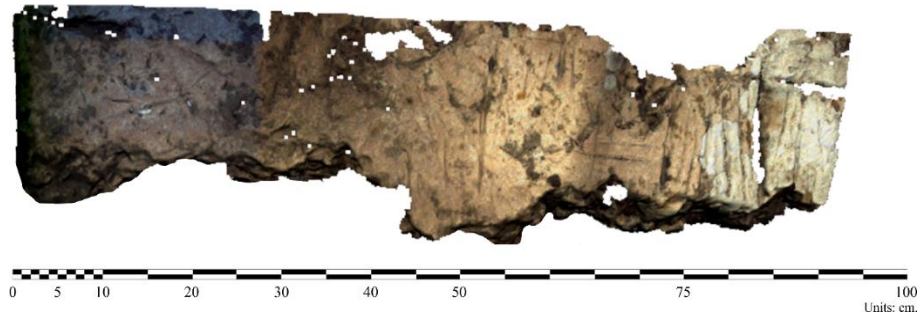
\* Este valor representa la igualdad entre las mallas comparadas.

Según muestran la Figura 23 y la Tabla 1, además de aumentar la superficie de las mallas, MeshFromPoints reduce significativamente la cantidad de puntos y polígonos, por lo que queda descartado para el mallado del caso de estudio.

Como se indicó en la sección anterior, solo las nubes de puntos OS se mallan directamente en Artec Studio, mientras que las mallas a partir de las geometrías capturadas mediante TLS se generan al importar las nubes de puntos originales en Rhinoceros. Por lo tanto, es preciso mostrar la desviación (error o falta de similitud) entre las mallas resultantes utilizando el *plug-in* 2 en Rhinoceros para diferentes formatos de



archivo a fin de evaluar la precisión del algoritmo. Para ello, se ha tomado como nube de puntos de muestra una porción de una superficie irregular de piedra (véase Figura 24) de la Cueva de Las Ventanas (Cortés-Sánchez *et al.*, 2018) en Píñar, Granada.



**Figura 24.** Muestra de superficie irregular de piedra. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

La geometría de esta superficie de piedra se capturó utilizando OS, por lo que la malla de Artec Studio fue considerada la referencia de la comparativa. Por su parte, la malla a comparar se generó al importar en Rhinoceros la nube de puntos extraída de la malla original (Artec Studio). Esto significa que ambas nubes de puntos eran iguales para este análisis, con la misma orientación y posición a fin de evitar errores de alineación. La Tabla 2 muestra los resultados de la comparativa.

**Tabla 2.** Comparativa de las características y formatos para el mallado de la superficie de piedra. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

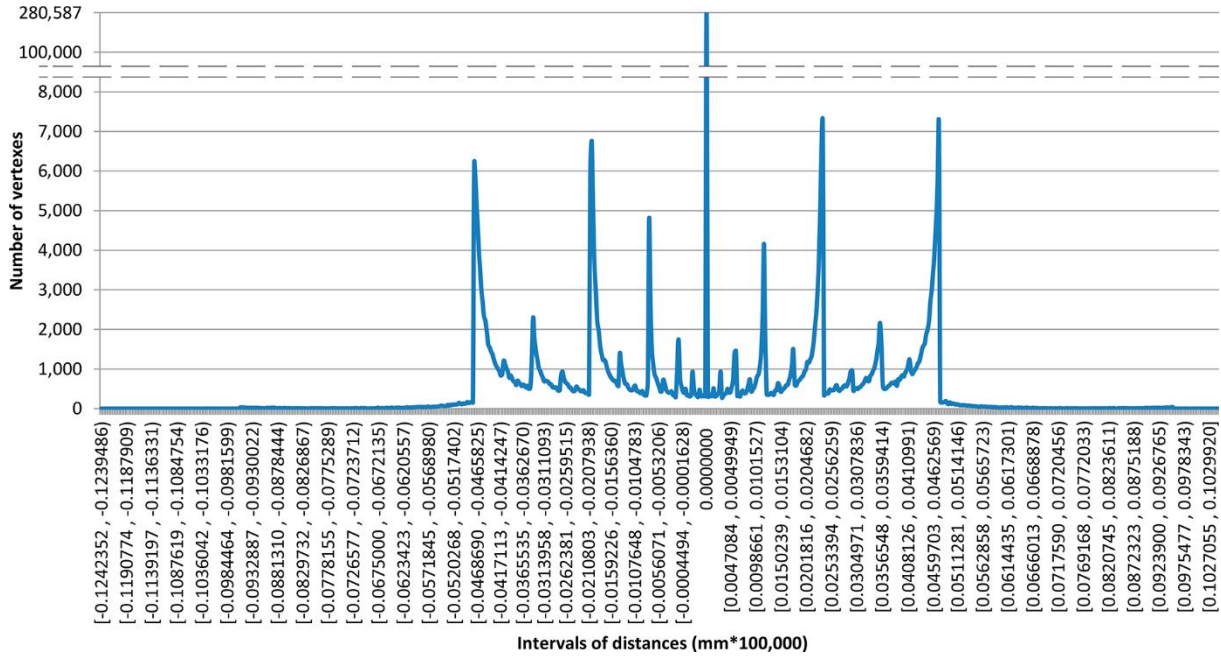
<b>Plug-ins y formato de archivo</b>	<b>Número de vértices</b>	<b>Número de caras</b>	<b>Superficie de malla (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Superficie de malla por triángulo (promedio) (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</b>
Artec Studio PLY	653.667	1.296.903	119.598	0,092	0*
Artec Studio OBJ	653.667	1.296.903	119.598	0,092	0*
Artec Studio FBX	653.667	1.296.903	119.598	0,092	0*
Artec Studio STL	653.487	1.296.544	119.598	0,092	22.975,407
Rhinoceros PLY	645.900	1.285.697	119.474	0,093	9.921,796
Rhinoceros OBJ	645.900	1.285.697	119.474	0,093	9.921,796
Rhinoceros FBX	645.900	1.285.697	119.474	0,093	9.921,796
Rhinoceros STL	645.759	1.285.416	119.474	0,093	22.772,928**

\* Este valor representa la igualdad entre las mallas comparadas.

\*\*Desviación estándar para la comparativa Artec Studio STL — Rhinoceros STL.

Valores elevados de desviación estándar ( $\sigma$ ) representan un alto grado de similitud entre la malla comparada y la malla de referencia, ya que la mayoría de los puntos entre ellos mantienen su posición después del proceso de mallado. Por el contrario, los valores reducidos de  $\sigma$  en la comparativa conllevan un número considerable de vértices distantes de los puntos de la malla de referencia. La excepción es el caso múltiple de  $\sigma = 0$ , donde la falta de desviación se debe al hecho de que todos los vértices en la malla comparada pertenecen al valor cero central, donde los puntos de ambas mallas coinciden y, por tanto, la distancia entre ellos se anula. En este caso extremo, se pueden omitir los intervalos de distancia en los que no hay puntos.

El valor de la desviación estándar entre las mallas producidas utilizando Artec Studio y Rhinoceros mediante Mesh Flow en formato PLY se ilustra en la Figura 25 como distribución de vértices para intervalos de distancia.



**Figura 25.** Gráfico de desviaciones de puntos para las mallas de la muestra de piedra. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Una vez mostrado uno de los gráficos, cabe explicar de forma más detallada las implicaciones del valor de la desviación estándar. Este valor se ha obtenido de los datos (puntos e intervalos) a partir de los cuales se han creado los gráficos de desviaciones. El eje de abscisas representa los intervalos de distancias entre puntos de ambas mallas (comparada y referencia), mientras que el eje de ordenadas indica el número de puntos o vértices que existen en cada intervalo. Por tanto, se puede afirmar que cuanto más similares sean las mallas, mayor número de puntos se ubicarán en el valor cero o cerca de él. Como se ha comentado anteriormente, para dos mallas idénticas, la totalidad de los puntos se encontrará en el valor cero —no habrá desviación entre los puntos de ambas mallas—. A nivel explicativo, la siguiente Tabla 3 de ejemplo muestra cómo dos mallas diferentes (B y C), con el mismo número de puntos, se comparan con una malla de referencia A que se presupone que representa la geometría original.

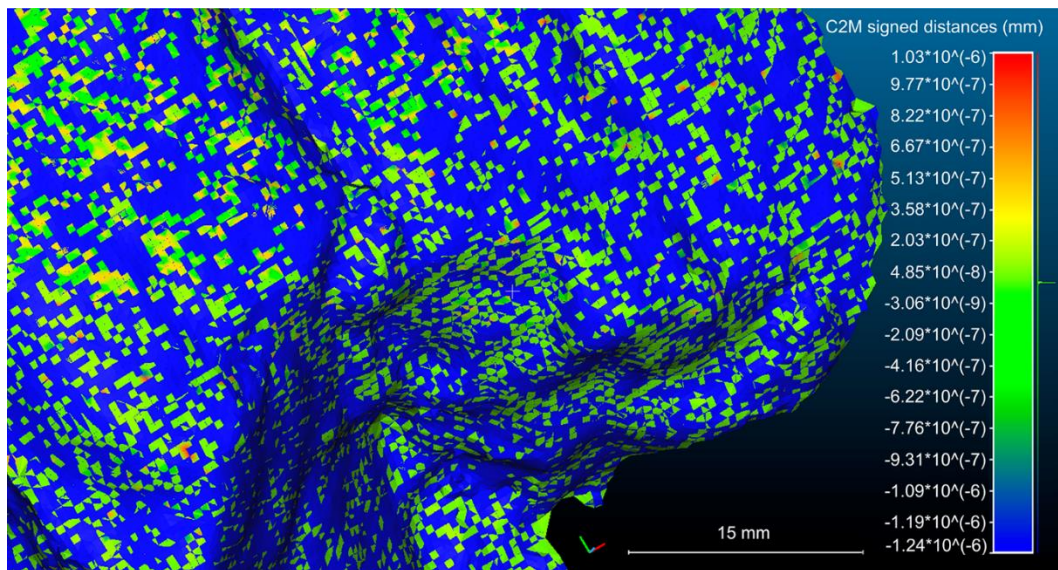
**Tabla 3.** Ejemplo explicativo de la desviación estándar. Fuente: propia.

<b>A-B</b>	<b>Nº puntos</b>	1	0	0	0	1	0	0	1	44	1	0	1	0	0	0	1	50	<b>10,91</b>
<b>A-C</b>	<b>Nº puntos</b>	0	2	1	4	1	3	2	7	10	8	2	6	3	0	0	1	50	<b>3,07</b>
<b>Intervalo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9 (cero)</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>Total puntos</b>	<b>Desv. est.</b>

Se puede observar que la mayoría de los puntos de la malla B se encuentran en el intervalo cuyo valor de distancias con respecto a A, la malla original de referencia, es nulo. Por el contrario, los vértices de la malla C se distribuyen más entre el resto de intervalos, lo que indica la escasa similitud con la malla de referencia. Por lo tanto, centrándose en la desviación estándar, el valor más alto (malla B) representa mayor similitud entre mallas.

De la explicación anterior y de los datos de la Tabla 2, en cuanto a las mallas Artec Studio PLY y STL, se puede afirmar que el elevado valor de la desviación estándar de la segunda se debe a los escasos puntos distribuidos en el resto de intervalos, pues la mayoría se encuentra en el intervalo donde la desviación de puntos se anula. Esto demuestra la gran similitud entre dichas mallas.

La superposición de las mallas comparada y referencia se puede visualizar en el espacio como indica la Figura 26, donde se muestra el histograma de la desviación de la Figura 25 a la derecha de la escala de color. Debido a la diferencia en geometría de ambas mallas, la superposición provoca la intersección de las mismas, por lo que a través de dicha escala de color es posible apreciar la localización de las alteraciones geométricas.



**Figura 26.** Comparativa visual e histograma de la desviación de las mallas Artec Studio PLY y Rhinoceros PLY.  
Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Los intervalos con valores positivos y negativos se organizan de acuerdo con los intervalos de la Figura 25. El signo de estos intervalos debería depender de si la malla comparada se encuentra por encima (del color verde al rojo) o por debajo (de verde a azul) de la malla de referencia.

Finalmente, a fin de aumentar el número de muestras en este análisis cuantitativo para la validación del proceso de mallado, también se lleva a cabo una comparativa (Tabla 4) entre mallas producidas por ambas aplicaciones para un capitel de columna del Cenador.

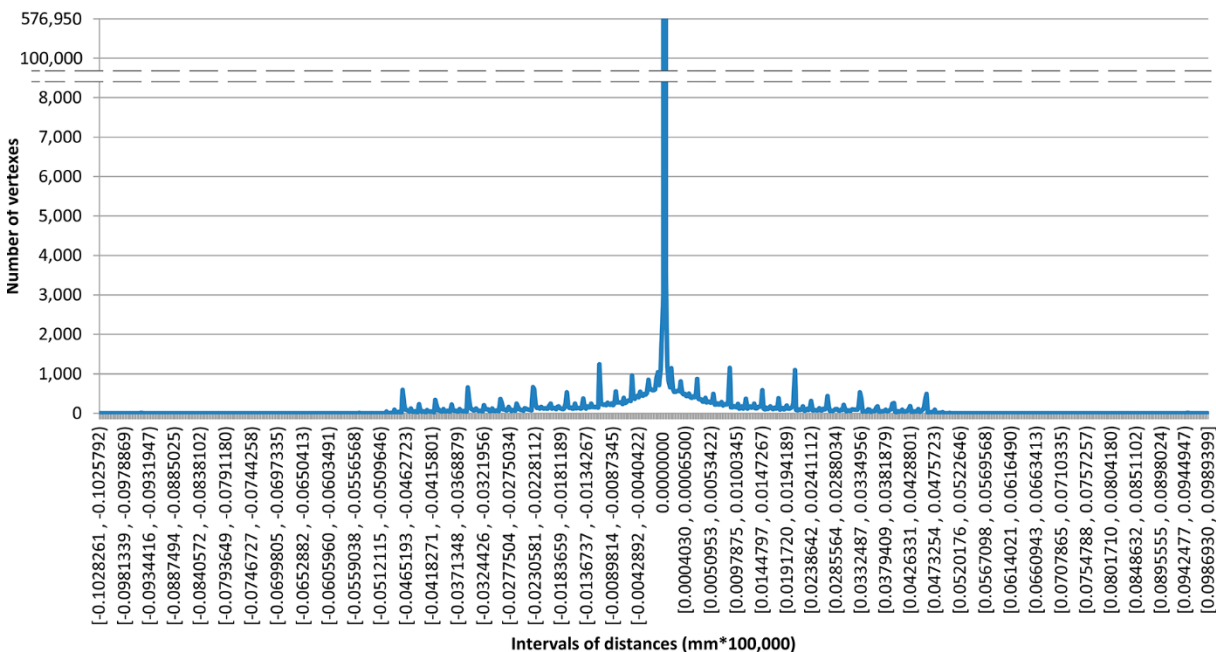
**Tabla 4.** Comparativa de las características y formatos para el mallado del capitel. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Plug-ins y formato de archivo	Número de vértices	Número de caras	Superficie de malla (mm <sup>2</sup> )	Superficie de malla por triángulo (promedio) (mm <sup>2</sup> )	Desviación estándar ( $\sigma$ )
Artec Studio PLY	668.929	1.337.825	517.128	0,387	0*
Artec Studio OBJ	668.929	1.337.825	517.128	0,387	0*
Artec Studio FBX	668.929	1.337.825	517.128	0,387	0*
Artec Studio STL	668.798	1.337.563	517.128	0,387	23.384,003
Rhinoceros PLY	667.110	1.331.274	515.721	0,387	20.182,576
Rhinoceros OBJ	667.110	1.331.274	515.721	0,387	20.182,576
Rhinoceros FBX	667.110	1.331.274	515.721	0,387	20.182,576
Rhinoceros STL	665.280	1.328.368	515.721	0,388	23.280,661**

\* Este valor representa la igualdad entre las mallas comparadas.

\*\*Desviación estándar para la comparativa Artec Studio STL — Rhinoceros STL.

La Figura 27 muestra la desviación de puntos entre la malla de referencia (Artec Studio PLY) y la comparada (Rhino PLY) en el caso del capitel de columna.

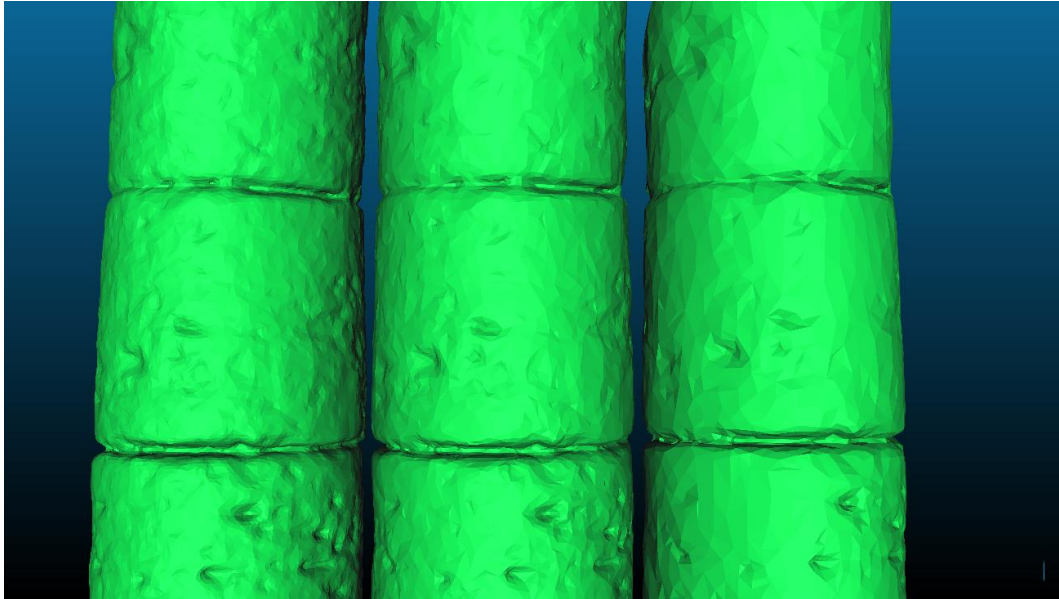

**Figura 27.** Gráfico de desviaciones de puntos para las mallas del capitel de muestra. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Ambos gráficos (Figura 25 y Figura 27) se encuentran a la misma escala a fin de comparar las diferencias visualmente. Cabe destacar que existe cierta simetría en la distribución de los puntos en los intervalos entre ambas mallas, lo que de hecho también puede apreciarse en la escala de color y los intervalos de la Figura 26. Teniendo en cuenta que se usó Rhinoceros para crear las mallas a partir de las nubes de puntos obtenidas mediante el escaneado, se podría concluir con que el *software* equilibra la disposición de las caras resultantes (triángulos) para lograr una geometría aproximada.

Con todo, queda justificada la elección del *plug-in* Mesh Flow de Rhinoceros para el mallado de las nubes de puntos TLS para la reconstitución digital *as-built* del Cenador de Carlos V, pues muestra una precisión apropiada en comparación con Artec Studio, el programa referencia OS en el análisis.

### 6.2.2. Basílica de Baelo Claudia

En la subsección 4.2.2. *Mallado tridimensional, validación y tratamiento de mallas* de 4.2. *Metodología de la investigación* se describen las herramientas y procesos elegidos para el mallado de las nubes de puntos TLS para las columnas de la Basílica, de forma que se respeten las alteraciones geométricas. En este sentido, cabe mostrar el resultado cualitativo de aplicar distintos grados de simplificación en las mallas para la columna C1, muestra del presente análisis para la validación del proceso de mallado (véase Figura 28).



**Figura 28.** Precisión de mallado para la columna C1: izquierda) 100.000 caras; centro) 50.000 caras; derecha) 20.000 caras. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

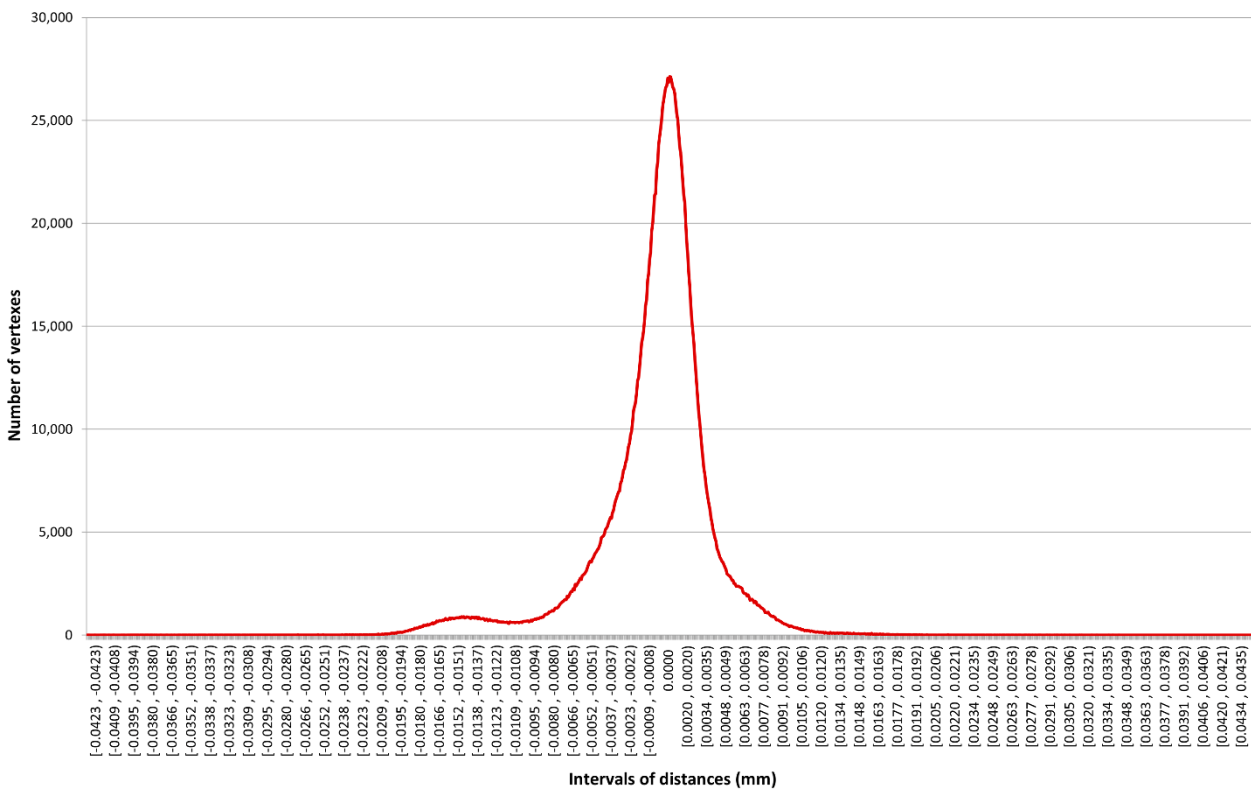
Se aprecia claramente la reducción del número de polígonos en las mallas más simplificadas, lo que supone menor precisión en la representación de las alteraciones geométricas de las columnas.

A nivel cuantitativo, se presenta la siguiente Tabla 5, que recoge las características geométricas de distintos grados de suavizado en las mallas (parámetro *Octree Depth*), de simplificación y la nube de puntos original, referencia de este análisis.

**Tabla 5.** Análisis de la precisión de mallado para la columna C1. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Objeto	<i>Octree Depth</i>	Número de puntos	Número de caras	Superficie de malla (m <sup>2</sup> )	Superficie promedio de triángulo (m <sup>2</sup> )	Volumen de malla (m <sup>3</sup> )	Desviación estándar (puntos)
Malla 0	8	62.520	125.040	12,163	$9,727 \cdot 10^{(-5)}$	1,582	136,895
Malla 1	9	257.188	514.392	12,693	$2,468 \cdot 10^{(-5)}$	1,612	4.432,056
Malla 2	9 simplified	49.992	100.000	12,655	$1,265 \cdot 10^{(-4)}$	1,612	239,839
Malla 3	9 simplified	24.992	50.000	12,617	$2,523 \cdot 10^{(-4)}$	1,611	57,926
Malla 4	9 simplified	9.992	20.000	12,535	$6,268 \cdot 10^{(-4)}$	1,607	10,639
Nube de puntos	--	2.013.465	--	--	--	--	--

Las características de la Tabla 5 han sido calculadas utilizando CloudCompare, salvo la desviación estándar, que representa la dispersión de puntos con respecto a los intervalos de distancia en las Figura 29, Figura 30 y Figura 31 posteriores. A partir de todos estos datos, dada la significativa pérdida de geometría en lo que se refiere a superficie y volumen de las mallas 0 y 4, estos grados de suavizado y simplificación, respectivamente, fueron descartados para el mallado *as-built*. La reconstitución digital de la Basílica según esos parámetros produciría columnas con una simplificación excesiva. Por otro lado, los mayores valores de *Octree Depth*, como el nivel 10 en adelante, produjeron un número excesivo de triángulos y vértices —el nivel 11 creó más puntos que los existentes en la propia nube de puntos original— además de ruido en la superficie de la columna, lo que reduce la calidad de la malla y, al mismo tiempo, aumenta la demanda de recursos computacionales en el procesado, el modelado posterior, el mallado FEM y la visualización. Por esta razón, es necesario cuantificar la precisión del enfoque de mallado correspondiente a la malla 1 (*Octree 9*), el cual se utiliza en esta investigación para producir las mallas con el fin de, previa ligera simplificación para reducir el esfuerzo computacional, proceder a reconstituir digitalmente el caso de estudio. La desviación entre la nube de puntos original y la malla 1 para la columna de muestra C1 (véase Figura 29) se ha calculado en CloudCompare empleando la función ‘nube a malla’.



**Figura 29.** Precisión del enfoque de mallado 1: desviación de puntos con respecto a la nube de puntos original.  
Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Además, la desviación entre los puntos de las mallas simplificadas 2 y 3 se analiza respectivamente en relación con la malla original (1) (Figura 30 y Figura 31).

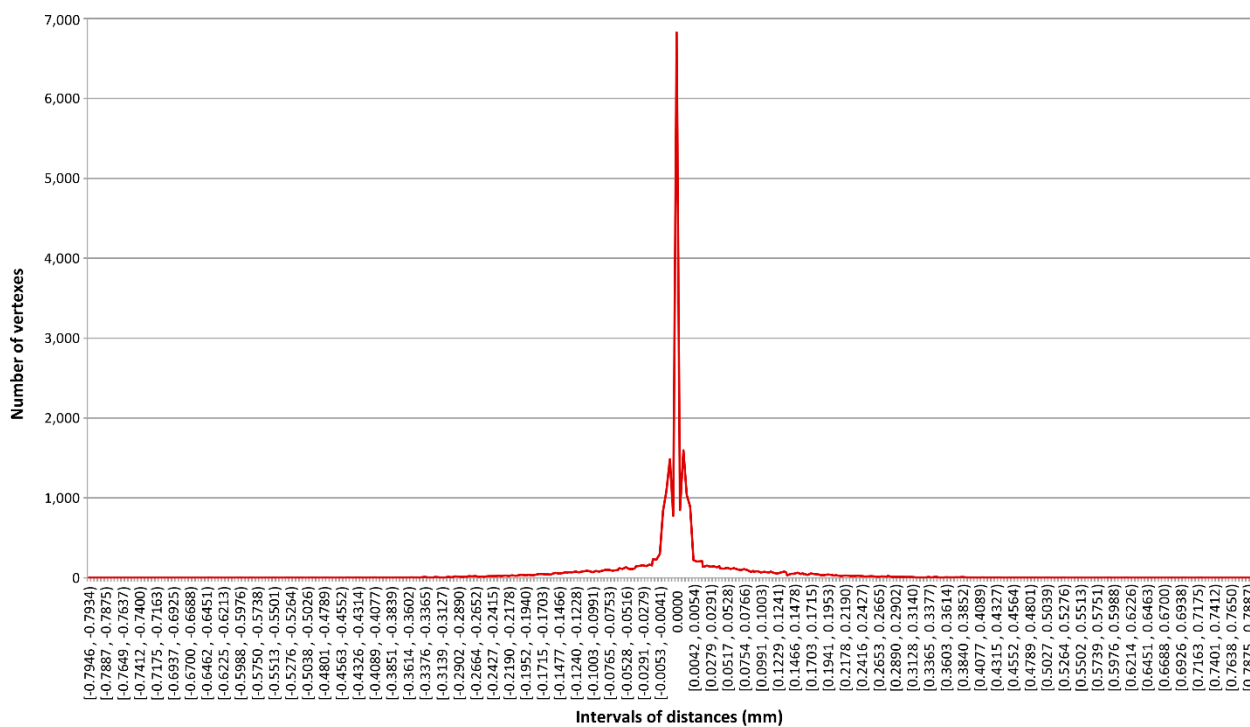


Figura 30. Desviación de puntos entre malla 1 y malla 2. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

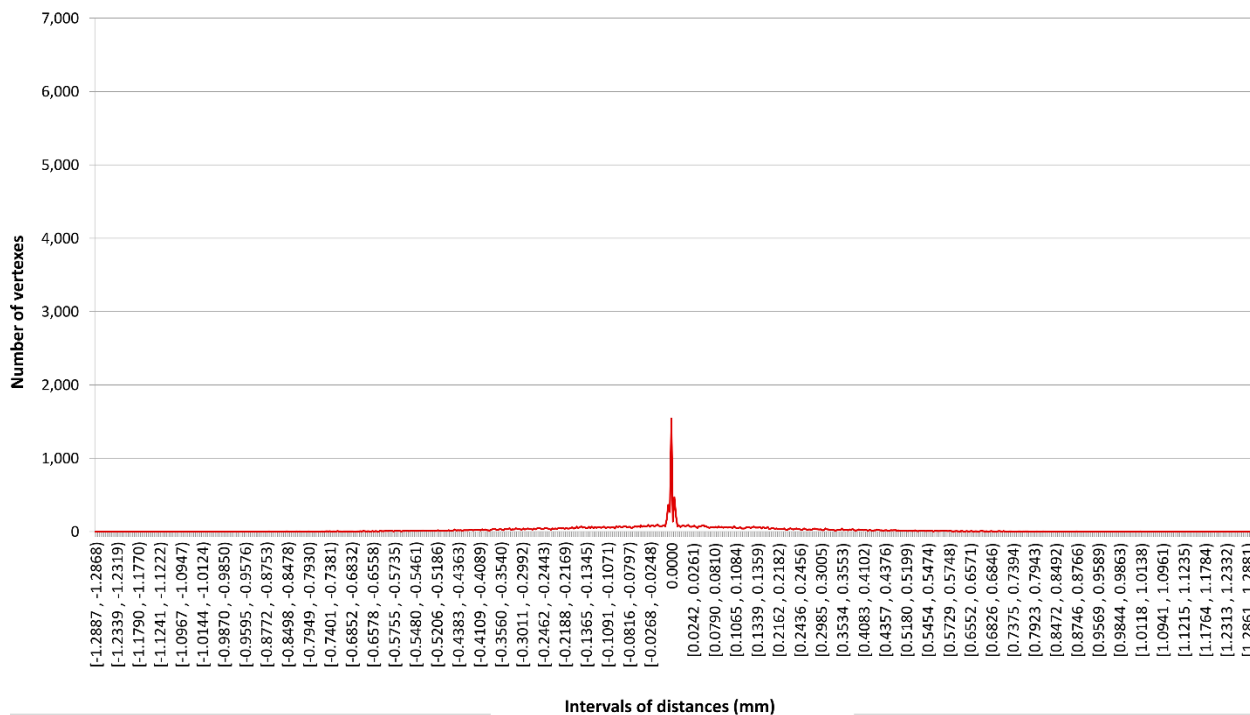


Figura 31. Desviación de puntos entre malla 1 y malla 3. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

El eje de abscisas en estos gráficos, como en el caso del Cenador de Carlos V, representa la desviación entre puntos de las mallas 3D (o entre las mallas y las nubes de puntos) divididas en intervalos. El eje de ordenadas muestra el número de puntos o vértices contenidos en esos intervalos. El elevado número de puntos en el valor central (cero) indica la distancia nula entre los puntos homólogos de ambas mallas (o bien cuando se compara una nube de puntos y una malla), lo que significa que los objetos 3D comparados

son similares. Asimismo, como se explica en Antón *et al.* (2018), valores reducidos de desviación estándar conllevan una menor similitud entre las mallas, mientras que valores más altos representan mayor semejanza. Los gráficos de desviaciones complementan la desviación estándar para mostrar la ubicación de la mayoría de los puntos (valor cero). La desviación estándar, como herramienta estadística para medir la dispersión de datos, se considera válida en esta investigación para evaluar la similitud entre los objetos 3D, ya que las mallas simplificadas comparadas derivan de las mallas de referencia (o de la nube de puntos original en el caso de la malla 0), dado el proceso de simplificación requerido para producir las mallas (o alisado a través de diferentes niveles de *Octree Depth*). Por un lado, a fin de analizar la precisión del mallado, tanto las características geométricas recogidas en la Tabla 5 como la mayor desviación estándar de la malla 1 (4.432,056 puntos) en comparación con la malla 0 (Profundidad 8 de *Octree*), indican la idoneidad del enfoque de mallado 1. Además, las características geométricas de la malla 0 son más pobres que las de la malla 2 (malla 1 simplificada). Por otro lado, cabe comparar las mallas 2 y 3. La escala es constante en ambos gráficos (Figura 30 y Figura 31) para facilitar la comprensión. Una mayor similitud entre las mallas es más evidente en la Figura 30, ya que los puntos en la Figura 31 presentan mayor dispersión; en el primero (malla 2), la desviación estándar es de 202,23 puntos cuando se interpola el valor cero en los intervalos, mientras que en el segundo (malla 3), la desviación estándar se reduce a 49,23 puntos. Además, considerando los intervalos extremos en ambos casos, la mayor desviación de la malla 2 (distancia máxima entre las mallas de comparación y de referencia) es de 0,89 mm, mientras que la malla 3 alcanza 1,49 mm en relación con la malla original 1. Estos resultados muestran la inexactitud del enfoque de mallado 3, que no se considera para el modelado en esta tesis. También cabe señalar la diferencia entre los gráficos de desviación de nube de puntos a malla (Figura 29) y malla a malla (Figura 30). Existe mayor número de puntos en los intervalos próximos al cero en el proceso de mallado de nubes de puntos (enfoque de mallado 1, a partir de la nube de puntos, Figura 29) que para la simplificación de mallas (malla 2 desde malla 1, Figura 30).

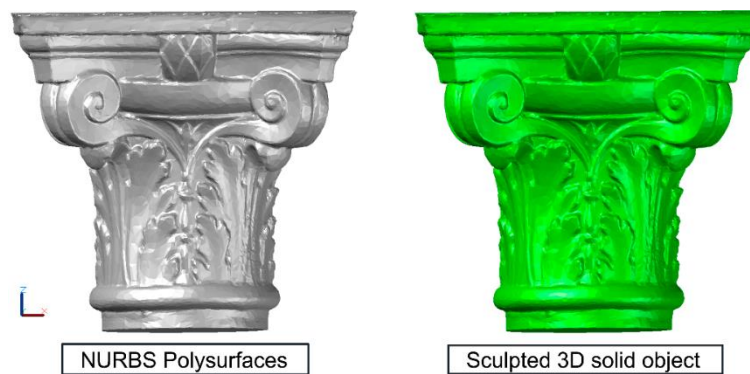
Finalmente, del resultado de esta validación del mallado 3D, puede afirmarse que el grado de simplificación para la malla 2 (desde el nivel de *Octree Depth* 9) es óptimo para modelar las alteraciones geométricas de las columnas en la Basílica, aunque el número de puntos en dicha simplificación debe definirse proporcionalmente según el número de tambores en las columnas. En el caso de la columna C1, que cuenta con 5 tambores, el total de 100.000 triángulos para la columna completa lleva a establecer un umbral de simplificación de 20.000 triángulos por tambor para un modelado de columna preciso.

### 6.3. Reconstitución digital: modelado sólido 3D

El mallado tridimensional de las nubes de puntos TLS, así como las mallas ya producidas mediante OS, dan paso a la conversión de los elementos según el procedimiento semiautomático (Figura 3) para la constitución del modelo HBIM *as-built* de los casos de estudio.

Cabe destacar la evolución del primer modelo HBIM del Cenador, pues Nieto *et al.* (2016) no estudiaron la precisión del modelo ni cuantificaron las alteraciones geométricas del edificio. Indudablemente, el principal objetivo de dicho trabajo no era lograr el modelado *as-built*, sino el generar un modelo (HBIM) que aunara información para respaldar la gestión del edificio histórico, de manera que los distintos agentes involucrados en el proceso de conservación y restauración patrimonial tuvieran acceso a la misma. Por el contrario, esta tesis sí se centra en el modelado *as-built*, considerando el estado real de conservación del Cenador a nivel estructural. Para ello, primeramente, se generan los objetos sólidos 3D (polisuperficies cerradas) a partir de las mallas OS siguiendo los procesos descritos en esta tesis doctoral (Figura 32).





**Figura 32.** Distintos métodos de conversión de mallas 3D a sólidos. Fuente: propia.

Como puede apreciarse, el resultado de aplicar distintos métodos para la obtención de sólidos es aparentemente el mismo. Según ilustra en la figura, la superficie de los sólidos no es regular, pues contiene las alteraciones y peculiaridades geométricas de los activos patrimoniales.

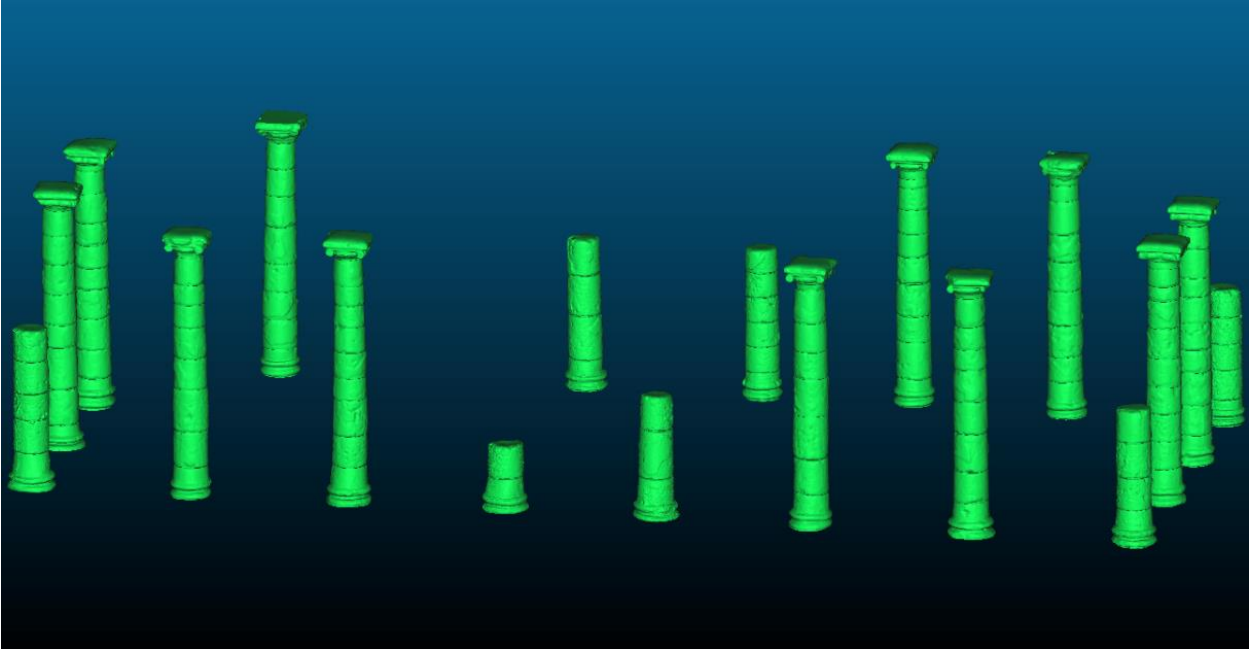
En segundo lugar, se realiza la reconstitución digital (Figura 33) de las columnas en la galería sur de este edificio histórico, incluidas sus basas, fustes, capiteles, arcos y la viga sobre el conjunto, ensamblando el modelo siguiendo la lógica constructiva. En este punto, se completa el procedimiento semiautomático: del mallado de las nubes de puntos, a su conversión en sólidos e importación en la plataforma BIM a través del formato IFC para la constitución del modelo HBIM, al cual podrán acceder los distintos profesionales.



**Figura 33.** Reconstitución digital en el modelo HBIM. Arcos y columnas de la galería sur del Cenador de Carlos V. Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Cabe destacar que, gracias al registro (alineación) de la nube de puntos TLS en la primera fase del procedimiento semiautomático, la posición de cada elemento constructivo extraído de la misma tras el proceso de segmentación está garantizada al importar los archivos IFC, pues su origen es la nube de puntos global del edificio histórico.

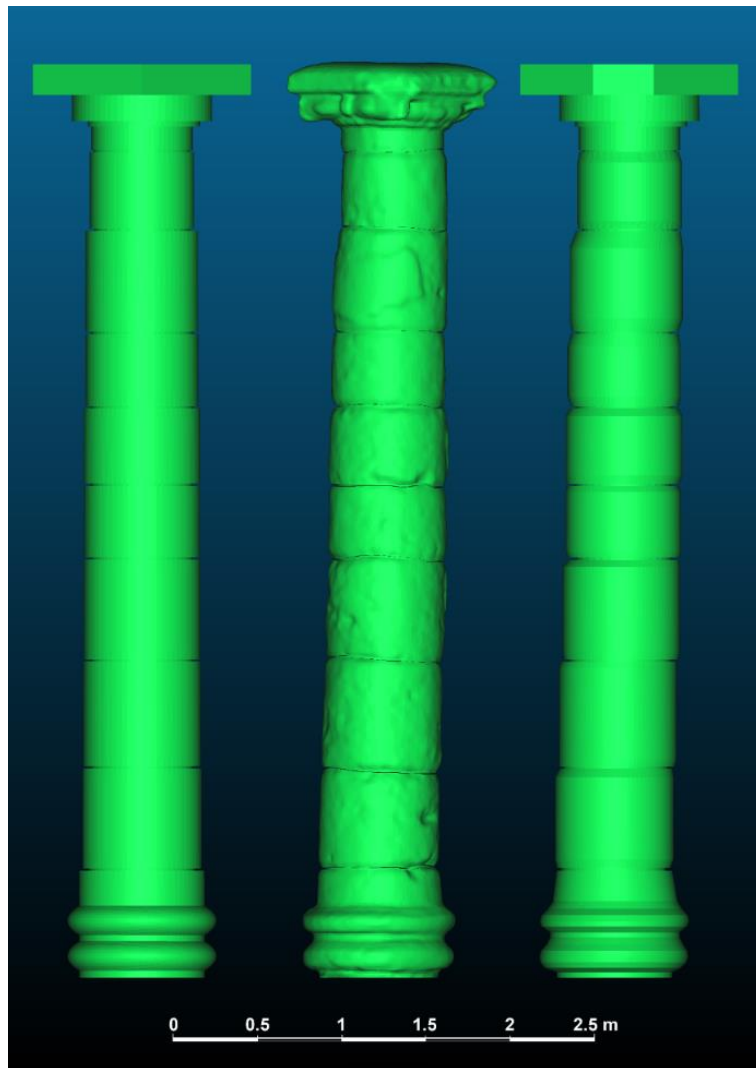
En cuanto a la Basílica de Baelo Claudia, la reconstitución digital *as-built* se muestra en la Figura 34. Las alteraciones geométricas estructurales y superficiales se representan en dicho modelo HBIM, el cual sirve para realizar los análisis precisos que evalúen el estado de conservación de las columnas.



**Figura 34.** Reconstitución digital *as-built* de la Basílica en el Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

El modelado *as-built* supone el enfoque central de esta tesis, pero responder a la pregunta de esta investigación sobre su capacidad para respaldar análisis precisos conlleva reconstruir el caso de estudio mediante otros enfoques de modelado menos precisos, que no contemplen la representación de alteraciones geométricas o que no las lleven a cabo en su totalidad.

La Figura 35 ilustra los tres enfoques de modelado materializados para la columna más desfavorable a nivel estructural, pues sobre ella se desarrollan los análisis estructurales contemplados en esta tesis doctoral. Los tres distintos modelos se han realizado siguiendo los procesos descritos en la subsección 4.2.3. *Reconstitución digital: modelado sólido 3D*. En síntesis: (i) columna *as-built* según el procedimiento semiautomático propuesto para representar las alteraciones geométricas; (ii) modelo simplificado generado mediante transiciones cerradas a partir de secciones dadas por los centroides de las bases de los tambores; y (iii) versión ideal de la columna, modelada por medio de transiciones cerradas, a partir de las curvas promedio de cada tambor, a lo largo del eje vertical ideal.



**Figura 35.** Reconstitución digital de la columna C19: izquierda) modelo ideal; centro) modelo *as-built*; derecha) modelo simplificado. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

## 6.4. Análisis geométrico

### 6.4.1. Desplomes y distorsiones de columnas y tambores

En este apartado se presentan los resultados de 4.2.4. *Análisis geométrico* con respecto al cálculo de desplomes y distorsiones de las columnas de la Basílica de Baelo Claudia y sus tambores. Los resultados del análisis se recogen en la Tabla A1. Desplazamientos y distorsiones en columnas (*Anexo II*).

Una escala de color se aplica conjuntamente a los valores de desplome y distorsión de todas las columnas y tambores, de modo que las mayores desviaciones de sus centroides —alteraciones estructurales de los tambores—, pueden identificarse individualmente y con facilidad en el contexto general de la Basílica. Los resultados de la investigación sobre el estado estructural de los elementos *as-built* revelan la condición de columna más desfavorable de la columna C19, a la que se abordan en esta tesis tanto el análisis de alteraciones geométricas como la evaluación de su comportamiento estructural. Los desplomes globales y parciales de esta columna, sus distorsiones y la distorsión promedio se recogen en las Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 6.** Análisis de desplomes para la columna C19. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Columna	Elemento	Desplome (mm)
C19	1 base	--
	2	17,56
	3	28,19
	4	26,41
	5	12,54
	6	11,70
	7	2,53
	8	25,73
	9	2,33
	10 capitel	--
	Global	109,65

A continuación, se recogen otros resultados cuantitativos obtenidos del análisis geométrico de las columnas de la Basílica (Tabla A1 del *Anexo II*):

- Cuatro de las once columnas con capitel presentan valores de desplomes por encima de 65 mm, mientras que únicamente tres experimentan desplazamientos por debajo de 20 mm.
- Se demuestra el pobre estado de conservación de las columnas C3, C7, C2, C17, C19 y C20 en términos de alteraciones estructurales, de las cuales las últimas cuatro presentan los valores más elevados de desplazamiento en comparación con el modelo ideal: su valor medio conjunto es 85,10 mm.
- El desplome o desplazamiento global de la columna C19 es un 132% más elevado que el desplazamiento promedio (47,26 mm) de las columnas con capitel.

**Tabla 7.** Análisis de distorsiones para la columna C19. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Tambor	Centroide	Distorsión (mm)
	Inferior	1,06
2	Centroide volumen	8,53
	Superior	17,96
	Inferior	18,42
3	Centroide volumen	26,54
	Superior	42,88
	Inferior	43,42
4	Centroide volumen	55,48
	Superior	68,98
	Inferior	69,53
5	Centroide volumen	71,69
	Superior	71,59
	Inferior	71,35
6	Centroide volumen	78,35
	Superior	82,70
	Inferior	81,40
7	Centroide volumen	84,08
	Superior	83,93
	Inferior	85,26
8	Centroide volumen	92,65
	Superior	109,86
	Inferior	111,10
9	Centroide volumen	113,37
	Superior	108,82
---	Promedio	66,62

Los resultados del análisis de excentricidad de tambores —distorsión de los tambores en relación a los tambores situados debajo— se proporcionan en la Tabla 8.

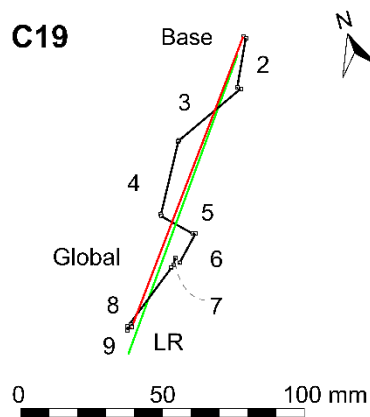
**Tabla 8.** Análisis de excentricidad para la columna C19. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Tambor	Elemento	Distorsión debajo (mm)
2	Centroide volumen	14,28
3	Centroide volumen	19,30
4	Centroide volumen	29,24
5	Centroide volumen	19,00
6	Centroide volumen	7,81
7	Centroide volumen	5,85
8	Centroide volumen	10,80
9	Centroide volumen	23,91
---	Promedio	16,27

En relación a las distorsiones, las columnas C2, C17, C19 y C20 experimentan un desplazamiento promedio de 46,97 mm. En cuanto a la columna C19, el valor que presenta frente al eje ideal vertical es 235% mayor que la distorsión promedio de todas las columnas (19,92 mm), y la distorsión con respecto a los tambores que se encuentran por debajo es un 80% más elevada que la media (9,06 mm). Por lo tanto,

como se aprecia a lo largo de esta investigación y en la Tabla A1, C19 es la columna más desfavorable y, por ende, constituye una muestra adecuada para el análisis estructural.

Por otra parte, una vista en planta de las columnas *as-built* completas —aquellas con capitel (véanse las Figura 20 y Figura 34 a fin de indentificarlas)— permite el análisis de desplomes. La inclinación de las columnas *as-built* se calcula con respecto al eje vertical ideal. Los centroides considerados para el cálculo de los desplazamientos entre centroides de tambor se muestran como números en la Figura 36, partiendo de la cara superior de la basa de la columna (*base*), hasta la base inferior del capitel (9). La línea roja muestra el desplome global de la columna, mientras que las líneas negras entre números muestran los desplomes y distorsiones parciales entre tambores.



**Figura 36.** Representación de desplomes en planta para la columna C19. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

La representación de los desplomes de todas las columnas *as-built* completas y sus tambores, como se muestra en la figura anterior, se recopilan en la Figura A1. Desplazamientos de centroides (*Anexo II*).

Seleccionando todos los centroides de las bases, es posible calcular la regresión lineal gráfica (segmento verde "LR" en la Figura 36) a partir de ellos en Rhinoceros. Esto proporciona una visión aproximada de la dirección de la inclinación de la columna. Sobre esta base, de acuerdo con la orientación del sitio arqueológico dada por Fincker *et al.* (2010), el azimut de la inclinación global de las columnas con capitel se puede calcular tomando la dirección sur como referencia. Esto se muestra en la Tabla 9.

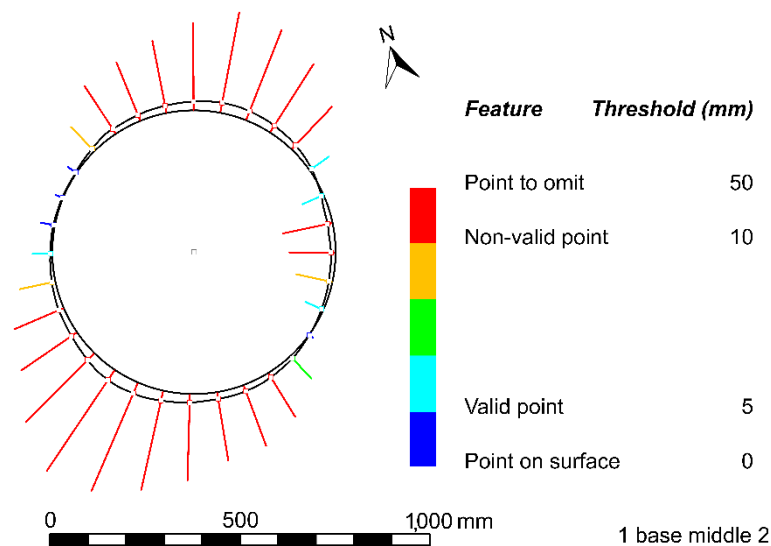
**Tabla 9.** Orientación de inclinación de las columnas con capitel. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Columna	Orientación	Azimut (desde el sur) (°)	Desplome global (mm)
2	Suroeste	-26,99	71,94
3	Suroeste	-7,75	38,54
6	Sureste	14,99	20,11
7	Suroeste	-21,24	45,22
9	Sureste	44,80	19,89
10	Sureste	62,40	25,22
12	Suroeste	-43,54	17,25
13	Sureste	58,00	13,18
17	Sureste	41,49	66,64
19	Suroeste	-39,64	109,65
20	Suroeste	-37,14	92,18

Es preciso destacar que todas las columnas están inclinadas hacia la costa, con 6 de ellas concretamente hacia el suroeste, mientras que las otras 5 muestran un desplome hacia el sureste.

#### 6.4.2. Alteraciones geométricas superficiales

En cuanto a las deformaciones que presentan los tambores, en sentido no estructural, se muestran a continuación los resultados del análisis de *Alteraciones geométricas superficiales en tambores* (Figura 37).



**Figura 37.** Análisis de deformaciones en la sección media superior de la base de la columna C19. Fuente: (Antón et al., 2019).

La extensión de la escala de color en la figura depende de los valores límites a establecer en función de los criterios de los especialistas. En esta investigación, considerando el diámetro de las columnas, los valores promedio y mediana, así como la desviación estándar obtenida del análisis de deformaciones en Rhinoceros, dichos límites han sido establecidos en 5 y 10 mm para los puntos válidos y no válidos, respectivamente, en las secciones *as-built*. Los puntos con desviaciones superiores a 50 mm se omiten en este análisis. En la Tabla 10 se recogen los datos estadísticos del análisis de los puntos de las secciones reales en relación a las curvas ideales (análisis de deformación) de la columna C19, incluyendo la basa y excluyendo el capitel.

**Tabla 10.** Análisis de desviaciones de puntos en secciones *as-built* e ideales de tambores para la columna C19.  
Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Tambor	Sección	Distancia mínima (mm)	Distancia máxima (mm)	Puntos sobre superficie (units)	Puntos bajo superficie (units)	Distancia media (mm)	Distancia mediana (mm)	Desviación estándar (mm)
1.Basa	Baja	-15,57	13,42	18	14	7,03	6,46	4,06
	Media 1	-14,68	33,20	27	5	14,85	14,60	8,77
	Media 2	-36,19	29,21	17	15	12,69	12,23	7,77
	Alta	-23,75	10,96	8	24	11,38	12,42	7,22
2	Baja	-2,60	10,18	24	8	4,68	4,77	2,95
	Media	-28,07	7,40	17	15	4,35	3,46	4,98
	Alta	-13,47	7,98	12	20	4,78	4,12	2,83
3	Baja	-7,54	9,36	19	13	3,64	3,01	2,54
	Media	-7,70	10,30	15	17	3,10	2,41	2,50
	Alta	-11,56	16,22	14	18	4,55	3,08	4,00
4	Baja	-11,59	16,42	21	11	6,73	5,94	4,77
	Media	-8,93	14,74	18	14	4,95	4,16	3,26
	Alta	-10,70	20,01	20	12	5,95	5,28	5,00
5	Baja	-7,45	10,38	23	9	4,33	4,11	3,28
	Media	-12,13	8,48	14	18	3,83	3,16	2,42
	Alta	-10,36	6,48	11	21	3,89	3,67	2,91
6	Baja	-6,15	16,75	21	11	4,30	2,92	3,64
	Media	-4,64	16,90	18	14	2,94	1,38	4,06
	Alta	-6,33	16,40	9	23	3,19	2,36	3,37
7	Baja	-10,84	11,46	18	14	4,32	4,10	3,00
	Media	-9,41	9,09	20	12	4,66	4,92	2,42
	Alta	-11,56	7,28	14	18	4,59	4,21	3,12
8	Baja	-15,72	20,83	13	19	8,26	5,52	6,28
	Media	-13,97	14,15	19	13	6,56	6,57	3,75
	Alta	-15,87	18,84	7	25	7,73	6,71	4,78
9	Baja	-6,51	8,77	14	18	2,68	1,64	2,49
	Media	-5,59	10,53	14	18	4,08	3,05	2,94
	Alta	-9,70	10,31	10	22	5,15	5,14	2,75

El análisis realizado, junto con las escalas de color que dependen de los valores a los que acompañan, indican las alteraciones geométricas específicas de los tambores de una manera intuitiva. Aquí, la desviación estándar en mm explica la medida tradicional de dispersión de los puntos en relación con las secciones de tambor ideal (Figura 37). De acuerdo con los resultados de la Tabla 10, considerando la distancia media y la desviación estándar, así como la distancia mínima y máxima de las secciones ideales, tanto las secciones medias como la superior de la basa de la columna C19 son las áreas con mayores alteraciones en su superficie / forma, especialmente en sus caras norte y sur.

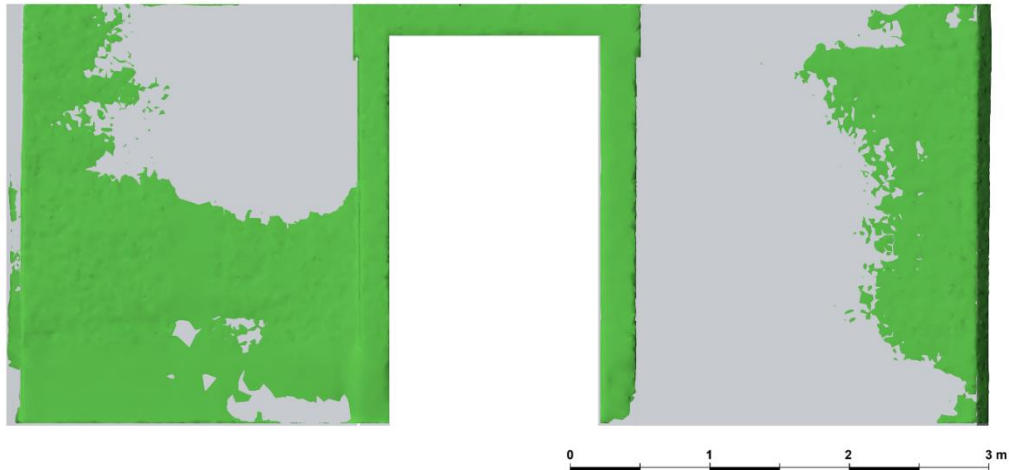
Finalmente, el área de las mallas 3D y de sus triángulos promedio, así como el volumen de los tambores, se calculan y recopilan en la Tabla A2. Superficie y volumen de columnas (*Anexo II*).



### 6.4.3. Distribución de alteraciones geométricas

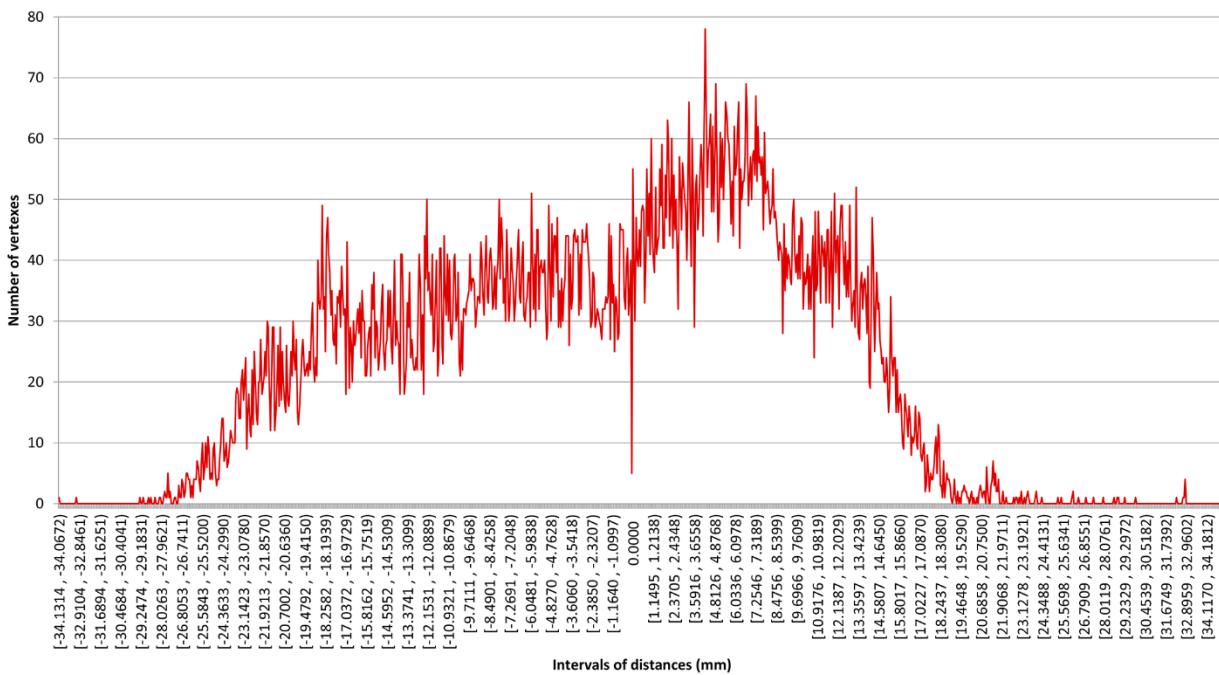
Se presenta aquí la comparativa de las alteraciones geométricas superficiales entre los modelos *as-built* e ideal del muro sur del Cenador de Carlos V.

La Figura 38 muestra la comparativa a nivel cualitativo.



**Figura 38.** Superposición de malla *as-built* y modelo ideal de la fachada sur. Fuente: propia.

En cuanto al análisis cuantitativo, se estudia la distribución de los puntos correspondientes a las alteraciones geométricas del modelo *as-built*. De igual manera que para la validación del proceso de mallado, empleando CloudCompare es posible establecer intervalos de distancias para los puntos de ambos objetos 3D. El siguiente gráfico (Figura 39) muestra la desviación de los puntos para cada intervalo.



**Figura 39.** Gráfico de desviaciones de puntos entre malla real y nube de puntos ideal en fachada sur. Fuente: (Niето-Julіán *et al.*, 2019).

Cabe mencionar que no es posible enumerar todos los intervalos de distancias calculados, dado el reducido espacio en el gráfico. Por ende, aparecerán reflejados en un número proporcional al espacio disponible. Entre los 1.082 intervalos se incluye el valor cero, que representa la igualdad de coordenadas entre los puntos de la malla real y la nube de puntos ideal; es decir, el intervalo en el que la distancia entre puntos es nula. Esto ha requerido interpolar el valor de distancia cero en el intervalo que comienza con un valor negativo y termina en positivo. El cálculo del número de puntos correspondientes al valor cero se ha extraído del histograma producido por CloudCompare para una cantidad de intervalos dada. Se han establecido 5.000 intervalos, pues cuanto mayor sea este número, de forma más precisa se pueden acotar los puntos más próximos al cero.

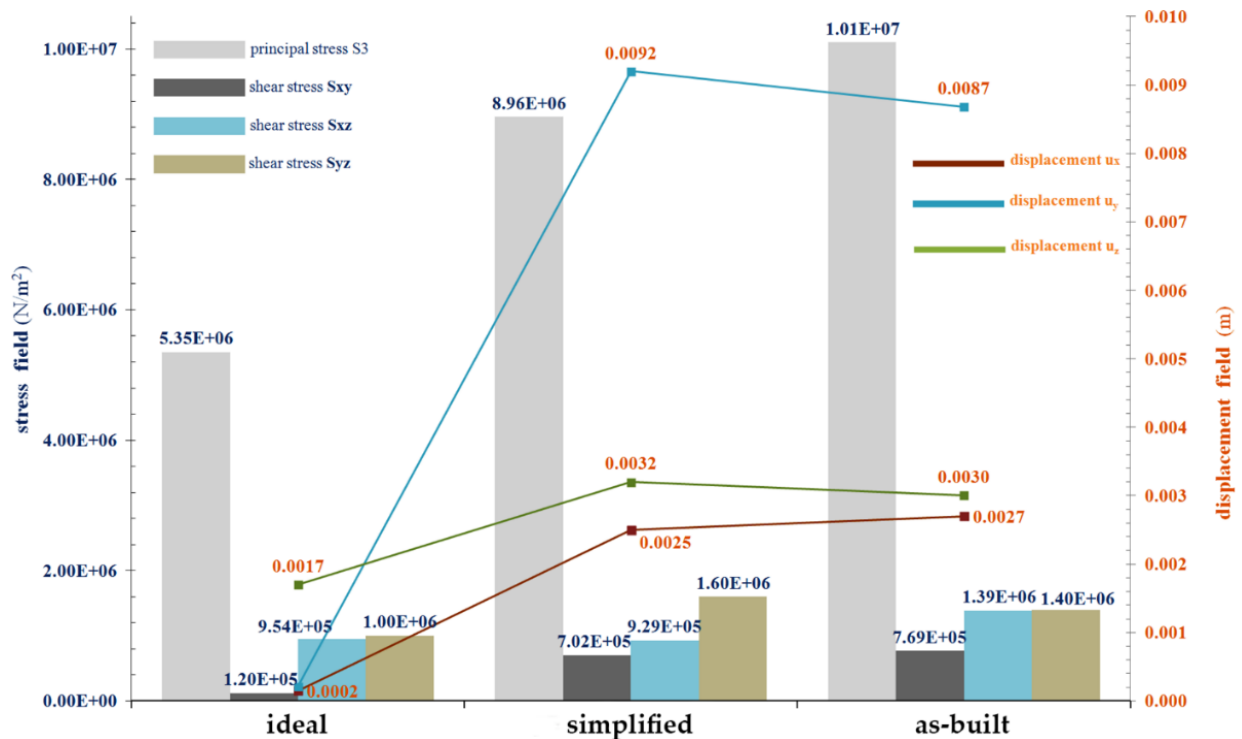
La desviación estándar calculada para esta distribución de puntos ha sido de 19,47. Esto, sumado al reducido número de puntos en el valor cero del gráfico —tan solo 55 puntos—, evidencia la gran diferencia en la geometría de ambos objetos 3D. Según Antón *et al.*, (2018), la desviación entre objetos similares tiene dos características principales: 1) alta presencia de puntos en el valor cero con respecto al resto de intervalos —cuantos más puntos existan en ese valor, mayor semejanza existe entre los objetos comparados—; 2) elevada desviación estándar, lo cual revela una gran dispersión de los puntos en el conjunto de los intervalos. La causa del incremento de la desviación estándar es la escasez o casi inexistencia de puntos en los numerosos intervalos de distancias, mientras que la mayor parte de los puntos se encuentra en el valor cero; es decir, esos puntos son coincidentes entre ambos objetos 3D.

Finalmente, realizando la media aritmética del intervalo más alejado del valor cero, que no aparece en la Figura 39 por los motivos expuestos previamente, es posible obtener la distancia máxima aproximada entre puntos de la malla real y la nube de puntos ideal. El valor obtenido para el paramento exterior del muro sur es de 35,24 mm, lo que supone un 0,055 % del espesor del muro.

## 6.5. Evaluación del comportamiento estructural

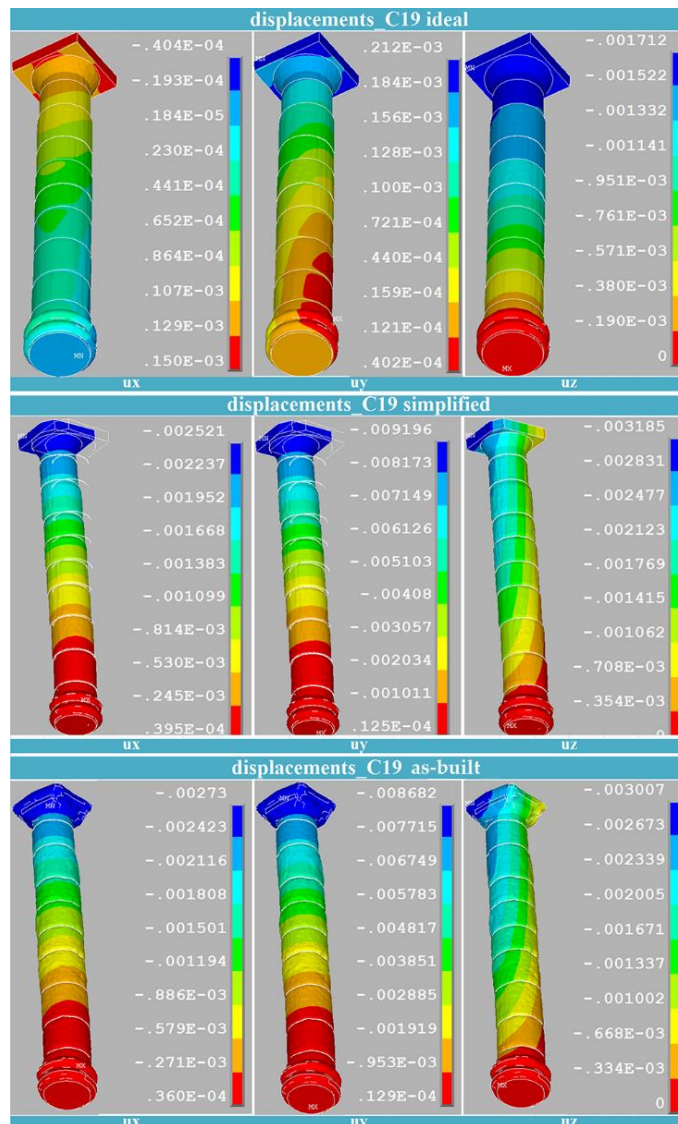
Del análisis numérico de los distintos enfoques de modelado de la columna más desfavorable, la Figura 40 resume los principales resultados de los análisis estáticos, proporcionando los valores máximos de los campos de tensión y desplazamiento. Esos resultados son esenciales para:

1. Evaluar la respuesta estructural, determinando las áreas que son propensas a sufrir un colapso local o global;
2. Identificar las direcciones estructurales más fuertes y más débiles.
3. Determinar el umbral de confianza de cada modelo numérico en términos de factor de cumplimiento.



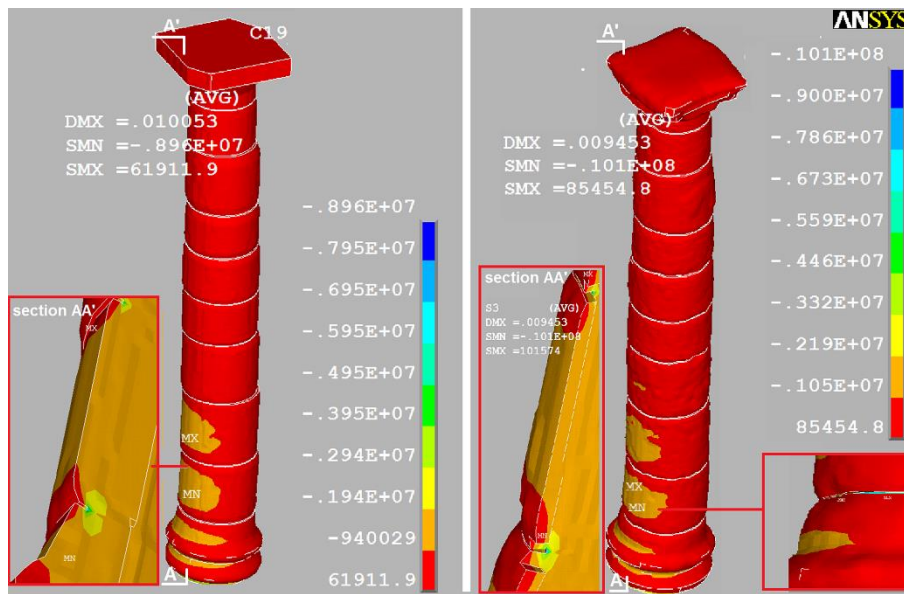
**Figura 40.** Tensiones máximas (S3 principal y cortante (Sxy, Sxz, Syz)) y desplazamientos ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ). Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

En el campo de desplazamiento (Figura 41), la inclinación de la columna, que se tiene en cuenta en los modelos *as-built* y simplificado, causa las principales diferencias. En el modelo ideal, el desplazamiento máximo está en el eje vertical (0,0017 m  $u_z$ ), pero en los modelos simplificado y *as-built* los valores más altos se encuentran en el eje horizontal y (0,0092 m y 0,0082 m, respectivamente). Cabe señalar que las diferencias entre los modelos simplificado y *as-built* son más relevantes en el campo de tensión que en el campo de desplazamiento (8% de disminución de  $u_x$ , 6% de disminución de  $u_y$  y 6% de disminución de  $u_z$ , considerando el modelo simplificado como referencia).



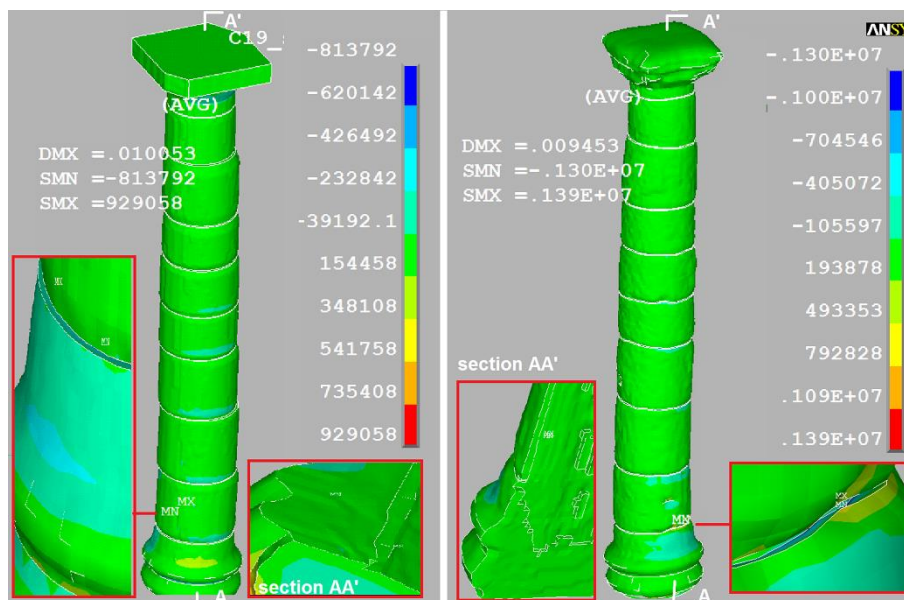
**Figura 41.** Distribución de desplazamientos (m): arriba) modelo ideal; centro) modelo simplificado; abajo) modelo *as-built*. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

De los resultados numéricos estáticos, se puede observar que, aunque los niveles de compresión máximos se alcanzan en el área de la basa, como se esperaba, la distribución de tensión y los valores son diferentes (Figura 42). Obviamente, la inclinación de la columna produce variaciones significativas entre el modelo ideal (el nivel máximo de compresión,  $0,535 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ , se alcanza en la basa), y los modelos *as-built* y simplificado (los niveles máximos,  $0,101 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  y  $0,896 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  se ubican en las juntas). La inclinación también tiene un fuerte efecto en las distribuciones de tensiones, siendo más desfavorables las correspondientes a los modelos *as-built* y simplificado. Centrándose en los modelos FEM antes mencionados, aunque las distribuciones de las tensiones principales S3 son casi iguales, el modelo *as-built* muestra valores más altos que el simplificado (13% de aumento en el S3 máximo).



**Figura 42.** Distribución S3 de tensión principal (N/m<sup>2</sup>): izquierda) modelo simplificado; derecha) modelo *as-built*. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Respecto a las tensiones de cortante, se obtienen diferencias significativas.  $S_{yz}$  proporciona los valores máximos, que son bastante similares para los modelos más realistas ( $1,6 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> para el modelo simplificado y  $1,4 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> en el *as-built*). Sin embargo, el resultado más notable es la variación de  $S_{xz}$  entre el modelo simplificado y el modelo *as-built* (un aumento del 50% en el modelo *as-built*, como se muestra en la Figura 43). Esa variación podría ser altamente significativa, en términos de cumplimiento de seguridad, bajo carga dinámica.



**Figura 43.** Distribución  $S_{xz}$  de tensión de cortante (N/m<sup>2</sup>): izquierda) modelo simplificado; derecha) modelo *as-built*. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Al centrarse en los resultados del análisis modal, los valores de los períodos principales son bastante similares, como se muestra en la Tabla 11. Ni la degradación de la rigidez (debido a la falta de material), ni las imperfecciones geométricas (inclinaciones y distorsiones) han provocado un incremento de período significativo. De hecho, en el primer modo, el período del modelo *as-built* es casi igual al correspondiente del ideal (solo un aumento del 0,79%).

**Tabla 11.** Resultados modales: períodos principales. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Modo nº	Período T (s)		
	Ideal	Simplificado	<i>As-built</i>
1	1,01390	1,02190	1,02350
2	1,01290	1,02060	1,01420
3	0,18056	0,18888	0,18261
4	0,18033	0,18846	0,18020
5	0,11966	0,11905	0,11822
6	0,07204	0,07268	0,07230
7	0,07063	0,07207	0,07054
8	0,07051	0,07161	0,06967
9	0,04297	0,04302	0,04269
10	0,03989	0,04060	0,03962
11	0,03973	0,04023	0,03928
12	0,02649	0,02697	0,02625
13	0,02635	0,02666	0,02608
14	0,02516	0,02546	0,02523
15	0,02500	0,02532	0,02469
16	0,01943	0,01978	0,01919
17	0,01931	0,01947	0,01907
18	0,01728	0,01747	0,01706
19	0,01544	0,01558	0,01529
20	0,01520	0,01541	0,01491

Las masas efectivas se proporcionan en la Tabla 12. Estos valores de masa permiten distinguir entre las formas modales más significativas, que son aquellas con la mayor contribución de masa. La diferencia más notable entre los valores, es que, como se esperaba, la inclinación conduce a una redistribución efectiva de masa mínima entre los ejes horizontales *x* e *y*, siendo los modos 1 y 2 los más relevantes. Vale la pena señalar que, a pesar de las diferencias en la distribución del eje, la respuesta estructural que se puede asumir a partir de esos resultados es casi equivalente. Además, esos resultados coinciden perfectamente con el comportamiento esperado de las características geométricas de los modelos, ya que la forma modal describe la configuración a la que la columna se desplazará naturalmente. En los tres modelos, las primeras cuatro formas modales proporcionan la mayor contribución de masa en las direcciones *x* e *y*. En la dirección vertical, el valor más alto se obtiene en el modo 14.

**Tabla 12.** Resultados modales: masas efectivas. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Masas efectivas Meff (%)									
Modo n <sup>o</sup>	Ideal			Simplificado			As-built		
	Dirección x	Dirección y	Dirección z	Dirección x	Dirección y	Dirección z	Dirección x	Dirección y	Dirección z
1	13,26	42,31	0,00	52,75	2,73	0,01	47,14	9,13	0,00
2	42,32	13,25	0,00	2,74	52,72	0,03	9,12	47,04	0,03
3	0,03	19,21	0,00	15,76	3,77	0,02	16,26	2,98	0,00
4	19,21	0,03	0,00	3,79	15,74	0,02	2,96	16,36	0,04
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
6	0,01	0,03	75,47	0,04	1,12	68,54	0,08	0,85	70,57
7	0,30	7,30	0,23	4,87	2,61	0,52	6,85	0,47	3,02
8	7,32	0,29	0,13	2,77	4,01	6,45	0,67	6,41	2,59
9	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,06	0,01	0,00
10	0,03	4,38	0,00	2,54	1,98	0,02	3,16	1,24	0,01
11	4,41	0,03	0,00	1,97	2,51	0,04	1,27	3,19	0,02
12	0,01	2,94	0,02	1,42	1,47	0,06	2,57	0,30	0,13
13	2,95	0,01	0,02	1,42	1,44	0,36	0,30	2,59	0,10
14	0,00	0,01	9,72	0,07	0,01	9,98	0,03	0,02	9,70
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
16	0,01	2,12	0,00	1,04	1,12	0,02	1,82	0,28	0,01
17	2,12	0,01	0,00	1,13	1,05	0,02	0,27	1,79	0,01
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,02	0,08	3,85	0,31	0,04	2,98	0,04	0,02	3,92
20	0,04	1,40	0,17	0,38	0,76	0,65	1,33	0,09	0,06

Las formas modales se proporcionan en la Figura 44. En esas formas, la suma de las masas modales efectivas es mayor que el 90% de la masa total de la columna. Los modos 1, 2 y 4 incluyen flexión global, y los modos que muestran la respuesta torsional no son representativos (por ejemplo, alrededor del 0,01% de la contribución de masa efectiva en el modo 15). La tercera forma modal proporciona deformaciones significativas fuera del plano. Las formas modales 6 y 14 proporcionan flexión y traslación en la dirección vertical. Las formas más representativas se caracterizan por un alto comportamiento monolítico global entre los tambores y el capitel, y la mayor rigidez se encuentra en el área de la basa. Vale la pena señalar que a frecuencias más altas (por ejemplo, el modo 16), el capitel parece ser vulnerable, pero en esos casos la contribución de la masa es bastante baja.

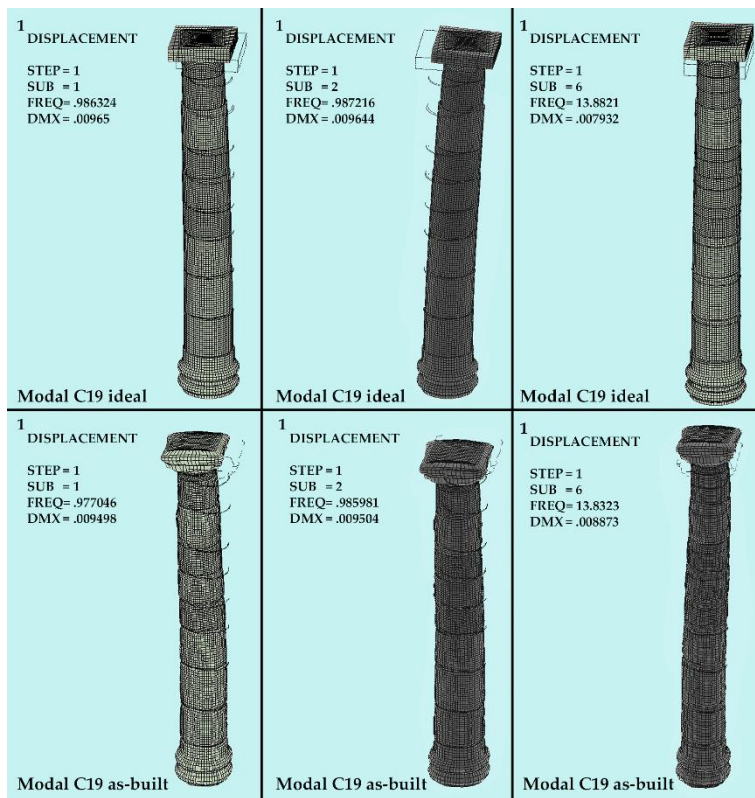


Figura 44. Formas modales: arriba) modelo ideal; abajo) modelo *as-built*. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Finalmente, la Figura 45 muestra las variaciones máximas de tensión y desplazamiento, siendo el modelo simplificado la referencia.

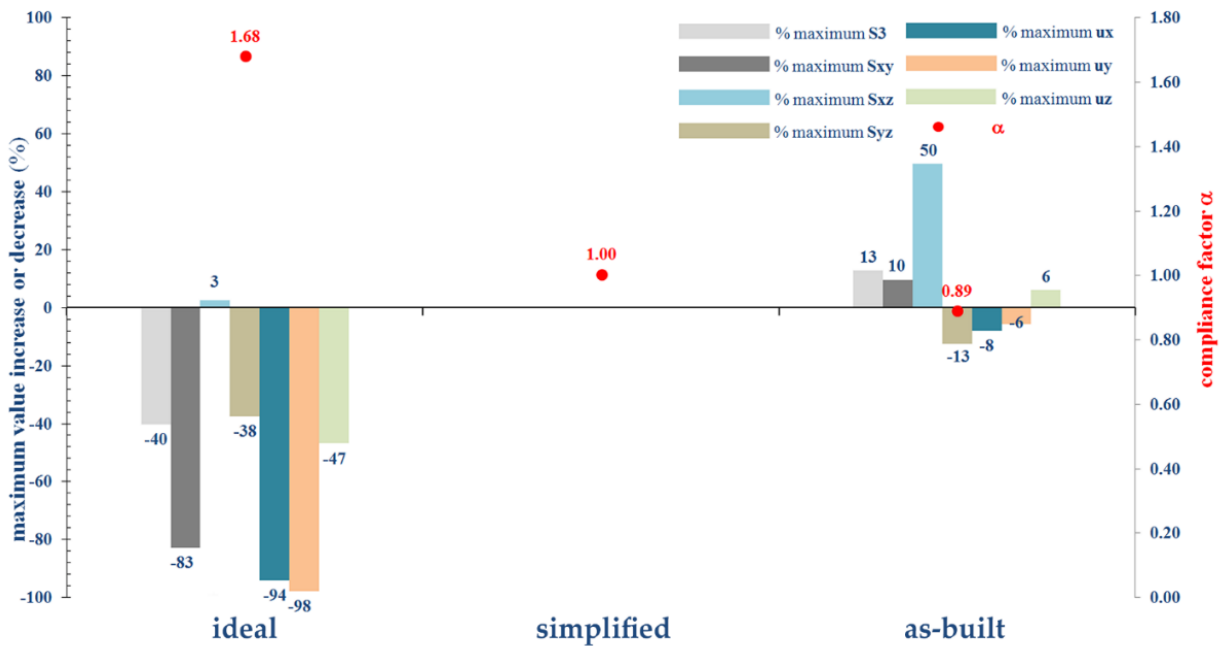


Figura 45. Factor de cumplimiento (estado límite último axial), y variación máxima de tensión-desplazamiento (modelo simplificado frente a modelos ideal y *as-built*). Fuente: (Antón *et al.*, 2019).



Esta figura también muestra los valores de los factores de cumplimiento en términos del estado límite último. Los valores de  $\alpha$  de los modelos ideal y simplificado son satisfactorios (1,68 y 1, respectivamente). Sin embargo, el valor del modelo *as-built* (0.89) está por debajo del nivel de confianza. Vale la pena señalar que, en un marco estructural, el factor de cumplimiento es un elemento clave para determinar si se requieren trabajos de refuerzo o reparación. De hecho, ese valor mide hasta qué nivel se cumplen los requisitos de seguridad. Como se mencionó anteriormente, para los modelos simplificado e ideal, los requisitos de seguridad se cumplen completamente. No obstante, en cuanto al modelo *as-built*, para el cual el factor de cumplimiento es inferior a uno, los requisitos de seguridad se cumplen solo parcialmente. En ese caso, la decisión de aplicar medidas de refuerzo o reparación depende de criterios basados en el riesgo.



## 7. Discusión

Primeramente, cabe destacar la búsqueda exhaustiva de *software* disponible para las etapas de mallado 3D y modelado sólido del procedimiento automático propuesto en esta tesis doctoral. Estudiar la idoneidad de los programas y algoritmos incluye evaluar su funcionalidad e interoperabilidad, pues que sean efectivos para tales tareas y que cuenten con formatos de archivo comunes entre sí, respectivamente, supone la diferencia en la elección entre una u otra herramienta. El *software* comercial es, por lo general, suficientemente abierto para aceptar archivos de distintas aplicaciones, pero existen ciertas restricciones de formatos que han de tenerse en cuenta. Tras las distintas etapas que han llevado a completar esta tesis, se puede concluir con que se ha encontrado un flujo de trabajo que garantiza la precisión y la interoperabilidad entre herramientas para los objetivos propuestos.

En esta tesis, con anterioridad a la reconstitución virtual del patrimonio analizado en modelos HBIM *as-built*, se aborda el importante problema de las deformaciones de las mallas 3D, que se producen durante el proceso de mallado de las nubes de puntos. Los resultados de la comparación entre mallas utilizando diferentes programas muestran lo siguiente:

- Teniendo en cuenta el formato de archivo STL para modelos 3D, los resultados de esta comparativa (véanse Tabla 2 y Tabla 4) revelan una reducción por debajo del 1% en el número de vértices, caras y la superficie de las mallas en Rhinoceros con respecto a las mallas OS originales a través de Artec Studio. No obstante, un número mayor de casos podría proporcionar un porcentaje más preciso.
- Aunque la disminución en el número de vértices y caras en el formato del archivo STL parece concluir que es ligeramente menos fiable en relación con la preservación de la geometría, el uso extensivo de STL y su compatibilidad entre diferentes programas pueden llevar a considerar este formato en lugar de otros. Sin embargo, en esta investigación, no solo se ha empleado el formato de archivo PLY debido a su geometría invariable, sino porque también conlleva un reducido tamaño de archivo. Este hecho es extremadamente importante en el tiempo de procesado y el uso de la memoria al realizar operaciones con los objetos 3D.
- Los formatos de archivo PLY, OBJ, FBX, 3DM y 3DS mantienen las mismas características en las mallas.
- Se puede apreciar que el número de caras aproximadamente duplica el número de vértices en todos los casos.
- Además, el área de las mallas permanece constante con cada aplicación (Artec Studio y Rhinoceros, respectivamente), independientemente del formato de archivo considerado.
- La desviación estándar ( $\sigma$ ) del formato STL es ligeramente inferior cuando se malla usando el *plugin* de Rhinoceros, ya que las mallas guardan inferior semejanza en este caso; es decir, más vértices en la malla comparada se han desplazado de sus vértices equivalentes en la malla de referencia en el proceso de mallado cuando se usa este *software*.

Por otro lado, la complejidad geométrica de la superficie de la muestra de piedra en la validación del proceso de mallado puede ser determinante en la diferencia significativa entre la prueba realizada en sus mallas y las correspondientes a la muestra del capitel, que presenta una geometría más regular. La similitud entre las mallas del capitel de la columna es claramente mayor que en el caso de la porción de superficie de piedra. La razón de esto es que los valores de  $\sigma$  aumentan en el capitel, lo que a su vez

significa que se encuentra un menor número de puntos en distancias por encima y por debajo del valor central (cero).

Después de analizar los resultados del estudio comparativo y de considerar la escasa diferencia en la preservación de la geometría entre estas aplicaciones (Artec Studio y Rhinoceros) para los elementos constructivos (por debajo del 1%), se puede afirmar que ambas son adecuadas para desarrollar la propuesta de modelado HBIM *as-built* de esta tesis para el Cenador de Carlos V.

Por su parte, el tiempo de procesado también debe ser objeto de discusión. Dado que las tareas manuales como la segmentación de la nube de puntos, el cepillado (en caso de ser necesario), la conversión de archivos y la implementación en BIM dependen de las habilidades del usuario, cabe especificar el tiempo empleado para realizar procesos automáticos en una nube de puntos de muestra:

- Mallado: con 1.341.953 vértices y 2.683.629 polígonos, el *plug-in* Mesh Flow de Rhinoceros necesitó 4 minutos y 5 segundos para completar el proceso desde la nube de puntos original.
- Subsanación de huecos en mallas 3D: Artec Studio rellenó 28 huecos en 5 segundos, para lo que creó 780 y 1,869 nuevos vértices y polígonos, respectivamente.
- Simplificación de mallas 3D: 6 minutos y 22 segundos fue el tiempo que Artec Studio necesitó para simplificar significativamente la malla cerrada con 1.342.733 vértices y 2.685.498 polígonos para obtener una nueva malla con 99.984 puntos y 200.000 caras.
- Conversión a objetos sólidos NURBS: el proceso para convertir la anterior malla cerrada simplificada en polisuperficies cerradas con Rhinoceros duró 12 segundos.

La duración de estas tareas automáticas depende de los múltiples factores de la malla 3D (es decir, el tamaño del archivo y el número original y preferido de puntos y vértices) y el *hardware*. El sistema utilizado para esta investigación fue un ordenador portátil promedio cuyas especificaciones técnicas se especifican en el *Anexo II*. Por lo tanto, se puede afirmar que esta propuesta no necesita *hardware* potente para llevarse a cabo.

Con respecto al proceso de escaneado, la idoneidad del equipo debe evaluarse en lo que respecta a la precisión y el coste, dependiendo de los requisitos del proyecto. Además, el proceso debe ser perfectamente planificado por los técnicos a cargo para evitar la ausencia de datos 3D en determinadas partes del objeto. El escáner debe colocarse en diferentes posiciones para capturar volúmenes en lugar de superficies cuando sea posible, evitando así oclusiones del láser en la nube de puntos.

Por su parte, mediante la metodología de esta tesis doctoral, es posible registrar en los modelos HBIM patologías como signos de desplome en muros, flexiones de vigas, falta de verticalidad de las columnas, entre otras. Como se muestra en la Figura 46, la hoja de acanto de la cara noroeste del capitel de una columna corintia del Cenador está dañada y, por lo tanto, se registra en el modelo HBIM *as-built*.



**Figura 46.** Defecto en el capitel de columna 5 (ID en el proyecto HBIM: *Capitel\_5*). Fuente: (Antón *et al.*, 2018).

Aunque el nivel de detalle (original o simplificado según las necesidades del proyecto) debe tomarse en consideración, las patologías y singularidades de un edificio histórico se pueden registrar en el modelo. En este sentido, los resultados del análisis de la distribución de alteraciones geométricas en la fachada sur del Cenador de Carlos V, especialmente los relativos a la dispersión de los puntos (desviación estándar), reflejan la escasa semejanza del modelo *as-built* con respecto a la versión ideal, lo cual demuestra la importancia de representar el estado real de conservación de los activos patrimoniales. Esta desviación estándar calculada es significativamente más baja que la obtenida del análisis cuantitativo para la validación del proceso de mallado, tanto para el Cenador como para las columnas de la Basílica de Baelo Claudia. De los gráficos de desviaciones de ambos casos —análisis de distribución de alteraciones geométricas en el Cenador (apartado 6.4.3.) y validación del proceso de mallado (apartado 5.1.2.)— se observa la gran diferencia en la distribución de puntos con respecto a los intervalos de distancias, pues en el primer caso (Figura 39) no se observa la tendencia de contar con la mayoría de los puntos en el valor cero, como sí sucede en la validación del mallado. El motivo por el cual esto sucede es que para la validación del mallado se computan distancias entre mallas que derivan de otras mallas, o de la nube de puntos original, a diferencia de este análisis de distribución de alteraciones geométricas en la fachada sur, que compara la malla *as-built* con un paramento perfectamente vertical, carente de cualquier patología.

Esta investigación propone un procedimiento aplicado al patrimonio arquitectónico. Sin embargo, la reconstrucción en 3D también puede cumplir los objetivos de las investigaciones arqueológicas, como se ha demostrado tanto con las mallas 3D de muestra de la superficie de piedra analizada como con el caso de estudio de la Basílica de Baelo Claudia. Ciertamente, el levantamiento 3D en el caso de la Cueva de las Ventanas no producirá volúmenes cerrados sino superficies que definen el espacio, pero se podrían realizar operaciones booleanas para obtener modelos sólidos a partir de las nubes de puntos.

En cuanto a las columnas de la Basílica, cabe mostrar y discutir las precisiones y errores logrados en el escaneado tridimensional mediante TLS y en las etapas de mallado y modelado (véanse Tabla 13 y Tabla 14).

**Tabla 13.** Errores y precisiones en el escaneado 3D. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Escaneado 3D			Registro de nubes de puntos		
Error del rayo láser a 3.5 m (mm)	Error de inclinación (°)	Precisión a 10 m (mm)	Error de conjunto (mm)	Fuerza de enlaces entre estaciones (%)	Solape (%)
0,60	0,0385	4	6	81	54

La calidad del modelado de columnas está directamente relacionada con la idoneidad de la tecnología de detección remota (TLS). En este caso, el escáner láser Leica BLK360 demuestra ser válido para ese propósito, especialmente considerando los reducidos errores y la alta precisión lograda en el escaneado 3D. La resolución y la precisión del escáner se toman de las especificaciones técnicas, y los datos de registro se derivan del informe de escaneado. La nube de puntos producida consiste en un total de aproximadamente 56 millones de puntos después del proceso de segmentación de las columnas. El error del rayo láser se calcula como la desviación estándar de los puntos de muestra extraídos de la nube de puntos de la Basílica. Con respecto al error de inclinación (precisión de nivelación), tanto el sensor de inclinación del escáner láser como el registro de nube a nube minimizan los errores en la creación de un sistema de coordenadas sin puntos de control. El error de inclinación se ha calculado comparando la pendiente de un plano de tres puntos de control registrados utilizando GNSS (receptor Leica GS18 y registrador de datos Leica CS20) y el plano de esos tres puntos ubicados en una nube de puntos de muestra obtenida usando el escáner BLK360. La precisión de inclinación obtenida (0,0385° o 2'18,5") permite calcular las alteraciones estructurales de la Basílica.

**Tabla 14.** Precisiones y características del mallado 3D. Fuente: (Antón *et al.*, 2019).

Ajuste a las nubes de puntos		Simplificación de mallas		
<i>Octree Depth</i> (nivel)	Precisión (desviación estándar) (puntos)	Mínimo total de caras por tambor (unidades)	Superficie promedio de cara (mm <sup>2</sup> )	Precisión (desviación estándar) (puntos)
9	4.432,06	20.000	33,28	239,84

Con respecto al mallado 3D de la nube de puntos, la profundidad de *Octree* seleccionada (nivel 9) proporciona una mayor precisión (considerada como desviación estándar) o ajuste a la nube de puntos original en comparación con otros niveles y un alto número de triángulos en los tambores, lo que permite representar las deformaciones de superficiales de forma detallada. Aparte de la diferencia existente en cuanto a las características geométricas de las mallas 3D en la validación del proceso de mallado (Tabla 5), la mayor desviación estándar de la malla 2 (nivel 9 simplificado) en comparación con la malla 0 (nivel 8) revela que es más conveniente, en términos de preservación de la geometría, llevar a cabo la simplificación de las mallas (pura reducción del número de triángulos) que aumentar el suavizado de las mismas (peor ajuste de la nube de puntos a través de la reducción del nivel de *Octree*). Esto se puede observar en los resultados de la validación del proceso de mallado (apartado 6.2.2), donde se analiza la diferencia entre los gráficos de desviación de nube de puntos a malla (Figura 29) y malla a malla (Figura 30). Existe una mayor cantidad de puntos en los intervalos que rodean el valor cero en el mallado de nubes de puntos (malla 1 a partir de la nube de puntos original, en la Figura 29) que en los de la simplificación de mallas (malla 2 a partir de la malla 1, en la Figura 30). Esto podría deberse a la forma en que se produce la malla a partir del objeto de referencia (nube de puntos original o malla); se demuestra que el suavizado para reducir el número de triángulos no es tan preciso como la simplificación. Por lo tanto, el nivel de suavizado y el grado de simplificación considerados en esta investigación resultan adecuados para la

reconstitución digital *as-built* de la Basílica. La simplificación de estas geometrías según los parámetros óptimos obtenidos de la validación del mallado 3D facilita el procesado de datos y el modelado en comparación con las mallas complejas originales (no simplificadas). En esta investigación, se establece el umbral de 20.000 caras por tambor, pero la cantidad mínima de triángulos lograda por tambor en la reconstitución digital ha sido aún mayor (29.232 caras en el tambor 3, columna C5; y valor ponderado de 64.037,56 caras por tambor). Estos datos se recopilan en la Tabla A1. Desplazamientos y distorsiones en columnas (*Anexo II*). La precisión geométrica alcanzada se representa en la Tabla 14 tanto como la desviación estándar de la precisión de malla y la simplificación de la malla con respecto a las geometrías originales, como la superficie media de triángulos de todas las columnas, que se ponderan de acuerdo con el total de triángulos por tambor de columna. De la Tabla A2. Superficie y volumen de columnas (*Anexo II*), el total de caras obtenidas en la Basílica es de aproximadamente 8 millones, la superficie total de las columnas es de 269,688 m<sup>2</sup> y el volumen total es de 29,697 m<sup>3</sup>. De lo anterior, es necesario referirse al trabajo de Korumaz *et al.* (2017), dado que también utilizaron TLS para la captura de geometría, mallado y modelado de sólidos para el análisis FEM. En su caso, las nubes de puntos originales y simplificadas contaban con 7 y 3 millones de puntos, lo que constituye una reducción significativa en comparación con la densa nube de puntos de las columnas en la Basílica de Baelo Claudia (56 millones), a pesar de las grandes dimensiones de su caso de estudio (minarete). Además, la profundidad de *Octree* 12 resultó adecuada para los datos simplificados de nubes de puntos del minarete, mientras que generó ruido en nubes de puntos más densas como en la Basílica.

En cuanto a las características físicas de los modelos sólidos (véase Figura 35) para la columna C19, creada a través de los tres enfoques de modelado diferentes, cabe describir las diferencias y similitudes que implican. En lo que respecta al modelo *as-built*, las deformaciones superficiales de los tambores y sus juntas se hacen evidentes: ni el relieve es homogéneo, ni las juntas son horizontales. La distorsión de los tambores y el desplome general de la columna en la parte superior también son evidentes. A diferencia de Korumaz *et al.* (2017) y la mayoría de los trabajos de investigación recogidos en la sección *Estado de la cuestión*, en esta investigación en el estudio de caso de Baelo Claudia, no se utiliza *software* CAD para crear algunas partes de las columnas en base a fuentes documentales. Además, el análisis geométrico en las columnas de la Basílica proporciona mediciones completas de desplazamientos, distorsiones y deformaciones en vista en planta en lugar de en un solo eje de inclinación. Por consiguiente, los análisis realizados se basan en la geometría escaneada, teniendo en cuenta las deformaciones de la superficie de las columnas, lo cual resulta de utilidad para identificar alteraciones geométricas particulares para trabajos de restauración posteriores.

En relación a la evaluación del comportamiento estructural, se demuestra el gran impacto del enfoque de modelado *as-built* sobre los resultados del análisis en términos de consecución del factor de cumplimiento —especialmente cuando se analizan tanto el estado límite último axial como el cortante—. El modelo simplificado mantiene la distorsión y el desplazamiento de los tambores y la columna, respectivamente, pero evita la deformación de la superficie de los tambores y sus uniones. El modelo ideal únicamente considera el diámetro promedio y la altura real de los tambores, pero utilizando geometrías primitivas (cilindros); los centroides de las bases permanecen invariables en relación con los otros enfoques. La geometría regular del modelo ideal, como se muestra en los resultados de la 6.5. *Evaluación del comportamiento estructural*, implica deformaciones y tensiones estructurales menores, así como una redistribución de la tensión significativa (especialmente en los esfuerzos de compresión) como se esperaba. Las diferencias entre el modelo *as-built* y el simplificado, los cuales reproducen las geometrías más realistas, son más significativas en el campo de esfuerzo que en el campo de desplazamiento. Por lo tanto, el cortante máximo  $S_{xz}$  experimenta un aumento del 50% en el modelo *as-built*, lo cual podría representar el incumplimiento del estado límite último de cortante bajo carga dinámica. Además, la tensión principal máxima  $S_3$  muestra un aumento del 13% cuando el modelo *as-built* se compara con el modelo simplificado. Sin embargo, en lo que respecta al análisis de valores propios, las diferencias entre los modelos no son relevantes. De hecho, vale la pena destacar que ni la degradación de la rigidez ni las

imperfecciones geométricas producen un aumento de período. Sin embargo, la diferencia más crucial que se proporciona a partir de la evaluación estructural es el valor del factor de cumplimiento, que es de interés fundamental dentro de la evaluación de la seguridad estructural. El factor de cumplimiento del estado límite último axial se logra en los modelos ideal y simplificado, pero en el modelo *as-built* es menor que el valor límite aceptado de 1,0. Esos valores divergentes representan la diferencia entre decidir si las obras de refuerzo y/o reparación son necesarias o innecesarias.

El modelado *as-built* permite la medición precisa de las alteraciones geométricas y la evaluación del comportamiento estructural en patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural, como se ha demostrado en las columnas de la Basílica de Baelo Claudia. El potencial de los métodos propuestos es claro, ya que su aplicación a diferentes activos patrimoniales en las ciudades enriquecería los análisis de su estado físico para fines de conservación. Los datos cuantitativos para estudiar el desplazamiento, las distorsiones y las deformaciones superficiales de los elementos, así como el volumen y la superficie de las columnas y los tambores reunidos en la Tabla A2, pueden ser utilizados por los especialistas para evaluar las necesidades de restauración de acuerdo con criterios técnicos y científicos, además de poder monitorizar su estado a partir de cambios en su geometría a lo largo del tiempo. El análisis geométrico (desplomes, distorsiones y deformaciones) y numérico estructural, como se ha visto en la literatura científica al respecto, pueden ser llevados a cabo para cotejar el estado de conservación de los activos patrimoniales con los datos que fueron registrados con anterioridad. Además, el análisis geométrico se puede implementar para otras formas de modelos de patrimonio arqueológico o arquitectónico a partir de datos TLS, ya estén basados en objetos paramétricos puros (usando formas básicas como circunferencia, arco, rectángulo, etc.) o usando polisuperficies cerradas (sólidos) a partir de mallas como los modelos *as-built* en esta tesis doctoral. De esta manera, aunque el caso de estudio de la Basílica se centra en el análisis de columnas, otras tipologías de elementos pueden evaluarse geoméricamente dentro de su sistema de coordenadas de referencia. El análisis de diversos elementos estructurales (cimientos, muros, vigas, pares de cubierta, entre otros) a través de, por ejemplo, secciones transversales o desplazamiento de centroides, y el cálculo de la deformación debido a la inclinación, protuberancias, desviaciones, etc., revelan su estado de conservación. De igual modo, es posible estudiar en profundidad otros aspectos de los activos patrimoniales, como la asignación de autoría (Moyano *et al.*, 2017) de elementos en diversas localizaciones en base a la similitud de los modelos *as-built* de resultado de la metodología de la presente tesis doctoral.

Por su parte, cabe decir que, a pesar de que centrarse en exclusiva en el entorno de aplicaciones BIM no es el principal objetivo de esta tesis, en esta investigación se consigue el modelado 3D *as-built* de activos patrimoniales respaldado por el uso del escaneado láser y el análisis preciso de su estado de conservación. Teniendo en cuenta que el concepto BIM va más allá del *software* (Azhar, 2011), ya que está considerado como un proceso o una metodología más que como el mero uso de ciertos programas informáticos, la información obtenida en esta tesis, junto con los propios modelos, deben ser considerados como parte integrante del modelado de información HBIM, pues la interoperabilidad del formato IFC permite la importación de los modelos generados en BIM para la gestión coordinada y estructurada (Historic England, 2017) por los distintos especialistas del proceso de conservación patrimonial. Así, uno de los logros principales de esta investigación es la reconstitución 3D del patrimonio arquitectónico en un modelo HBIM riguroso. Este modelo puede utilizarse como referencia para la restauración del edificio y sus elementos, teniendo en cuenta su posición exacta, geometría y características físicas y técnicas. Además, la metodología propuesta es compatible con el modelado 3D de elementos históricos singulares y complejos, que no existen como objetos 3D estándar en las bibliotecas que utiliza el *software* BIM, como se observa en el trabajo de Boeykens *et al.* (2012). Por lo tanto, estos componentes pueden catalogarse para su posible uso en caso de una futura degradación de los edificios.

Con respecto a las limitaciones de esta investigación, el escaneado 3D se llevó a cabo dentro de un sistema de coordenadas del usuario. La nube de puntos global no fue georreferenciada utilizando GNSS



debido a problemas técnicos durante la encuesta. Por esta razón, la orientación de la Basílica en la etapa de análisis geométrico se estableció de acuerdo con el mapa del sitio proporcionado por Fincker *et al.* (2010). La georreferenciación del modelo conllevaría una mayor precisión en los resultados de la orientación de la inclinación de las columnas. Sin embargo, a partir de la Tabla 13, el reducido error de inclinación logrado en el levantamiento gráfico se considera válido para calcular los desplomes o desplazamientos, distorsiones y deformaciones de columnas y tambores, y por lo tanto, resulta adecuado para dar respuesta a las preguntas de investigación de esta tesis doctoral, que consisten en desarrollar una metodología para generar modelos *as-built* en base a la digitalización 3D para respaldar análisis más precisos que los que se realizan utilizando modelos virtuales del patrimonio sin deformaciones.

Además, la captura de las juntas de mortero entre los tambores en una posición más elevada no fue posible debido a la limitación del propio levantamiento gráfico en sí, ya que colocar el escáner láser al nivel del terreno, rodeando las columnas, genera oclusiones del haz de luz láser. En consecuencia, la geometría de las juntas se simplificó como se describe en el apartado 5.2.4. *Reconstitución digital: modelado sólido 3D*.

Finalmente, es preciso puntualizar que el procedimiento semiautomático y el algoritmo para subdividir las columnas en diferentes partes conllevan la inserción manual de puntos en los bordes de los tambores cerca de las juntas. Otras mejoras de este proceso podrían consistir en la programación a través de Python (Python Software Foundation, 2019) u otros lenguajes avanzados o la implementación de inteligencia artificial (IA) mediante el reconocimiento de patrones para establecer los puntos, que definen las superficies (parches) empleadas para dividir las columnas. La IA también podría implementarse para la eliminación de terreno (segmentación de nubes de puntos) con vistas extraer las columnas de una manera más automatizada.



## 8. Conclusiones

La aparición de las nuevas tecnologías supone grandes avances en la calidad y la gestión de la compleja información 3D del edificio o sitio histórico. En este contexto, la presente tesis doctoral está diseñada para proponer y validar una metodología para la creación de modelos de información del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural que representen su estado de conservación actual con vistas a analizarlo con precisión y así contribuir a su conservación. Para ello, es preciso evaluar las capacidades de las herramientas y procesos disponibles para el mallado 3D de las nubes de puntos procedentes del escaneado láser, a fin de seleccionar las idóneas.

Una de las principales ventajas de esta investigación radica en la utilización de paquetes de *software* comerciales asequibles y fáciles de usar, que están disponibles en la mayoría de los estudios de arquitectura, centros de investigación y universidades. Esto permitirá a los profesionales e investigadores aplicar la metodología propuesta a otros casos donde los recursos sean limitados o los edificios para estudiar se vean limitados por *hardware*. Aunque esta investigación considera la subdivisión de la nube de puntos completa del edificio en elementos fáciles de manejar, un mayor desarrollo a nivel tecnológico, incluida la potencia de cálculo, la eficiencia, el tiempo de procesado y el uso de la memoria, son esenciales en el caso de edificios de mayores dimensiones.

Los tres principales trabajos que respaldan esta tesis abordan la digitalización de sus respectivos casos de estudio mediante técnicas de escaneado 3D para lograr su reconstitución o reconstrucción semiautomática considerando las alteraciones geométricas que presentan estos activos patrimoniales. Como se muestra en Antón *et al.* (2018), el modelado sólido 3D a partir del mallado de las nubes de puntos, previa evaluación de la idoneidad del propio proceso de mallado, es exportado a plataformas BIM a través de entidades IFC. La finalidad de este procedimiento de tres etapas (escaneado — mallado — modelado sólido), también desarrollado en Antón *et al.* (2019), es la creación de modelos de información HBIM que representen el estado actual de conservación del patrimonio (modelos *as-built*), dado que no existe en la actualidad un procedimiento estandarizado y disponible comercialmente para la metodología *Scan-to-BIM*. Asimismo, es preciso destacar la implementación de la programación visual para la reconstitución de las columnas del caso de estudio de la Basílica de Baelo Claudia, lo que aporta un mayor grado de automatización al procedimiento. Por su parte, el análisis del modelo HBIM del Cenador de Carlos V describe el análisis de la distribución de las alteraciones geométricas del modelo *as-built* con respecto a geometrías ideales. Los resultados finales muestran que es posible analizar cuantitativamente las diferencias estructurales y las deformaciones de los modelos HBIM de los edificios históricos. Cuando la deformación patológica se deriva de problemas sustanciales en los sistemas de construcción, es importante identificar y marcar los elementos afectados que se deben reemplazar y colocar en su lugar correcto.

Con respecto a la operabilidad BIM, otra ventaja es el nivel de información, detalle y precisión (LOD = LOInformation + LOGeometry + LOAccuracy). La reconstitución digital a través del modelado HBIM *as-built* como en esta tesis doctoral se corresponde con el nivel LOD 400 dentro del rango de 100 a 500, ya que se insertaron múltiples objetos escaneados en los modelos. Estos elementos no solo se definen geoméricamente con gran nivel de detalle, sino que también se encuentran en su posición real en el sistema constructivo y contienen información relevante. Si el LOD 400 es un estándar para abordar la restauración de un edificio histórico, las deformaciones estructurales se podrían modelar y cuantificar como se logró en esta tesis. En este punto, teniendo en cuenta las características de este proyecto HBIM *as-built*, la inclusión de otros elementos como revestimientos y posibles instalaciones conllevaría lograr el nivel LOD 500.

El desarrollo de las últimas versiones de las plataformas BIM implica avances significativos en el análisis del patrimonio arqueológico, arquitectónico y cultural. Esta investigación se centra en la implementación y la cuantificación de las alteraciones geométricas estructurales para la creación de los modelos HBIM, que respalda un enfoque multidisciplinario en todas las fases del proceso de restauración: investigación, registro de datos, proyecto preliminar, proyecto, licitaciones, construcción, conservación, prevención y mantenimiento. De esta manera, se puede analizar el proceso de restauración antes de realizar cualquier intervención en el edificio o sitio histórico.

El enfoque de modelado *as-built* desarrollado en la presente tesis doctoral a partir del escaneado tridimensional, siguiendo métodos y algoritmos semiautomáticos, permite obtener mediciones precisas de las alteraciones estructurales y deformaciones superficiales (en definitiva, alteraciones geométricas) de los casos de estudio y, por tanto, del patrimonio en general cuando la aplicación de estos procesos sea extensiva al mismo. El caso de estudio de la Basílica aborda el análisis de los modelos de información *as-built* con respecto al enfoque de modelado ideal sin alteraciones geométricas, centrándose en los desplomes, distorsiones, deformaciones superficiales y cálculo de orientación de las columnas desde el punto de vista geométrico. Así, se identifican y cuantifican patologías estructurales y superficiales de las columnas, por lo que suponen datos relevantes para su conservación.

Los modelos sólidos *as-built* de las columnas de la Basílica han sido creados en diferentes etapas: 1) mediante TLS con las precisiones recogidas en la Tabla 13; 2) mallado 3D de nubes de puntos con las precisiones que muestra la Tabla 14; 3) grado de simplificación de malla según la misma tabla; y 4) con resolución media de triángulo en función de lo que dicta la Tabla 14, y un total de caras por tambor más de tres veces superior al valor umbral ponderado por tambor establecido en esta investigación para lograr una geometría precisa en las columnas.

Del análisis geométrico llevado a cabo en la Basílica —Tabla A1. Desplazamientos y distorsiones en columnas (*Anexo II*)—, se puede extraer lo siguiente:

- De las once columnas con capitel, cuatro manifiestan desplazamientos globales medidos bajo el capitel superiores a 65 mm, y únicamente otras tres columnas presentan desplomes inferiores a 20 mm.
- Seis de las columnas de la Basílica, de las cuales cuatro destacan especialmente, presentan desplomes y distorsiones significativos con respecto a sus modelos ideales.
- Todas las columnas que cuentan con capitel están inclinadas hacia la costa en dirección suroeste, sur y sureste.
- La columna C19, la más desfavorable estructuralmente, presenta un desplome global y distorsiones ampliamente superiores a los promedios, respectivamente, de las demás columnas con respecto a su eje ideal vertical. Además, la distorsión de los tambores en relación a los tambores inferiores es mayor en C19. Con todo, esta columna constituye una muestra adecuada para el análisis numérico estructural.

Por su parte, la presente tesis también contempla la obtención de datos de carácter estructural a partir de estos modelos 3D dadas las características de los casos de estudio, lo cual es de utilidad para validar el sistema propuesto en esta tesis. La reconstitución digital *as-built* permite el análisis a través de simulaciones como FEM para evaluar la estructura del edificio histórico. Sin embargo, las simulaciones y análisis pueden ser de diversa naturaleza. Ejemplos de estas simulaciones incluyen: análisis de riesgo de colapso debido a movimientos sísmicos, deformación de la estructura, transmisión de energía, movimiento de masas, análisis de erosión, entre otros.

El análisis estructural de las columnas de la Basílica de Baelo Claudia, especialmente, responde a la pregunta de la investigación de esta tesis sobre la relevancia del modelado de información y alteraciones geométricas para respaldar el análisis preciso de su estado de conservación. En cuanto a la evaluación del comportamiento estructural de las columnas, cabe destacar el estudio de idoneidad y compatibilidad de herramientas, formatos de archivo y tipologías de objetos 3D entre los modelos HBIM y las aplicaciones de simulación. La presente tesis desarrolla dicho estudio dado que, al igual que ocurre con la metodología *Scan-to-BIM*, el enfoque *Scan-to-BIM-to-FEM* para la interoperabilidad de los modelos HBIM con plataformas de simulación a través de elementos finitos está cada vez más presente en la literatura científica debido a la necesidad actual a tal efecto.

Las siguientes conclusiones se pueden obtener de la evaluación numérica estructural en esta tesis:

- Los resultados modales son bastante similares entre los modelos, y ni la degradación de la rigidez ni las imperfecciones geométricas (inclinación y distorsiones) provocan un aumento significativo del período. La única diferencia es que la inclinación conduce a una redistribución de masa efectiva en el eje horizontal, pero manteniendo la naturaleza de la forma modal.
- Los valores máximos de desplazamiento y tensión muestran diferencias significativas entre los modelos: (i) En el campo de desplazamiento, la inclinación de la columna provoca variaciones relevantes entre el modelo ideal y los más realistas (simplificado y *as-built*), como se esperaba. Tomando el modelo simplificado como referencia, el desplazamiento  $u_y$  disminuye un 98% en el modelo ideal y un 6% en el *as-built*. (ii) En el campo de tensiones, considerando el modelo simplificado como referencia, los valores presentan una disminución importante en el modelo ideal (por ejemplo, 40% en el valor de compresión máximo, S3, y 83% en la tensión de cortante  $S_{xy}$ ). Las diferencias en los valores de esfuerzo de cortante entre los modelos simplificado y *as-built* también son notables, ya que la variación obtenida (un aumento del 50% en el modelo *as-built*) podría representar el incumplimiento del Estado Límite Último de cortante bajo carga dinámica.
- La diferencia más importante es el valor del factor de cumplimiento. El factor de cumplimiento del Estado Límite Último axial se logra en los modelos ideal y simplificado (1,68 y 1,00, respectivamente), pero en el modelo *as-built* no se cumple completamente (0,89). Esas divergencias realmente hacen la diferencia entre decidir si el refuerzo y/o la reparación son necesarios o no, decisión que debe tomarse a través de criterios basados en el riesgo. En cualquier caso, se demuestra el requisito de una representación precisa de la geometría real al evaluar el comportamiento estructural, tal como se ha logrado en la metodología propuesta en esta tesis.

Con todo, queda patente la relevancia del modelado de información y alteraciones geométricas del patrimonio a partir de técnicas de teledetección para obtener datos precisos que representen su estado actual. Aquí, las simulaciones y el análisis geométrico se convierten en una aplicación de la integración de los datos de la nube de puntos en el modelado *as-built* del patrimonio, lo que conlleva implicaciones directas en la identificación de patologías y para las intervenciones de subsanación de estos activos, pues se aporta una mayor rigurosidad y efectividad a fin de facilitar su conservación. En este sentido, la implementación de los métodos descritos en otros edificios y sitios históricos lleva a lograr el modelado 3D *as-built* de la ciudad patrimonial para contribuir a la conservación de estos activos para el futuro.

Es preciso mencionar que las plataformas BIM, además de administrar los activos patrimoniales, permiten su difusión al público en general a través de contenidos multimedia como el uso de la realidad virtual y los modelos de exploración. Es conveniente entonces poner estas herramientas al servicio de la sociedad, destacando la importancia de su aplicación para la preservación del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural.

Finalmente, cabe sintetizar la contribución de esta tesis al conocimiento:

- Se lleva a cabo un análisis crítico de aplicaciones, algoritmos, tecnologías y procesos disponibles relativos a la digitalización y la reconstitución virtual del patrimonio para el fin de constituir modelos de información HBIM precisos.
- Se proporciona y valida un procedimiento semiautomático de modelado *as-built* de alteraciones geométricas en HBIM a partir de técnicas de escaneado 3D para el análisis cuantitativo preciso y la gestión de activos patrimoniales o de distinta naturaleza.

### 8.1. Futuras investigaciones

Habiendo analizado los algoritmos para el tratamiento de nubes de puntos de forma crítica, se evidencia su escasa efectividad para segmentar las nubes de los casos de estudio a fin de extraer los elementos que constituirán los modelos *as-built*. Además, los procesos manuales pueden llevar a cometer errores que a su vez pueden determinar cambios significativos en la geometría y la calidad de dichos modelos, por lo que la automatización de estos procesos se torna necesaria. Es por ello que los lenguajes de programación, como pueden ser Python o el propio Grasshopper, entre otros, pueden contribuir en distintas fases de la reconstitución digital precisa en HBIM. Las implicaciones son diversas, pues comprenden desde restar la componente humana de la toma de decisiones relativa a la definición del volumen de los elementos constructivos que componen los edificios históricos, hasta el modelado paramétrico HBIM automático dentro de la misma plataforma a partir de datos TLS. Asimismo, se podría realizar una evaluación exhaustiva de los algoritmos de mallado disponibles en cuanto a su precisión para generar modelos *as-built* del patrimonio, ya que los análisis de naturaleza estructural podrían beneficiarse de geometrías incluso más precisas.

Otra posible línea de investigación es el desarrollo de simulaciones de diversa índole, como energética, de humedad, movimiento de masas, acústica, erosión, entre otras, en los modelos HBIM generados siguiendo los métodos propuestos y descritos en la presente tesis doctoral. La premisa es compartida por la motivación que ha derivado en este trabajo, pues se espera que los resultados de dichas simulaciones en modelos HBIM *as-built* adquieran mayor precisión que considerando modelos carentes de alteraciones geométricas.

Investigaciones adicionales en este campo podrían centrarse en calcular la similitud entre múltiples muestras del patrimonio arquitectónico utilizando los objetos sólidos 3D creados a través de la metodología presentada en esta tesis. El objetivo sería asignar la autoría tanto del diseño como de la construcción de elementos de edificios y sitios históricos, basándose en el análisis de su geometría y las fuentes documentales histórico-gráficas.

## 8. Conclusions

The emergence of new technologies represents great advances in quality and management of the complex 3D information of the historical building or site. In this context, this doctoral thesis is designed to propose and validate a methodology for the creation of information models of the architectural, archaeological and cultural heritage representing its current conservation status with a view to analyse it accurately and thus contribute to its preservation. To do this, in order to select the suitable tools and processes available for TLS point clouds 3D meshing, it is necessary to evaluate their capabilities.

One of the main advantages of this research lies in the use of affordable, easy-to-use commercial software packages, that are available in most of architectural offices, research centres and universities. This will allow professionals and researchers to apply the proposed methodology to other cases where the resources are limited or the buildings to study conform to the current limitations in hardware. Although this research considers the subdivision of the entire point cloud of the building into easy-to-handle elements, further technological development in hardware and software, including computation power, efficiency, processing time, and memory usage, are essential in the case of larger buildings.

The three publications constituting this thesis address the digitisation of their respective case studies using 3D scanning techniques to achieve their semi-automatic reconstitution or reconstruction considering the geometrical alterations of these heritage assets. As shown in the first publication, the 3D solid modelling from point cloud meshing, after evaluating the suitability of the meshing process itself, is exported to BIM platforms through IFC entities. The purpose of this three-step procedure (scanning — meshing — solid modelling), also developed in the second publication, is the creation of HBIM information models that represent the current conservation status of the heritage (as-built models), since there is currently no standardised and commercially available procedure for the Scan-to-BIM methodology. Likewise, it is worth highlighting the implementation of visual programming for the reconstitution of the columns in the Basilica of Baelo Claudia case study, which provides the procedure with a greater automation degree. The analysis of the HBIM model of the Pavilion of Carlos V describes the geometrical alterations distribution analysis of the as-built model with respect to ideal geometries. The final results show that it is possible to quantitatively analyse the structural differences and deformations of the HBIM models of historical buildings. When the pathological deformation derives from substantial problems in the construction systems, it is important to identify and mark the affected elements that must be replaced and located in their correct place.

With respect to BIM operability, another advantage is the level of information, detail and accuracy ( $LOD = LOInformation + LOGeometry + LOAccuracy$ ). The digital reconstitution through as-built HBIM modelling as in this doctoral thesis corresponds to the LOD 400 level within the range of 100 to 500, since multiple scanned objects were inserted into the models. Not only are these elements defined geometrically with a high level of detail, but they are also in their real position in the construction system and contain relevant information. If the LOD 400 is a standard to address the restoration of a historical building, structural deformations could be modelled and quantified as achieved in this thesis. At this point, taking into account the characteristics of this as-built HBIM project, the inclusion of other elements such as claddings and possible building services would lead to achieve the LOD 500 level.

The development of the latest BIM platforms versions implies significant advances in the analysis of the archaeological, architectural and cultural heritage. This research focuses on the implementation and quantification of structural geometrical alterations for the creation of HBIM models, which supports a multidisciplinary approach in all phases of the restoration process: research, data recording, preliminary project, project, tenders, construction, conservation, prevention and maintenance. In this way, the restoration process can be analysed before any intervention in the historical building or site takes place.

The as-built modelling approach developed in this doctoral thesis from three-dimensional scanning, following semiautomatic methods and algorithms, allows to obtain accurate measurements of structural alterations and surface deformations (in short, geometrical alterations) of the case studies and, therefore, of heritage in general when these processes are applied to it. The case study of the Basilica addresses the analysis of as-built information models in relation to the ideal modelling approach without geometrical alterations, focusing on the displacements, distortions, surface deformations and orientation calculation of the columns from the geometrical point of view. In this way, analysis provides accurate data on the structural and surface pathologies of the columns are identified and quantified, thus becoming relevant data for their conservation.

The as-built solid models of the columns in the Basilica are created in different stages: 1) from TLS with the accuracies gathered in Tabla 13; 2) point cloud 3D meshing with the accuracies shown in Tabla 14; 3) mesh simplification degree according to the same table; and 4) an average triangle resolution as stated in Tabla 14, and a total of faces per drum more than three times higher than the weighted threshold value per drum set in this research to achieve accurate geometry in columns.

From the geometrical analysis carried out in the Basilica —Table A1: Displacements and distortions in columns (*Annex II*)—, the following can be drawn:

- Four out of the eleven columns with capitals show global displacements, measured under the capital, greater than 65 mm, whereas only three columns have displacements below 20 mm.
- Six columns in the Basilica, especially four of them, present significant displacements and distortions with respect to their ideal models.
- All the columns with capital lean southwest, south and southeast towards the coast.
- Column C19, structurally the most unfavorable, presents higher global displacement and distortions than the average values of the other columns with regard to its vertical ideal axis. In addition, the distortion of the drums in relation to the drums below is greater in C19. All in all, this column constitutes a suitable sample for the structural numerical analysis.

On the other hand, this thesis also addresses the acquisition of structural data from the 3D models given the characteristics of the case studies, which is useful to validate the system proposed in this thesis. The *as-built* digital reconstitution allows the analysis through simulations such as FEM to analyse the structure of the historical building. However, the simulation and analysis can be of diverse nature. Examples of these simulations include: collapse risk analysis due to earthquakes, structure deformation, energy transmission, crowd movement, erosion analysis, among others.

Especially, the structural analysis of the columns in the Basilica of Baelo Claudia answers the general research question of this thesis on the relevance of information modelling and geometrical alterations to support the conservation status accurate analysis of this asset. Regarding the structural behavior assessment of the columns, it is worth highlighting the suitability and compatibility study of tools, file formats and 3D objects types between the HBIM models and the simulation applications. In this thesis, it is studied the Scan-to-BIM-to-FEM approach for the interoperability of HBIM models with finite elements simulation platforms, since, as for the Scan-to-BIM methodology, the former approach is increasingly present in the scientific literature due to the current need in that sense.



The following conclusions are drawn from the numerical structural assessment:

- The modal results are quite similar among models, and neither the stiffness degradation nor the geometrical imperfections (leaning and distortions) provoke a significant period increase. The only difference is that the leaning leads to an effective mass redistribution in the horizontal axis, but maintaining the modal shape nature.
- The maximum displacement and stress values exhibit significant differences among models: (i) In the displacement field, the column tilt provokes relevant variations between the ideal model and the most realistic ones (simplified and as-built), as expected. Taking the simplified one as the reference, the  $u_y$  displacement decreases 98% in the ideal model and 6% in the as-built one. (ii) In the stress field, considering the simplified model as the reference, the stresses values present an important decrease in the ideal model (e.g. 40% in the maximum compressive value,  $S_3$ , and 83% in the shear stress  $S_{xy}$ ). The differences in the shear stress values between the simplified and the as-built models are also remarkable, as the obtained variation (50% increase in the as-built model) could represent the unfulfillment of the shear Ultimate Limit State under dynamic loading.
- The most important difference is the compliance factor value. The axial Ultimate Limit State compliance factor is accomplished in the ideal and simplified models (1.68 and 1.00, respectively), but in the as-built is not completely fulfilled (0.89). Those divergences actually make the difference between deciding whether strengthening and/or retrofitting works are necessary or unnecessary. From those results, the necessity of strengthening or retrofitting measures should be clarified on the basis of risk-based decision criteria. In any case, it is demonstrated the requirement for an accurate representation of the real geometry when assessing structural performance, as it has been achieved within the methodology proposed in this work.

All in all, it is evident the relevance of the information and geometrical alterations modelling of heritage from remote sensing techniques in order to obtain accurate data to represent its current condition. Here, the simulations and geometrical analysis become an application of the integration of point cloud data into the as-built modelling of heritage. This entails direct implications for the identification of pathologies and for the retrofitting of these assets, since greater accuracy and effectiveness are provided to ease their conservation. In this sense, the implementation of these methods into other sites leads to achieve the as-built 3D heritage city modelling in order to contribute to the conservation of these assets for the future.

It should be mentioned that BIM platforms, in addition to managing patrimonial assets, allow their dissemination to the general public through multimedia contents such as using virtual reality and exploration models. It is then convenient to place these tools at the service of society, highlighting the importance of their application for the preservation of the architectural, archaeological and cultural heritage.

Finally, it is worth summarising the contribution to knowledge of this thesis:

- A critical analysis of available applications, algorithms, technologies and processes related to the digitisation and virtual reconstitution of heritage is carried out in order to constitute accurate HBIM information models.
- An as-built modelling semi-automatic procedure of geometrical alterations in HBIM is provided and validated for the architectural, archaeological and cultural heritage assets from 3D scanning techniques, so that it can be used for the accurate quantitative analysis and the management of these assets or those of a different nature.

### **8.1. Future research**

In the first two publications, the algorithms for point cloud data management are critically analysed to show their scarce effectiveness to segment the clouds of the case studies in order to extract the elements constituting the as-built models. In addition, the manual processes can lead to errors that in turn may entail significant geometry and quality changes of these models; then, the automation of these processes becomes necessary. That is why programming languages, such as Python or Grasshopper, among others, can contribute to different phases of the accurate digital reconstitution in HBIM. The implications are diverse, since they range from subtracting the human component from decision-making regarding the definition of the volume of historical building components, to the automatic HBIM parametric modelling within the same platform from TLS data. Likewise, a thorough evaluation of the available mesh algorithms could be performed as regards their accuracy to generate as-built heritage models, since the structural analysis could benefit from even more precise geometries.

Another possible line of research is the development of diverse simulations, such as energy, humidity, crowd movement, acoustics, erosion, among others, in the HBIM models generated following the methods proposed and described in this doctoral thesis. This premiss is shared by the concern from which this thesis is derived, since it is expected that the results of such simulations on as-built HBIM models acquire greater accuracy than considering models lacking geometrical alterations.

Further research in this field could focus on calculating the similarity among multiple samples of architectural heritage by using the 3D solid objects created through the methodology presented in this thesis. The aim would be to assign the authorship of both the design and the construction of historical building components, based on the analysis of their geometry and historical-graphical documentary sources.

## Bibliografía

- AENOR. UNE-ENV 1996-1-3 EUROCÓDIGO 6, Proyecto de Estructuras de Fábrica; parte 1-3: reglas generales para edificios, reglas detalladas para acciones laterales (in Spanish) (2000).
- Al Aqtash, U., Bandini, P., & Cooper, S. L. (2017). Numerical Approach to Model the Effect of Moisture in Adobe Masonry Walls Subjected to In-Plane Loading. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(6), 805–815. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1298010>
- AlShawa, O., Sorrentino, L., & Liberatore, D. (2017). Simulation Of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part (II): Combined Finite-Discrete Elements. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(1), 79–93. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1237588>
- Altuntas, C. (2015). Integration of point clouds originated from laser scanner and photogrammetric images for visualization of complex details of historical buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XL-5/W4, 431–435. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-431-2015>
- Altuntas, C., Yildiz, F., & Scaioni, M. (2016). Laser Scanning and Data Integration for Three-Dimensional Digital Recording of Complex Historical Structures: The Case of Mevlana Museum. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2), 18. <https://doi.org/10.3390/ijgi5020018>
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A., Asencio-Cortés, G., & Martínez-Álvarez, F. (2017). Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 717(February), 449–472. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.032>
- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A., & Martínez-Álvarez, F. (2018). Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system. *Central European Journal of Operations Research*, 26(3), 739–758. <https://doi.org/10.1007/s10100-017-0506-7>
- ANSYS Inc. (1998). *ANSYS Manual Set*. Canonsburg, PA 15317, USA: ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive.
- ANSYS Inc. (2018). ANSYS CFD Guide. Canonsburg, PA, US. Retrieved from <https://www.ansys.com/es-es/services/training-center/platform/introduction-to-ansys-icem-cfd>
- Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(5), 790–805. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1415391>
- Antón, D., Pineda, P., Medjdoub, B., & Iranzo, A. (2019). As-Built 3D Heritage City Modelling to Support Numerical Structural Analysis: Application to the Assessment of an Archaeological Remain. *Remote Sensing*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/rs11111276>
- Anton, H., & Dorres, C. (2010). *Elementary Linear Algebra. Applications version* (10th ed.). John Wiley & Sons, Inc. Retrieved from [https://warwick.ac.uk/fac/sci/math/undergrad/ughandbook2016/content/ma106/elementary\\_linear\\_algebra\\_10th\\_edition.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/math/undergrad/ughandbook2016/content/ma106/elementary_linear_algebra_10th_edition.pdf)
- Arayici, Y. (2008). Towards building information modelling for existing structures. *Structural Survey*, 26(3), 210–222. <https://doi.org/10.1108/02630800810887108>
- Armesto-gonzález, J., Riveiro-rodríguez, B., González-aguilera, D., & Rivas-brea, M. T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3037–3047. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.031>
- Artec 3D. (2010). Artec MHT 3D scanner. Retrieved from <https://www.artec3d.com/>
- Artec 3D. (2015). Artec Studio 10 Professional. Retrieved from <https://www.artec3d.com/>
- Autodesk. (2014). AutoCAD Architecture. Retrieved from <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-architecture/downloads/caas/downloads/content/autocad-architecture-2015-service-pack-2.html>
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Baik, A. (2017). From point cloud to Jeddah Heritage BIM Nasif Historical House – case study. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, (In press), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.02.001>

- Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., & Robson, S. (2014). Jeddah Historical Building Information Modelling “JHBIM” – Object Library. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5*, 41–47. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-41-2014>
- Bakker, W. H., Feringa, W., Gieske, A. S. M., Gorte, B. G. H., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., ... Woldai, T. (2009). *Principles of Remote Sensing*. (K. Tempfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, & L. L. F. Janssen, Eds.) (4th ed.). Enschede, The Netherlands: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). Retrieved from [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_2009/general/principlesremotesensing.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesremotesensing.pdf)
- Baraccani, S., Silvestri, S., Gasparini, G., Palermo, M., Trombetti, T., Silvestri, E., ... Capra, A. (2016). A Structural Analysis of the Modena Cathedral. *International Journal of Architectural Heritage, 10*(2–3), 235–253. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1113344>
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory, 57*, 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2015). HBIM and augmented information: towards a wider user community of image and range-based reconstructions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XL-5/W7*, 35–42. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-35-2015>
- Barber, D. M., Dallas, R. W. A., & Mills, J. P. (2006). Laser Scanning for Architectural Conservation. *Journal of Architectural Conservation, 12*(1), 35–52. <https://doi.org/10.1080/13556207.2006.10784959>
- Barlish, K., & Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in Construction, 24*, 149–159. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2012.02.008>
- Bassier, M., Hadjidemetriou, G., Vergauwen, M., Van Roy, N., & Verstryngne, E. (2016). Implementation of Scan-to-BIM and FEM for the Documentation and Analysis of Heritage Timber Roof Structures. In M. Ioannides, E. Fink, A. Moropoulou, M. Hagedorn-Saupe, A. Fresca, G. Liestøl, ... P. Grussenmeyer (Eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection: 6th International Conference, EuroMed 2016* (pp. 79–90). Nicosia, Cyprus: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_7)
- Bernal, D., Arévalo, A., Lorenzo, L., & Aguilera, L. (2003). Imitations of Italic amphorae for fish sauce in Baetica. New evidence from the salt-fish factory of Baelo Claudia (Hispania). *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta, 38*, 305–313.
- Bernal, D., Arévalo, A., Morales, A., & Roselló, E. (2007). Un ejemplo de conservas de pescado baelonenses en el siglo II a.C. In A. Arévalo & D. Bernal (Eds.), *Las “Cetariae” de “Baelo Claudia”: avance de las investigaciones arqueológicas en el barrio meridional (2000-2004)* (pp. 355–374). Cádiz, España: Junta de Andalucía, Consejería de Cultura and Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=281502>
- Bernal, D., Arévalo, A., Roselló, E., & Morales, A. (2003). Garum y salsas mixtas: análisis arqueozoológico de los paleocontenidos de ánforas procedentes de Baelo Claudia (s. II a. C.). In M. J. Feliu, J. Martín, M. C. Edreira, M. C. Fernández, M. P. Martínez, A. Gil, & R. Alcántara (Eds.), *Avances en arqueometría 2003* (pp. 85–90). Cádiz: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- Bernal, D., & Expósito, J. Á. (2017). Baelo Claudia, puerto pesquero, comercial y de viajeros. Nuevas perspectivas. In J. M. Campos & J. Bermejo (Eds.), *Los Puertos Atlánticos Béticos y Lusitanos y su relación comercial con el Mediterráneo* (pp. 307–344). Roma, Italy: L’Erma di Bretschneider.
- Boeykens, S., Himpe, C., & Martens, B. (2012). A Case Study of Using BIM in Historical Reconstruction. The Vinohrady Synagogue in Prague. In H. Achten, J. Pavliček, J. Hulín, & D. Matějovská (Eds.), *30th eCAADe Conference* (Vol. 1, pp. 729–738). Prague: eCAADe (Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe) and CVUT, Faculty of Architecture. Retrieved from <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/350340>
- Brumana, R., Oreni, D., Cuca, B., Binda, L., Condoleo, P., & Triggiani, M. (2014). Strategy for Integrated Surveying Techniques Finalized to Interpretive Models in a Byzantine Church, Mesopotam, Albania. *International Journal of Architectural Heritage, 8*(6), 886–924. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.756077>
- buildingSMART International. (2017). Industry Foundation Classes (IFC). Retrieved September 20, 2016, from <http://www.buildingsmart-tech.org/>
- Calantropio, A., Chiabrando, F., Rinaudo, F., & Teppati Losè, L. (2018). Use and evaluation of a short range small quadcopter and a portable imaging laser for built heritage 3D documentation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42*(1), 71–78. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-71-2018>
- Cannizzaro, F., & Lourenço, P. B. (2017). Simulation of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part

- (VI): Discrete Element Approach. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(1), 125–142. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1238973>
- Castellazzi, G., D'Altri, A. M., de Miranda, S., & Ubertini, F. (2017). An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures*, 132, 229–248. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.11.032>
- Chaza Chimeno, M. R., Rico Delgado, F., & Antón, D. (2018). Registro del estado de conservación de elementos arquitectónicos singulares del Pabellón de Industrias, Manufacturas y Artes Decorativas de la Exposición Iberoamericana de Sevilla. In A. Graciani García & M. Ponce Ortiz de Insagurbe (Eds.), *Devenir y actualidad del legado de la Exposición Iberoamericana* (pp. 43–56). Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.
- Chellini, G., Nardini, L., Pucci, B., Salvatore, W., & Tognaccini, R. (2014). Evaluation of Seismic Vulnerability of Santa Maria del Mar in Barcelona by an Integrated Approach Based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(6), 795–819. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.747115>
- Chiabrando, F., Sammartano, G., & Spanò, A. (2016). Historical buildings models and their handling via 3d survey: From points clouds to user-oriented hbim. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XLI-B5*, 633–640. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-633-2016>
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., & Ranzuglia, G. (2008). MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. In V. Scarano, R. De Chiara, & U. Erra (Eds.), *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference* (pp. 129–136). Salerno, Italy: The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>
- Clemente, R., Roca, P., & Cervera, M. (2006). Damage Model with Crack Localization – Application to Historical Buildings. In P. B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, & S. Agrawal (Eds.), *5th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions* (pp. 1125–1133). New Delhi: MacMillan India Ltd. Retrieved from <http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2006/1125.pdf>
- Compán, V., Pachón, P., Cámara, M., Lourenço, P. B., & Sáez, A. (2017). Structural safety assessment of geometrically complex masonry vaults by non-linear analysis . The Chapel of the Würzburg Residence (Germany). *Engineering Structures*, 140, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.002>
- Cortés-Sánchez, M., Riquelme-Cantal, J. A., Simón-Vallejo, M. D., Parrilla Giráldez, R., Odriozola, C. P., Calle Román, L., ... Cantero-Chinchilla, F. N. (2018). Pre-Solutrean rock art in southernmost Europe: Evidence from Las Ventanas Cave (Andalusia, Spain). *PLOS ONE*, 13(10), e0204651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208212>
- Dassault Systèmes, & SolidWorks Corporation. (2017). SolidWorks: 3D CAD Design Software. Retrieved from <http://www.solidworks.com>
- de Felice, G., De Santis, S., Lourenço, P. B., & Mendes, N. (2017). Methods and Challenges for the Seismic Assessment of Historic Masonry Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(1), 143–160. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1238976>
- Díaz Narváez, V. P. (2006). *Metodología de la investigación científica y bioestadística para médicos, odontólogos y estudiantes de ciencias de la salud*. Santiago: Ril editores. Retrieved from [https://books.google.es/books?id=KfscYYsconYC&pg=PA79&lpg=PA79&dq=metodologia+empirica&source=bl&ots=ugjRYmcF18&sig=ACfU3U0ELDa8hCkKcRMUGukWSNbvq12bbg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjLVMOG\\_pjhAhXSy4UKHTL3Bq84FBD0ATAGegQICBAB#v=onepage&q=metodologia+empirica&f=false](https://books.google.es/books?id=KfscYYsconYC&pg=PA79&lpg=PA79&dq=metodologia+empirica&source=bl&ots=ugjRYmcF18&sig=ACfU3U0ELDa8hCkKcRMUGukWSNbvq12bbg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjLVMOG_pjhAhXSy4UKHTL3Bq84FBD0ATAGegQICBAB#v=onepage&q=metodologia+empirica&f=false)
- Dirección General de Bienes Culturales - Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Resolución de 10 de diciembre de 1991 (1991). Spain: Boletín Oficial del Estado. Retrieved from [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-1992-3076](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1992-3076)
- Dore, C., & Murphy, M. (2013). Semi-Automatic Modelling of Building Façades with Shape Grammars Using Historic Building Information Modelling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W1*, 57–64. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-57-2013>
- Dore, C., & Murphy, M. (2017). Current State of the Art Historic Building Information Modelling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5*(September), 185–192. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-185-2017>
- Dore, C., Murphy, M., McCarthy, S., Brechin, F., Casidy, C., & Dirix, E. (2015). Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XL-5/W4*, 351–357. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J. A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites

- with integrated techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(3), 21–29. <https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1318815>
- Elhaddad, F., Carrascosa, L. A. M., & Mosquera, M. J. (2018). Long-term effectiveness, under a coastal environment, of a novel conservation nanomaterial applied on sandstone from a Roman archaeological site. *Journal of Cultural Heritage*, 34, 208–217. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.04.013>
- Fai, S., Graham, K., Duckworth, T., Wood, N., & Attar, R. (2011). Building Information Modelling and Heritage Documentation. In K. Pavelka (Ed.), *XXIIIrd International CIPA Symposium*. Prague: Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, and CIPA. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/b76a/6be1ab4c5c148757eac8c73dc7a5c2995999.pdf>
- Fincker, M., Moretti, J.-C., Fellague, D., Le Meaux, H., & Rodríguez-Gutiérrez, O. (2010). Recherches récentes au théâtre de Baelo Claudia. In *II Jornadas Internacionales de Baelo Claudia: Nuevas Investigaciones* (pp. 237–257). Cádiz: Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.
- Fregonese, L., Taffurelli, L., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Helder, J., & Spezzoni, A. (2017). Survey and Modelling for the Bim of Basilica of San Marco in Venice. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XLII-2/W3, 303–310. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-303-2017>
- Garofano, A., & Lestuzzi, P. (2016). Seismic Assessment of a Historical Masonry Building in Switzerland: The “Ancien Hôpital De Sion.” *International Journal of Architectural Heritage*, 10(8), 975–992. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1160303>
- Gerencia de Urbanismo de Sevilla. (2012). *Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla* (Catálogo de Edificios. Sector 6: “Real Alcázar” No. 6-53180–02). Sevilla. Retrieved from [http://unesco.urbanismosevilla.org/unesco/sites/default/files/ficha\\_alcazar\\_pabellon\\_de\\_carlos\\_v.pdf](http://unesco.urbanismosevilla.org/unesco/sites/default/files/ficha_alcazar_pabellon_de_carlos_v.pdf)
- Girardeau-Montaut, D. (2015). Cloud-to-Mesh Distance. Retrieved October 6, 2016, from [http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Mesh\\_Distance](http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Mesh_Distance)
- Girardeau-Montaut, D. (2016a). CloudCompare: 3D point cloud and mesh processing software. Open Source Project. Retrieved from <http://www.danielgm.net/cc/>
- Girardeau-Montaut, D. (2016b). Normals\Compute. Retrieved November 28, 2018, from <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Normals%5CCompute>
- Graphisoft. (2016). ArchiCAD. Retrieved from <http://www.graphisoft.com/archicad/>
- Guarnieri, A., Milan, N., & Vettore, A. (2013). Monitoring Of Complex Structure For Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(1), 54–67. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.606595>
- Hajian, H., & Becerik-Gerber, B. (2010). Scan to BIM: factors affecting operational and computational errors and productivity loss. In J. Gašparík (Ed.), *27th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (pp. 265–272). Bratislava, Slovakia: International Association of Automation and Robotics in Construction. Retrieved from [http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Scan\\_to\\_BIM\\_factors\\_affecting\\_operational\\_and\\_computational\\_errors\\_and\\_productivity\\_loss.pdf](http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Scan_to_BIM_factors_affecting_operational_and_computational_errors_and_productivity_loss.pdf)
- Hichri, N., Stefani, C., De Luca, L., & Veron, P. (2013a). Review of the « As-Built Bim » Approaches. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XL-5/W1, 107–112. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-107-2013>
- Hichri, N., Stefani, De Luca, & Veron, P. (2013b). Review of the « As-Built Bim » Approaches. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XL-5/W1, 107–112. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-107-2013>
- Historic England. (2017). *BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model*. (S. Antonopoulou & P. Bryan, Eds.). Swindon: Historic England. Retrieved from <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/>
- Hong, S., Jung, J., Kim, S., Cho, H., Lee, J., & Heo, J. (2015). Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 51, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbusys.2015.01.005>
- Huber, D., Akinci, B., Stambler, A., Xiong, X., Anil, E., & Adan, A. (2011). Methods for automatically modeling and representing as-built building information models. In *Proceedings of the NSF CMMI Research Innovation Conference*. Atlanta, Georgia. Retrieved from [https://www.ri.cmu.edu/pub%7B\\_%7Dfiles/2011/1/2011-huber-cmmi-nsf-v4.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub%7B_%7Dfiles/2011/1/2011-huber-cmmi-nsf-v4.pdf)

- Instituto Geográfico Nacional. (2019). Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. Retrieved March 11, 2019, from <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- International Council on Monuments and Sites. (2004). History of the Venice Charter. Retrieved June 16, 2019, from <https://www.icomos.org/venicecharter2004/history.pdf>
- International Council on Monuments and Sites. (2011). The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments - 1931. Retrieved June 16, 2019, from <https://www.icomos.org/en/167-the-athens-charter-for-the-restoration-of-historic-monuments>
- International Council on Monuments and Sites. (2019). ICOMOS. International Council on Monuments and Sites. Retrieved May 12, 2019, from <https://www.icomos.org/en/>
- International Organization for Standardization (ISO). ISO 16739:2013—Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries. (2013). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/51622.html>
- Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S., & Heo, J. (2014). Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, 42, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.021>
- Junta de Andalucía. Decreto 129/1989 (1989). Spain: Boletín Oficial de la Junta de Andalucía. Retrieved from <https://www.juntadeandalucia.es/boja/1989/57/26>
- Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(3), 1–13. <https://doi.org/10.1145/2487228.2487237>
- Kim, M., Sohn, H., & Chang, C.-C. (2015). Localization and Quantification of Concrete Spalling Defects Using Terrestrial Laser Scanning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000415)
- Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., ... Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153, 224–238. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.10.026>
- Leica Geosystems. (2016a). Leica Cyclone. Retrieved from [http://hds.leica-geosystems.com/en/leica-cyclone\\_6515.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/leica-cyclone_6515.htm)
- Leica Geosystems. (2016b). Leica ScanStation C10 – The all-in-one laser scanner for any application. Retrieved December 5, 2016, from <http://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-c10>
- Leica Geosystems. (2018a). BLK360 laser scanner. Retrieved April 19, 2018, from <https://leica-geosystems.com/en-GB/products/laser-scanners/scanners/blk360>
- Leica Geosystems. (2018b). Cyclone REGISTER 360. Retrieved from <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011>
- Lezzerini, M., Antonelli, F., Columbu, S., Gadducci, R., Marradi, A., Miriello, D., ... Lazzeri, A. (2016). Cultural Heritage Documentation and Conservation: Three-Dimensional (3D) Laser Scanning and Geographical Information System (GIS) Techniques for Thematic Mapping of Facade Stonework of St. Nicholas Church (Pisa, Italy). *International Journal of Architectural Heritage*, 10(1), 9–19. <https://doi.org/10.1080/15583058.2014.924605>
- Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 177–183. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>
- Logothetis, S., & Stylianidis, E. (2016). Bim Open Source Software (Oss) for the Documentation of Cultural Heritage. *Virtual Archaeology Review*, 7(15), 28–35. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4995/var.2016.5864>
- Lombillo, I., & Villegas, L. (2008). *Metodología para el análisis de las estructuras de fábrica del patrimonio construido. Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido*. Santander: Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria.
- López, F. J., Leronés, P., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., Zalama, E., López, F. J., ... Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>
- López Morales, F. J. (2016). La Carta de Venecia en el siglo XXI. *Gremium*, 3(5), 29–39. Retrieved from

<https://editorialrestauro.com.mx/gremium/index.php/gremium/article/view/29/52>

- Lorensen, W. E., & Cline, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '87* (Vol. 21, pp. 163–169). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/37401.37422>
- Megahed, N. (2015). Towards a Theoretical Framework for HBIM Approach in Historic Preservation and Management. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 9(3), 130. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v9i3.737>
- Mesh Reverse. (2016). Mesh Flow. Retrieved from <http://www.meshreverse.com/download.html>
- Mill, T., Alt, A., & Liias, R. (2013). Combined 3D building surveying techniques – terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(sup1), S23–S32. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.795187>
- Moisan, E., Charbonnier, P., Foucher, P., Grussenmeyer, P., & Guillemin, S. (2018). Evaluating a Static Multibeam Sonar Scanner for 3D Surveys in Confined Underwater Environments. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10091395>
- Mordanova, A., & de Felice, G. (2018). Seismic Assessment of Archaeological Heritage Using Discrete Element Method. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1543482>
- Mosalam, K. M., Takhirov, S. M., & Park, S. (2014). Applications of laser scanning to structures in laboratory tests and field surveys. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(1), 115–134. <https://doi.org/10.1002/stc.1565>
- Moyano, J. J., Barrera, J. A., Nieto, J. E., Marín, D., & Antón, D. (2017). A Geometrical Similarity Pattern as an Experimental Model for Shapes in Architectural Heritage: a Case Study of the Base of the Pillars in the Cathedral of Seville and the Church of Santiago in Jerez, Spain. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XLII-2/W3(March), 511–517. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-511-2017>
- Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, 49(353), 99–116. <https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1133039>
- Muñoz, Á., & Expósito, J. Á. (2017). The Archaeological Ensemble of Baelo Claudia and its monographic museum. Historiographical and management brief notes. *Boletín Del Museo Arqueológico Nacional*, 1(35), 89–93. Retrieved from <http://www.man.es/man/estudio/publicaciones/boletin-edicion/Volumenes/35-2017/35-2017-v1.html>
- Murcia-Delso, J., Kumar Das, A., Roca, P., & Cervera, M. (2009). Seismic safety analysis of historical masonry structures using a damage constitutive model. In M. Papadrakakis, N. D. Lagaros, & M. Fragiadakis (Eds.), *COMPdyn 2009. ECCOMAS 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Rhodes, Greece: Institute of Structural Analysis & Seismic Research, National Technical University of Athens. Retrieved from <http://www.eccomas.org/vpage/1/14/2009>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311–327. <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>
- Nabil, M., & Saleh, F. (2014). 3D reconstruction from images for museum artefacts: A comparative study. In *2014 International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM)* (pp. 257–260). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VSMM.2014.7136681>
- Nieto-Julián, J. E., Antón, D., & Moyano, J. J. (2019). Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1610523>
- Nieto, J. E., Moyano, J. J., Rico, F., & Antón, D. (2016). Management of built heritage via HBIM Project: A case of study of flooring and tiling. *Virtual Archaeology Review*, 7(14), 1. <https://doi.org/10.4995/var.2016.4349>
- Nieto Julián, J. E., Moyano Campos, J. J., Rico Delgado, F., & Antón, D. (2013). La necesidad de un modelo de información aplicado al patrimonio arquitectónico. In B. Fuentes Giner & I. Oliver Faubel (Eds.), *1er Congreso Nacional BIM – EUBIM 2013* (pp. 21–32). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/29127>
- Niglio, O. (2016). Angiolo Mazzoni Del Grande, ingeniero italiano en Colombia y las propuestas para una teoría de la restauración arquitectónica. *Gremium*, 3(5), 11–28. Retrieved from



<https://editorialrestauro.com.mx/gremium/index.php/gremium/article/view/27/54>

- Olsen, M., Kuester, F., Chang, B., & Hutchinson, T. (2009). Terrestrial Laser Scanning-Based Structural Damage Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 264–272. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000028)
- Oreni, D. (2013). From 3D Content Models to HBIM for Conservation and Management of Built Heritage. In B. Murgante, S. Misra, M. Carlini, C. M. Torre, H.-Q. Nguyen, D. Tanar, ... O. Gervasi (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013* (pp. 344–357). Ho Chi Minh City, Vietnam: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39649-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39649-6_25)
- Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., Barazzetti, L., & Previtali, M. (2014). Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 267–273. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-267-2014>
- Padilla, A. (2010). Some notes about the elite of the Roman municipality of Baelo. *Habis*, (41), 185–203. Retrieved from [http://institucional.us.es/revistas/habis/41/art\\_12.pdf](http://institucional.us.es/revistas/habis/41/art_12.pdf)
- Papantoniou, B., Soegaard, M., Lupton, J. R., Goktürk, M., Trepess, D., Knemeyer, D., ... Hornecker, E. (2015). Heuristics and heuristic evaluation. In B. Papantoniou, M. Soegaard, J. R. Lupton, M. Goktürk, D. Trepess, D. Knemeyer, ... E. Hornecker (Eds.), *The Glossary of Human Computer Interaction*. The Interaction Design Foundation. Retrieved from <http://www.interaction-design.org/>
- Pauwels, P., Verstraeten, R., De Meyer, R., & Van Campenhout, J. (2008). Architectural Information Modelling for Virtual Heritage Application. In M. Ioannides (Ed.), *Digital Heritage – Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia* (pp. 18–23). Limassol, Cyprus: Archaeolingua. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1854/LU-434809>
- Penttilä, H., Rajala, M., & Freese, S. (2007). Building Information Modelling of Modern Historic Buildings Case Study of HUT / Architectural Department by Alvar Aalto. In J. Kieferle & K. Ehlers (Eds.), *Predicting the Future: 25th eCAADe Conference Proceedings* (pp. 607–613). Frankfurt am Main, Germany: Faculty of Architecture and Civil engineering, FH Wiesbaden. Retrieved from <http://arkit.tkk.fi/senaatti1>
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E., Casula, G., & Boschi, E. (2013). A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.021>
- Pineda, P. (2016a). Ancient Materials and Singular Constructions: Numerical, Experimental, and Heritage Strategies to Preserve Masonry Structures in Seismic Areas. In I. R. M. Association (Ed.), *Civil and Environmental Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 340–359). Hershey, PA, USA: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9619-8.ch013>
- Pineda, P. (2016b). Collapse and upgrading mechanisms associated to the structural materials of a deteriorated masonry tower. Nonlinear assessment under different damage and loading levels. *Engineering Failure Analysis*, 63(63), 72–93. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.013>
- Pineda, P., García-Martínez, A., & Castizo-Morales, D. (2017). Environmental and structural analysis of cement-based vs. natural material-based grouting mortars. Results from the assessment of strengthening works. *Construction and Building Materials*, 138, 528–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.013>
- Pineda, P., & Iranzo, A. (2017). Analysis of sand-loaded air flow erosion in heritage sites by Computational Fluid Dynamics: Method and damage prediction. *Journal of Cultural Heritage*, 25, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.12.005>
- Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., & Scaioni, M. (2014). Scan registration using planar features. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5(June), 501–508. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-501-2014>
- Pu, S., & Vosselman, G. (2009). Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.001>
- Python Software Foundation. (2019). Python. Python Software Foundation. Retrieved from <https://www.python.org/>
- Radrigan, M. (2005). *Metodología de la Investigación*.
- Real Academia Española. (2019). Diccionario de la lengua española. Retrieved March 20, 2019, from <http://www.rae.es/>
- Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>

- Riquelme, J. A., Ferrer, B., & Mas, D. (2017). Use of High-Quality and Common Commercial Mirrors for Scanning Close-Range Surfaces Using 3D Laser Scanners: A Laboratory Experiment. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs9111152>
- Riveiro, B., Caamaño, J. C., Arias, P., & Sanz, E. (2011). Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Automation in Construction*, 20(4), 380–388. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2010.11.008>
- Robador, M. D. (2017). Historias del agua y el jardín. Restauración del Cenador del León. Sevilla: Real Alcázar de Sevilla. Retrieved from <https://www.alcazarsevilla.org/noticias/historias-del-agua-jardin-restauracion-del-cenador-del-leon/>
- Robert McNeel & Associates. (2014a). Grasshopper. Retrieved from <https://www.grasshopper3d.com/>
- Robert McNeel & Associates. (2014b). Rhinoceros. Retrieved from <https://www.rhino3d.com/>
- Robert McNeel & Associates. (2015). UnifyMeshNormals. Retrieved October 23, 2016, from <http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/en-us/commands/unifymeshnormals.htm>
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions . Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Saygi, G., & Remondino, F. (2013). Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(4), 695–714. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.2.4.695>
- Shen, Y., Wang, J., Lindenbergh, R., Hofland, B., & G. Ferreira, V. (2018). Range Image Technique for Change Analysis of Rock Slopes Using Dense Point Cloud Data. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10111792>
- Simeone, D., Cursi, S., Toldo, I., & Carrara, G. (2014). B(H)IM - Built Heritage Information Modelling - Extending BIM approach to historical and archaeological heritage representation. In *Fusion, Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe Conferences* (Vol. 1, pp. 613–622). Newcastle upon Tyne. Retrieved from <https://cumincad.architecture.net/doc/oai-cumincadworks-id-ecaade2014-204>
- Simon, H. (1955). A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99. <https://doi.org/10.2307/1884852>
- Simon, H. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, 63(2), 129–138. <https://doi.org/10.1037/h0042769>
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R. C., & Gorte, B. (2008). Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. In J. Chen, J. Jiang, & H.-G. Maas (Eds.), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XXXVII, pp. 615–620). Beijing, China: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS). <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2005.00183.x>
- Souto Galván, A. (2004). *La construcción y conservación de la identidad nacional en México: arquitectura contemporánea y protección del patrimonio histórico y artístico*. UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España).
- Sun, Z., & Zhang, Y. (2019). Accuracy Evaluation of Videogrammetry Using A Low-Cost Spherical Camera for Narrow Architectural Heritage: An Observational Study with Variable Baselines and Blur Filters. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030496>
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010a). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7), 829–843. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010b). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7), 829–843. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
- The European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2014/24/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC, Pub. L. No. Directive 2014/24/EU, OJ L 94, 28.3.2014 65 (2014). Official Journal of the European Union. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/24/oj>
- Thomson, C., & Boehm, J. (2015). Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM. *Remote Sensing*, 7(9), 11753–11775. <https://doi.org/10.3390/rs70911753>
- UNESCO World Heritage Committee. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention,

- Pub. L. No. 41 COM 11 (2017). 41st session of the World Heritage Committee (41 COM). Retrieved from <https://whc.unesco.org/en/guidelines/>
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (1972). The World Heritage Convention. Retrieved June 13, 2019, from <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (1987). Cathedral, Alcázar and Archivo de Indias in Seville. Retrieved November 7, 2016, from <http://whc.unesco.org/es/list/383#top>
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2019). World Heritage. Retrieved June 13, 2019, from <https://whc.unesco.org/en/about/>
- Unity Technologies. (2016). Unity manual. Retrieved November 12, 2016, from <https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/AnatomyofaMesh.html>
- Vežočník, R., Ambrožič, T., Sterle, O., Bilban, G., Pfeifer, N., & Stopar, B. (2009). Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s91209873>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Vosselman, G., Gorte, B. G. H., Sithole, G., & Rabbani, T. (2004). Recognising structure in laser scanning point clouds. In M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, & H. Weinacker (Eds.), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives: Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment* (pp. 33–38). Freiburg, Germany: Institute for Forest Growth, Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems. Retrieved from <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/VOSSELMAN.pdf>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>
- Xu, H., Li, H., Yang, X., Qi, S., & Zhou, J. (2018). Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s19010022>
- Zeibak-Shini, R., Sacks, R., & Filin, S. (2012). Toward generation of a Building Information Model of a deformed structure using laser scanning technology. In *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*. Moscow, Russia: International Society for Computing in Civil and Building Engineering.
- Zhang, R., & Zakhor, A. (2014). Automatic identification of window regions on indoor point clouds using LiDAR and cameras. In T. Boult, F. Porikli, & S. Belongie (Eds.), *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision* (pp. 107–114). Steamboat Springs, Colorado, United States: IEEE. <https://doi.org/10.1109/WACV.2014.6836112>
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., ... Yan, G. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method Volume 1: The Basis* (5th ed., Vol. 1). Oxford: Butterworth-Heinemann.



## Anexo I

### I.1. Indicadores de calidad de la producción científica

A continuación, se enumeran los indicadores de calidad de las publicaciones que han servido para desarrollar esta tesis doctoral, incluyendo información relativa a la indexación y evaluación de estos trabajos, así como número de citas o visualizaciones hasta la fecha, en su caso.

#### ○ **Primer trabajo**

Fecha de aceptación:	6 de diciembre de 2017
Fecha de publicación:	1 de enero de 2018
Revista:	International Journal of Architectural Heritage
ISSN:	1558-3058 (Print); 1558-3066 (Online)
Editorial:	Taylor and Francis
Indexación:	Journal Citation Reports (JCR)
Factor de impacto (JCR):	1,345 (2017); 1,440 (2018)
Cuartil (JCR):	Q2 (2017); Q3 (2018)
Indexación:	Web of Science, SCImago Journal Rank (SJR), Arts and Humanities Citation Index, CSA Technology Research Database, Science Citation Index Expanded, Scopus, Aerospace Database, Art Source, Current Contents/Arts & Humanities, EBSCOhost Online Research Databases, Civil Engineering Abstracts, Index Islamicus, Metadex, Communication Abstracts
Factor de impacto (SCImago):	0,744 (2017); 0,600 (2018)
Cuartil (SCImago):	Q1 (2017); Q1 (2018)
H-index:	24
Número de citas:	11 (Google Scholar); 2 (Web of Science); 4 (Scopus)

#### ○ **Segundo trabajo**

Fecha de aceptación:	27 de mayo de 2019
Fecha de publicación:	29 de mayo de 2019
Revista:	Remote Sensing
ISSN:	2072-4292
Sección:	Remote Sensing Image Processing
Número especial:	3D-City Models and Remote Sensing: Acquisition, Processing and Application

Editorial:	MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)
Indexación:	Journal Citation Reports (JCR)
Factor de impacto (JCR):	4,118 (2018)
Cuartil (JCR):	Q1 (2018)
Indexación:	SCImago Journal Rank (SJR), ADS - Astrophysics Data System, Arts and Humanities Citation Index, AGORA (FAO), Science Citation Index Expanded, Scopus, CAB Abstracts (CABI), Current Contents - Physical, Chemical & Earth Sciences (Clarivate Analytics), dblp Computer Science Bibliography (Universität Trier), Aerospace Database, Art Source, Civil Engineering Abstracts, Metadex, Communication Abstracts, DOAJ - Directory of Open Access Journals, Ei Compendex / Engineering Village (Elsevier), Genamics JournalSeek, GeoRef (American Geosciences Institute), HINARI (WHO), Inspec (IET), Julkaisufoorumi Publication Forum (Federation of Finnish Learned Societies), Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers (NSD), Web of Science
Factor de impacto (SCImago):	1,430 (2018)
Cuartil (SCImago):	Q1 (2018)
H-index:	81
Visualizaciones:	202

○ **Tercer trabajo**

Fecha de aceptación:	18 de abril de 2019
Fecha de publicación:	11 de mayo de 2019
Revista:	International Journal of Architectural Heritage
ISSN:	1558-3058 (Print); 1558-3066 (Online)
Editorial:	Taylor and Francis
Indexación:	Journal Citation Reports (JCR)
Factor de impacto (JCR):	1,440 (2018)
Cuartil (JCR):	Q3 (2018)
Indexación:	Web of Science, SCImago Journal Rank (SJR), Arts and Humanities Citation Index, CSA Technology Research Database, Science Citation Index Expanded, Scopus, Aerospace Database, Art Source, Current Contents/Arts & Humanities, EBSCOhost Online Research Databases, Civil Engineering Abstracts, Index Islamicus, Metadex, Communication Abstracts
Factor de impacto (SCImago):	0.600 (2018)
Cuartil (SCImago):	Q1 (2018)
H-index:	24
Visualizaciones:	79

## **I.2. Copia completa de las publicaciones científicas**

En esta sección, se presentan los principales trabajos que respaldan la presente tesis doctoral. El orden de las tres publicaciones refleja su capacidad de responder al propósito de la investigación y a los *Objetivos* planteados (sección 3.) tras analizar la necesidad vigente en la literatura científica con respecto a la necesidad de generar modelos de información del estado de conservación real del patrimonio arquitectónico, arqueológico y cultural.





### **I.2.1. Trabajo primero: Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models**

La generación de modelos de información HBIM precisos, considerando las alteraciones geométricas existentes en patrimonio, es el logro principal de este artículo de revista (Antón *et al.*, 2018). En esta investigación se analizan de forma crítica las tecnologías actuales ampliamente utilizadas en la literatura científica para la generación de HBIM o la mera digitalización y modelado 3D del patrimonio, como son el escaneado láser y de luz estructurada (menos frecuente) y aplicaciones comerciales de diseño digital o BIM. Este análisis comprende tanto el funcionamiento de diverso *software* como la evaluación de la precisión del mallado de las nubes de puntos a partir de su desviación geométrica. Partiendo del caso de estudio del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla, una vez se han validado las herramientas a emplear, se diseña un procedimiento semiautomático de tres etapas para la reconstitución o reconstrucción en HBIM del estado de conservación actual y las singularidades del patrimonio analizado a partir de la información procedente del escaneado 3D. Asimismo, se demuestra cómo las aplicaciones comerciales y el *hardware* de especificaciones técnicas medias son suficientes para alcanzar dicho objetivo.

La referencia de este artículo de revista es la siguiente:

Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(5), 790–805. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1415391>

Autores y adscripciones:

- **Daniel Antón García.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla
- **Benachir Medjdoub.** The Creative and Virtual Technologies Research Laboratory. School of Architecture, Design and the Built Environment. Nottingham Trent University
- **Raid Shrahily.** The Creative and Virtual Technologies Research Laboratory. School of Architecture, Design and the Built Environment. Nottingham Trent University
- **Juan José Moyano Campos.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla



### **I.2.2. Trabajo segundo: As-built 3D heritage city modelling to support numerical structural analysis: Application to the assessment of an archaeological remain**

Este artículo de revista (Antón *et al.*, 2019) aborda el propósito general de la tesis doctoral en cuanto a desarrollar y validar una metodología para generar modelos del patrimonio arqueológico, arquitectónico y cultural en su estado de conservación actual (creación de modelos *as-built*) para respaldar análisis estructurales precisos. Tomando el caso de estudio de la Basílica del Conjunto Arqueológico de Baelo Claudia en Tarifa, Cádiz, esta investigación parte del modelado semiautomático del primer trabajo (Antón *et al.*, 2018) —de la nube de puntos al modelo sólido, pasando por el mallado como proceso intermedio—, complementado con programación visual para la composición de las columnas, con el fin de demostrar cómo los modelos con alteraciones geométricas son capaces de proporcionar información más precisa sobre sus deformaciones estructurales. Este trabajo, implementando el estudio de desviaciones de la primera publicación, conlleva el análisis crítico de algoritmos y *software* para el mallado de las nubes de puntos, así como la evaluación de la técnica del escaneado láser a nivel de precisión y de nivelación del equipo. La evaluación del estado de conservación de las columnas del caso de estudio tiene lugar a través de un análisis geométrico —para el cálculo de desplomes, distorsiones y deformaciones estructurales— y mediante análisis numérico para la evaluación de su comportamiento estructural —método de elementos finitos FEM—. Los resultados demuestran el gran impacto del modelado *as-built* con respecto a otros enfoques de modelado sin alteraciones geométricas (ideal) y realizados siguiendo métodos tradicionales o con una simplificación excesiva (modelo simplificado).

La referencia de este artículo de revista es la siguiente:

Antón, D., Pineda, P., Medjdoub, B., & Iranzo, A. (2019). As-Built 3D Heritage City Modelling to Support Numerical Structural Analysis: Application to the Assessment of an Archaeological Remain. *Remote Sensing*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/rs11111276>

Autores y adscripciones:

- **Daniel Antón García.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla
- **Paloma Pineda Palomo.** Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla
- **Benachir Medjdoub.** The Creative and Virtual Technologies Research Laboratory. School of Architecture, Design and the Built Environment. Nottingham Trent University
- **Alfredo Iranzo Paricio.** Departamento de Ingeniería Energética. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla

Article

# As-Built 3D Heritage City Modelling to Support Numerical Structural Analysis: Application to the Assessment of an Archaeological Remain

Daniel Antón <sup>1,2,\*</sup> , Paloma Pineda <sup>3</sup>, Benachir Medjdoub <sup>2</sup> and Alfredo Iranzo <sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Sevilla, 4A Reina Mercedes Avenue, 41012 Seville, Spain

<sup>2</sup> The Creative and Virtual Technologies Research Laboratory, School of Architecture, Design and the Built Environment, Nottingham Trent University, 50 Shakespeare Street, Nottingham NG1 4FQ, UK; benachir.medjdoub@ntu.ac.uk

<sup>3</sup> Department of Building Structures and Geotechnical Engineering, School of Architecture, Universidad de Sevilla, 2 Reina Mercedes Avenue, 41012 Seville, Spain; palomapineda@us.es

<sup>4</sup> Thermal Engineering Group, Energy Engineering Department, School of Engineering, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, Isla de la Cartuja, 41092 Seville, Spain; airanzo@us.es

\* Correspondence: danton@us.es; Tel.: +34-644-351-215

Received: 18 April 2019; Accepted: 27 May 2019; Published: 29 May 2019



**Abstract:** Terrestrial laser scanning is a widely used technology to digitise archaeological, architectural and cultural heritage. This allows for modelling the assets' real condition in comparison with traditional data acquisition methods. This paper, based on the case study of the basilica in the Baelo Claudia archaeological ensemble (Tarifa, Spain), justifies the need of accurate heritage modelling against excessively simplified approaches in order to support structural safety analysis. To do this, after validating the 3D meshing process from point cloud data, the semi-automatic digital reconstitution of the basilica columns is performed. Next, a geometric analysis is conducted to calculate the structural alterations of the columns. In order to determine the structural performance, focusing both on the accuracy and suitability of the geometric models, static and modal analyses are carried out by means of the finite element method (FEM) on three different models for the most unfavourable column in terms of structural damage: (1) as-built (2) simplified and (3) ideal model without deformations. Finally, the outcomes show that the as-built modelling enhances the conservation status analysis of the 3D heritage city (in terms of realistic compliance factor values), although further automation still needs to be implemented in the modelling process.

**Keywords:** terrestrial laser scanning; point cloud data; as-built 3D heritage city modelling; deformations; modelling accuracy; numerical modelling; structural assessment; conservation status analysis; archaeological heritage; Baelo Claudia

## 1. Introduction

Terrestrial laser scanning (TLS) [1] is a broadly used remote sensing data source in the scientific literature and in refurbishment works for the digitisation of archaeological, architectural, and cultural heritage. This technology allows the capture of the real condition of those heritage assets to include their structural alterations [2]. Additionally, in recent decades, TLS has been implemented in building information modelling (BIM) to create information models of heritage buildings and sites via the scan-to-BIM approach, but in many cases this is carried out using standard BIM tools and, therefore, not considering their actual characteristics, dimensions, and singularities [3]. Moreover, modelling following traditional data acquisition methods and excessively simplified modelling approaches,

as seen in other research works, do not represent the real conservation status of the assets. As a result, the analysis of these assets cannot be accurately performed. Hence, the as-built 3D heritage city modelling, based on precise data from remote sensing and semi-automatic processes, should support reliable, accurate measurements, analyses, and simulations for conservation purposes.

In that sense, the general aim of this research article is to justify the need of modelling heritage assets on a precise basis, analysing the effect of the detailed geometry on the structural response, in terms of the safety compliance level. This is performed on a single case study: the columns of the basilica of the Baelo Claudia archaeological ensemble, in Tarifa, Spain. Thus, the digital reconstitution of the columns and their alterations is undertaken through a semi-automatic procedure. To do this, an accuracy assessment of the 3D meshing from TLS point cloud data is carried out to validate the solid modelling method. Additionally, the most unfavourable column in terms of structural deformations is modelled following three different approaches: (1) as-built (2) simplified, as modelled by means of traditional measurement procedures and (3) the ideal version without deformations and material damage. The results of both the geometric analysis (to calculate the deviation and distortion), and the structural behaviour assessment (via the finite element method (FEM)) reveal the impact of the accurate as-built modelling on the heritage asset preservation. In this sense, the weaknesses of the structural components can be identified and measured by evaluating the extent of their deformations. The effect of geometric precision on the structural assessment is also analysed in this research. Consequently, from a precise geometric reconstruction, the study of the conservation status of 3D heritage cities—architectural, archaeological and cultural heritage assets—could be enhanced.

From the aforementioned, this research firstly defines the general and specific objectives in detail. Secondly, the paper reviews relevant and recent scientific literature on 3D recording and assessment of heritage assets from remote sensing techniques and structural analysis to later describe the case study. Next, the methodology is explained in terms of: (i) digital reconstitution of the columns of the basilica from 3D scanning to meshing, meshing process validation, and modelling hypotheses for subsequent analysis; (ii) geometric analysis of the actual displacements, distortions, and deformations on the modelling approaches with respect to the ideal, vertical axis; and (iii) structural behaviour assessment of the modelling approaches for the most unfavourable column in order to evaluate the impact of the modelling accuracy on the analysis. Finally, the results are presented by following the structure of the methodology and specifically analysed and discussed with a view to provide further conclusions of this work. The sections Supplementary Materials and Appendix A provide further information regarding the geometric analysis of the columns.

### *Objectives*

The main objective of this work is to analyse and rationalise the need of accurate modelling of heritage assets in order to assess their deformations and structural behaviour for conservation purposes. In order to achieve this and to provide a real case for the investigation, the following specific objectives are developed in this work:

- The accurate semi-automatic digital reconstitution of the Baelo Claudia basilica is performed from TLS point cloud data.
- A detailed geometric analysis of the displacement, distortion and deformations in the columns is undertaken, in order to identify the most unfavourable column of the basilica.
- The suitability of different modelling approaches is analysed (on the most unfavourable column) by assessing their structural behaviour.
- The role of realistic and accurate geometric models on safety compliance analyses is obtained.

## **2. Literature Review**

The creation of a 3D model of historic structures from laser scanning and images, including data related to its construction methods, materials, etc. was firstly addressed by Murphy et al. [4],

who defined the system as historic building information modelling (HBIM). As described by Thomson and Boehm [5], BIM is a digital data flow based on a 3D parametric model containing information about the assets—whether they are new or historical buildings—but its definition is not clear [6]. As stated by López et al. [7], HBIM comprises the geometry—from remote sensing products—and the identity (information) of the analysed buildings.

According to Volk et al. [8], the capture, processing and creation of as-built BIM models are time-consuming tasks for existing buildings. As a result, there is a research challenge in the automation of those processes, especially when the addressed geometries derive from TLS or any other remote sensing source. Although the work by Thomson and Boehm [5] is not intended for heritage, they firstly review the scientific literature concerning the automation from 3D scanning to 3D parametric modelling in BIM platforms, and then provide a workflow for this purpose. Undoubtedly, heritage assets are more likely to contain complex decorative elements in comparison with new buildings, which makes it necessary to use accurate data capture techniques.

One of TLS uses is reviewed by Mukupa et al. [9] for structural change detection and deformation monitoring. Those authors find important unresolved issues, such as strict calibration procedures, accurate point cloud data registration and geo-referencing, and improvements in deformation analysis. Research on deformation monitoring comprises the work by Vežočník et al. [10], who propose a methodology based on TLS aided by tacheometry and global navigation satellite system (GNSS) positioning for the long-term accurate evaluation of the point cloud data displacement on non-stable ground. Pesci et al. [11] detect and evaluate the changes of a tower under seismic loading in order to provide accurate data for urgent diagnosis. Additionally, they use TLS at different times and assess the structural behaviour of the building. Barracani et al. [12], due to the complexity of the Modena Cathedral, on the basis of static structural health monitoring (SHM) system and TLS in different stages, develop FEM models to investigate the different factors that have an effect on the structural behaviour. Shen et al. [13] use TLS to capture dense point cloud data to quantify the changes of rock slopes due to water erosion, by carrying out cloud-to-cloud distance calculation and with a range image technique. Xu et al. [14] monitor the deformations of an earth-rock dam in China during different periods by integrating TLS and non-uniform rational B-splines (NURBS) to create the 3D models to be compared. Concerning the use of TLS in archaeological sites, Lerma et al. [15] and Cortés-Sánchez et al. [16], in combination with photogrammetry and 3D optical scanning, respectively, carry out the photo-realistic digitisation of palaeolithic engravings in caves in the Iberian Peninsula (Spain) to produce accurate 3D models and traditional drawings.

It is also worth mentioning publications where BLK360, the TLS device considered in this research, is used. Calantropio et al. [17] discuss the methods and analyse the results of the 3D survey using this portable TLS and a small UAV (unmanned aerial vehicle). The authors also summarise the characteristics and performance of these devices, of which BLK360 proves to be a good solution for digitisation. Sun and Zhang [18] use BLK360 and photogrammetry to create the 3D models in order to assess the accuracy of videogrammetry applied to Chinese architectural heritage.

It is necessary to highlight the importance of using accurate equipment to capture and model structural and surface deformations on an accurate basis. This can be clearly understood through the work by Moisan et al. [19], who evaluate an alternative and recent technique for 3D surveys in confined underwater environments: the Mechanical Sonar Scanning (MSS). Obviously, MSS is aimed at producing point cloud data of, for instance, underwater infrastructure, but its comparison with the accuracy of TLS in the same case study—when no water is present—reveals its crucial role for surface deformations. The evaluation results show that the latter technique is capable of capturing more details than the former, especially when the details are below 4 cm in size, although the MSS results could be improved by placing the scanner closer to the surface. It is possible that specific deformations and features might be neither recorded and modelled nor analysed. Taking into consideration that difference in the point cloud accuracy (standard deviation of 31 mm), its impact on the surface accuracy when modelling heritage assets is clear.

On the other hand, the method proposed in this paper can be applied to assess different heritage building typologies and elements under diverse actions and/or boundary conditions (e.g., static and dynamic loading patterns, erosion, moisture, ageing phenomena and so on). In order to evaluate the benefits and limitations of current methods for seismic assessment, de Felice et al. [20] test and analyse two real-scale masonry models on a shaking table through multi-block dynamics, FEM and DEM (discrete element method), and carry out blind test predictions and simulations of the experimental results obtained. They highlight that the definition of simplified models may cause estimation error, and the analysis of macro FEM models may compromise the results when large rigid body displacements or rotations near collapse exist. Alshawa et al. [21] test the same models by combining FEM and DEM to assess the out-of-plane structural behaviour on masonry buildings. The authors defend the coarse block and element discretisation since these models matched the experimental results. However, rougher modelling approaches might lead to worse results. As it is well known, a mesh sensitivity analysis is always required to guarantee the accuracy of the results, as well as the no-dependence with respect to meshing. Cannizzaro and Lourenço [22] perform shaking table test analysis of masonry models that, far from achieving great accuracy in the shapes, simulate the out-of-plane nonlinear response under the premises of simplified models to reduce the computational efforts. Another example of the relevance of refined discretisation is the work by Mordanova and de Felice [23], who use DEM to analyse the seismic capacity of a Colosseum wall and the arcades of an aqueduct in Rome, taking into account the detailed block masonry pattern in those elements.

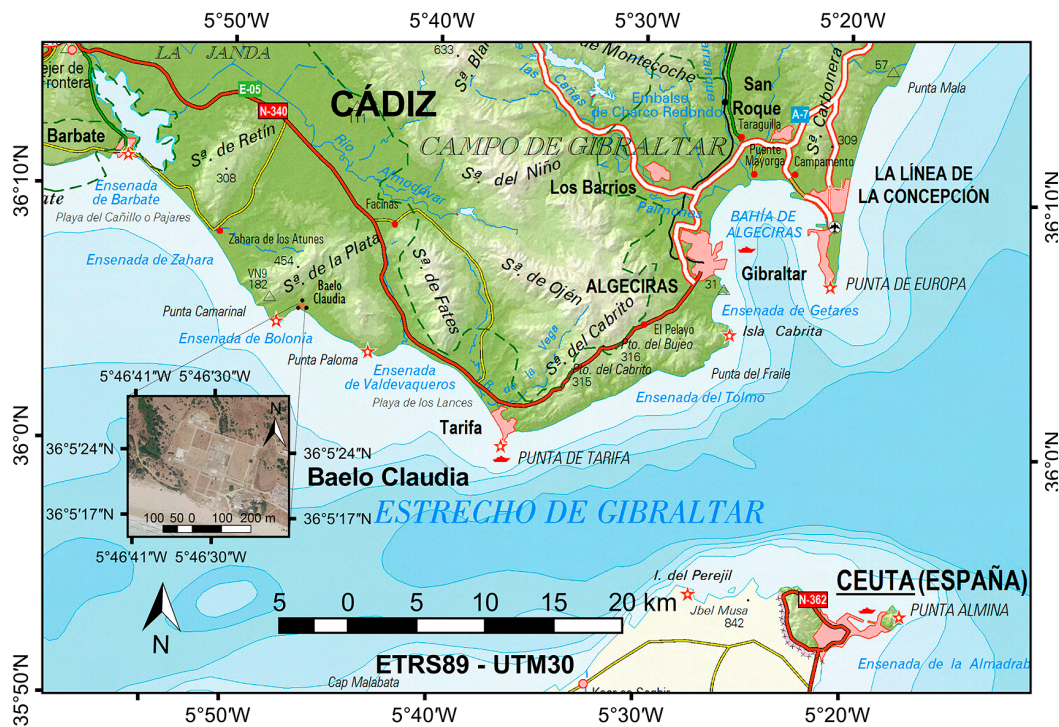
Regarding the relevance of as-built models, in a previous work on the Baelo Claudia archaeological ensemble, Pineda and Iranzo [24] predict the damage evolution under dynamic wind loading of the 'Cardo of the Columns' using computational fluid dynamics (CFD), where suspended small sand particles have a high erosion potential due to the high-velocity winds. The outcomes of this research are useful for the prediction of stone mass loss. However, although relevant results are obtained from simplified geometries, the use of more detailed geometries could enrich the results. Al Aqtash et al. [25] use FEM to show the effect of moisture in adobe masonry walls under in-plane (lateral) loading. Although shell elements were used to model the walls, the authors highlight that if the length is less than 20 times the thickness, as-built geometries could be applied (also for moisture simulations). Finally, Riveiro et al. [26] address the 3D modelling of an arch in a bridge from photogrammetry and CAD tools to later undertake a FEM mechanical analysis on the models. They highlight the advantages of considering accurate geometries of a less regular nature in the structural analysis results. On the other hand, Castellazzi et al. [27] state that the accuracy of modelling through cross-sectioning and discretisation units of the historical building suffice for global structural analysis, but the resulting jagged geometry differs from the continuity of the wall surfaces and the actual dimensions and proportions of the elements. Notwithstanding, this global approach benefits from a reduction of computational resources in such a large case study, as in the work by Garofano and Lestuzzi [28], who develop a seismic assessment of a massive historical building following a macro-modelling approach. They use the applied element method (AEM) technique combined with nonlinear dynamic analysis instead of using FEM. The authors state that this approach ponders accuracy and efficiency, which is also important in the structural analysis of complex heritage assets.

With a view to close this section, the work by Korumaz et al. [29] is an example of the application of a TLS point cloud for the structural health assessment of historic constructions. This assessment is carried out through (geometric) deviation analysis (DA) and FEM on a severe leaning minaret. As a result, structural alterations are recorded and measured. However, in comparison with the data and parameters considered in the basilica of Baelo Claudia, low-density point cloud data from TLS of the exterior building surface was used to create the 3D solid model of their minaret case study in CAD software, aided by documentary sources to reconstruct the interior. The insufficiency of these as-built geometries, together with the lack of data at the top of the minaret due to its height, complicate the acquisition of accurate full heritage models. Additionally, the DA carried out could be more exhaustive in order to provide more precise alteration measurements.

Finally, from this literature review, it can be highlighted the importance of the as-built modelling of heritage assets in the cities to perform reliable analysis of their conservation status.

### 3. Case Study: Baelo Claudia Archaeological Ensemble

The Archaeological Ensemble of Baelo Claudia is located in the Ensenada de Bolonia (bay) in Tarifa (Cádiz, Spain), near the Strait of Gibraltar. Figure 1 shows the site location within the geographic context of the region.



**Figure 1.** Location of Baelo Claudia Archaeological Ensemble. Source: own elaboration based on [30].

The oldest archaeological evidence of the pre-Roman settlement in Baelo date from the mid-2nd century BC, prior to its consideration as a Roman municipality [31], when it was named ‘Claudia’ after the Emperor Claudio [24]. The industrial activity in this Hispanic-Roman city was the production of salt-fish, mainly tuna, *garum* and mixed sauces that have been found in amphorae of the Roman republican period [32–34]. This economic development decreased during the second half of the 2nd century AD, but the commercial activities restored the significance of the city from the 3rd to the 4th century. Afterwards, Baelo Claudia began to decline until it was completely neglected in the 7th century [35].

According to Bernal et al. [36], Baelo Claudia is a great example of the implementation of the Roman urban models in the south of Hispania, the Iberian Peninsula. The archaeological and architectural diversity in Baelo Claudia is evidenced by the existence of multiple buildings and infrastructure such as a theatre, a basilica, temples, thermal baths, *macellum*, factory, roads, etc.

Baelo Claudia is located in an area with a low-moderate seismic hazard, but which was affected by energetic earthquakes such as the earthquakes in Lisbon (1755) and in Cape St. Vincent (1969) [37,38].

The Archaeological Zone of Baelo Claudia and its environment were listed as a National Historic Monument in 1925 and delimited in 1991 [39]. It was constituted as the institution ‘Archaeological Ensemble of Baelo Claudia’ in 1989 by the regional government [40].

The judicial basilica of Baelo Claudia is the case study of this research. This courthouse is located in the central area of the Archaeological Ensemble, beside the *decumanus maximus*—the main road crossing the city southeast to southwest [41]—and between *cardo 3* and *cardo 4*, which are the roads facing northeast, and perpendicular to the aforementioned road. There are 18 columns in the basilica—out of



20 that constituted the building in the past—standing aligned, forming a rectangle of approximately 23.3 m × 10 m, with a maximum column height of 5.5 m from ground level.

#### 4. Methodology

As previously stated, the methodology of this paper firstly addresses the as-built digital reconstitution of the columns of the basilica in the Baelo Claudia archaeological ensemble. The modelling methods here presented allow to obtain accurate measurements to be used in the geometric analysis (displacement, distortion and deformations of the columns and their parts), as well as for assessing the structural behaviour. Figure 2 summarises the research methodology.

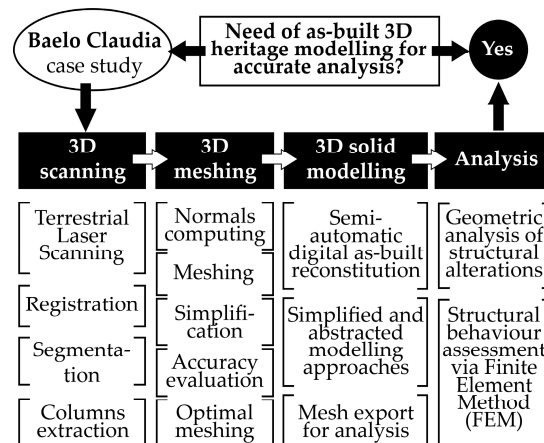


Figure 2. Research workflow.

##### 4.1. 3D Scanning

Given the dimensions and the characteristics of the basilica, the terrestrial laser scanning (TLS) technique was used to capture the geometry of the columns (Figure 3).



Figure 3. 3D scanning of the basilica in the archaeological site of Baelo Claudia.

The device used was the BLK360 3D scanner by Leica Geosystems [42], which has a maximum range of 120 m (60 m radius), a point measurement rate of 360,000 points per second, and the accuracy of 4 mm at 10 m when the highest resolution configuration profile is selected. High dynamic range (HDR) images were also taken in the scanning to map the point cloud and the subsequent 3D meshes of the

columns, although further combination of TLS with photogrammetry would enhance the digitisation of the site when high-quality texture mapping is necessary [15].

No targets were used in the survey for the 19 positions of the scanner, which were strategically defined to ease the alignment, given the sufficient overlap between those positions; i.e., the same columns were captured from different angles. An itinerary as regular as possible was established to minimise errors and point cloud quality decrease [43], in order to ensure the complete geometry capture of the columns, thus avoiding shadows in the lateral column surface due to the occlusion of the laser beam [44]. In the 3D survey, due to technical issues, both the inertial measurement unit (IMU) as tilt sensor integrated into the BLK360 laser scanner and the automatic cloud-to-cloud matching were chosen against GNSS ground control points (GCP) to create the levelled coordinate system. The different scans were imported into Leica Cyclone REGISTER 360 software [45] on a laptop computer through the Wi-Fi network of the scanner so that the alignment of those scans into the same coordinate system could be automatically performed [18]. This registration process [46], carried out using the auto-alignment feature in the software, automatically produced 101 scan links or connections between the different clouds (data from the different scan positions or stations). Certain registration errors were solved by performing automatic cloud-to-cloud matching. The average values in the final scan report of the survey were 81% strength, 54% overlap and 0.006 m bundle or scan group error in the global registration. Figure 4 shows the scan links automatically produced by Leica Cyclone REGISTER 360 to connect the 19 stations (scans) or scanner positions (E-x labels) appearing in the subsequent Figure 5.

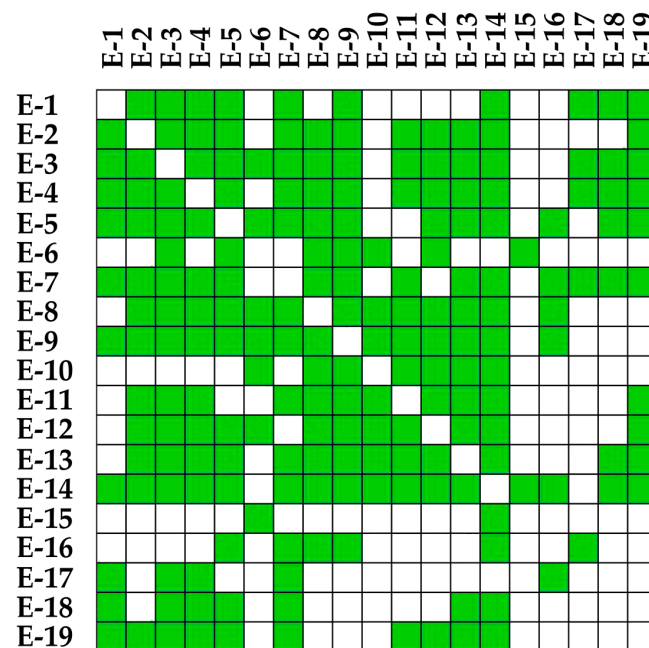
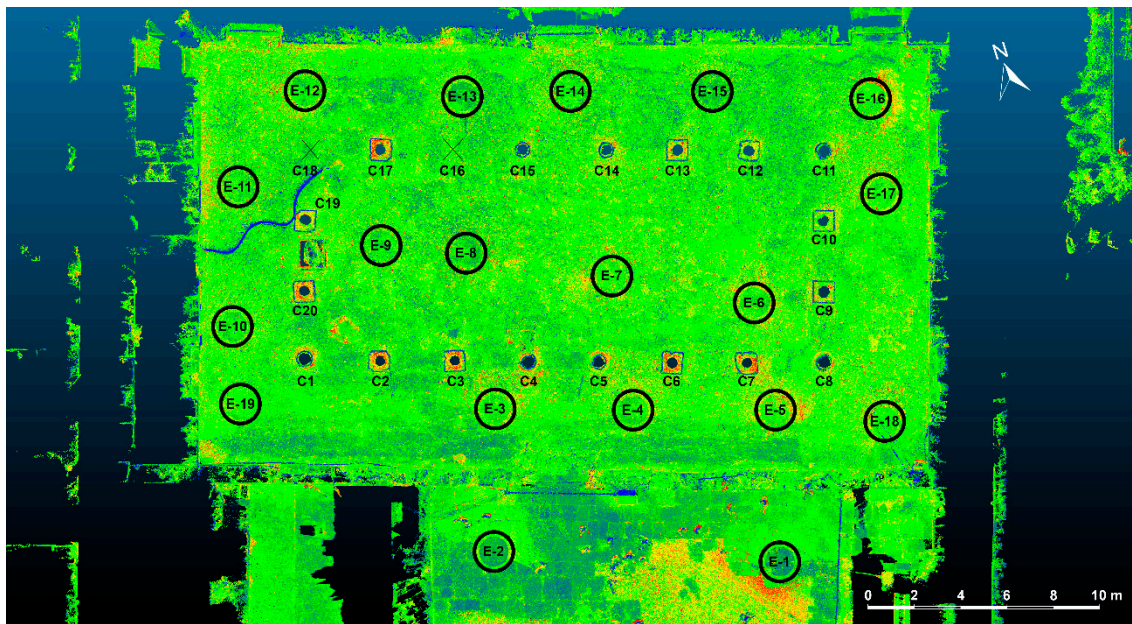


Figure 4. Automatic links between E-x scans.

The result of this process was a massive point cloud containing approximately 426 million points for a total file size of 18.27 GB in PTS format. Figure 5 shows the numbered columns (Cx labels) and scan positions (E-x labels) within a top view of the point cloud of the basilica of Baelo Claudia and its surroundings enhanced with intensities. Naming the columns is essential for the subsequent 3D modelling and analyses addressed in this paper. It is worth saying that columns C16 and C18 are missing, as described above, but their number will be taken into account to maintain a rigorous order in this research. In Figure 5, the distances between the scan positions and the columns can be measured using the graphical scale.



**Figure 5.** Point cloud data site map of the basilica of Baelo Claudia with numbered scan positions and columns.

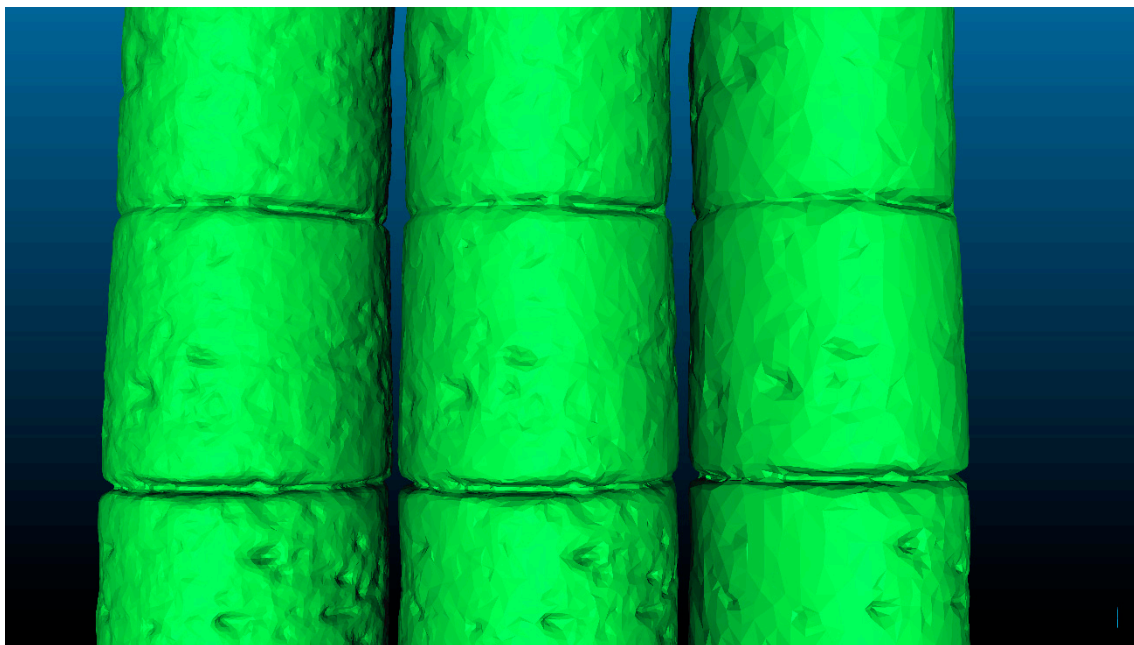
Given the amount of information produced, it was necessary to perform the segmentation [47] of the global point cloud in order to reduce the number of points according to the needs of this research and then select the desired area to study, which was the group of columns in the basilica. For this task, a polygon fence was manually created on the top view to remove the surroundings of the basilica. CloudCompare [48] v2.91 for 64-bit Microsoft Windows was used to perform this manual segmentation. The resulting point cloud contained nearly 160 million points for 12.85 GB, including the ground around the columns. The cloth simulation filter (CSF) [49], integrated into CloudCompare as a plug-in, is a filtering method to detach the ground from LiDAR (light detection and ranging) data. Nevertheless, the lower parts of the column bases in the basilica were also removed with the ground data when using this algorithm. For this reason, further manual segmentation was required to remove the ground, given the fact that both its irregularity and the different levels of the columns' bottom also made it difficult to set elevation thresholds for removal. New fences enclosing the columns allowed their extraction from the global point cloud of the basilica, thus conserving their current coordinates with a view to model and analyse them within their original context.

#### 4.2. 3D Meshing Process and Validation Test

Once the point clouds of the columns have been segmented separately, they must be converted into triangle meshes so as to produce the 3D models for subsequent analyses. It is necessary to distinguish between these meshes—this article refers to them as 3D meshes—and FEM meshes that will be built for the structural analysis. To achieve the 3D meshing, CloudCompare software requires computing the normal vectors [50] of the point clouds. While most of the point clouds provided suitable results in normal orientation, the complexity and noise of some of them may have caused incoherent orientation in this process. In order to produce correct meshes fitting the point clouds, the normals should point outwards from the object's volume [51], thus avoiding inverted normals (inwards). This required modifying the parameters of the computation. The optimal settings were selected by experimentally checking the suitable results of the point cloud orientation. The Plane mode was selected, with the 'Orientation' checkbox activated and six neighbours for each point determined.

At this point, the 3D meshing process takes place. The screened Poisson surface reconstruction by Kazhdan and Hoppe [52], which is included in CloudCompare as a plug-in, generates watertight meshes from oriented point sets (point clouds with computed normal vectors). This Poisson algorithm

is chosen in this paper against other meshing algorithms, such as Marching Cubes [53], included in MeshLab software [54] as a plug-in, since the latter produced an open mesh from a sample point cloud of a column base and excessive noise to build the surface. Moreover, Marching Cubes needed significant time to conduct the meshing in comparison with Poisson (229 s against 29 s for the mesh quality considered in this research), which has greater impact on the entire digital reconstitution of the basilica of Baelo Claudia. The watertight meshing is suitable for the purpose of this research, since the absence of holes in the meshes allows the subsequent creation of closed polysurfaces (3D solids) for the as-built modelling of the columns of the basilica, described in Section 4.3. In the Poisson plug-in, different values of the Octree Depth parameter can be selected; these values entail diverse mesh quality results and number of triangles. Therefore, these aspects are qualitatively and quantitatively assessed in this research to validate the optimal 3D meshing process. High values of Octree Depth produce meshes accurately fitting the point clouds, but this may cause an excessive relief when there is noise in the point sets, which does not represent the actual geometry of the columns. The reason for this can be errors in the registration, where two or more scans overlap with insufficient fit, or caused by the laser beam error, thus producing inaccurate surfaces. In contrast, meshes configured at lower values of this parameter fit the point clouds to a lesser extent, which simplifies the discretisation excessively—the geometry becomes smoother. Nevertheless, although the achievement of mesh accuracy is the aim of this research, a certain degree of simplification is considered to decrease the number of faces (triangles) in order to enhance the processing time and reduce computational efforts in subsequent 3D modelling operations. The mesh simplification consists of reducing the number of triangles in them using specific software, such as Artec Studio 10 Professional [55]. The difference between the simplified 3D meshes is qualitatively shown in Figure 6.



**Figure 6.** Meshing accuracy in column C1: (left) 100,000 faces; (middle) 50,000 faces; and (right) 20,000 faces.

With a view to validate the 3D meshing process and decide the extent of smoothing or simplification, a test is carried out for column C1 meshes, which were produced through the method by Kazhdan and Hoppe [52] in CloudCompare. To do this, a quantitative analysis of the meshing accuracy firstly compares the main features of the meshes: (i) number of vertexes (points of the clouds/meshes); (ii) number of faces (triangles, polygons); (iii) surface (area) of the meshes; (iv) average surface of their triangles; (v) volume of the meshes; and (vi) standard deviation. Secondly, it is studied the deviation

between the meshes or clouds corresponding to the different simplification degrees. As a result, the optimal parameters of the 3D meshing process can be set. The results of this validation test are gathered and explained in Section 5. Results.

### 3D Mesh Treatment

Apart from reaching the simplification extent as described above, Artec Studio is used to optimise the 3D meshes by performing the following processes:

- Manual removal of polygons out of context, including sectors whose deformations will not be analysed, such as the remaining ground surrounding the column bases.
- Automatic watertight close of meshes with holes as a result of the aforementioned task.
- Checking of mesh defects due to triangulation errors (for instance, duplicate points and faces, naked edges, inverted normals, etc.).
- Manual brushing of visible imperfections such as bridges connecting opposite surfaces or sharp shapes. This may be caused by heterogeneous density of points in the cloud prior to meshing.

Finally, although the remeshing produces an isotropic mesh, i.e., the size and distribution of the triangles become more homogeneous, it was discarded from this research in favour of the original (simplified) meshes. The reason for this are the significant processing time that is required, the increase in the number of triangles, the consequent smoothing and, therefore, the loss of geometry relief despite that increase.

### 4.3. Digital Reconstitution: Solid Modelling

The aforementioned geometric analysis objective implies the need of working with separate drums and joints between them. Dealing with solid models rather than 3D meshes eases the use of Boolean operations to divide the original one-piece column into different parts. To achieve this, two processes of the semi-automatic modelling procedure as described by Antón et al. [3] within the environment of Rhinoceros V5 software [56] are firstly conducted: (1) check the integrity of the meshes, although there should not be any inconsistency, since this was already tested in Artec Studio when producing the optimal meshes; and (2) convert the watertight meshes into closed polysurfaces (solid objects).

Secondly, this paper includes manual and automatic processes to divide the complete solid column for the subsequent detailed analyses. The division of these polysurfaces is carried out by creating cutting surfaces from points inserted by the upper and lower bases of each drum near the joints. Concerning the joints between drums, the capture of their geometry was not possible in the 3D survey, since the level of the scanner was lower than that of the joints hidden between higher drums, causing shadows in the point cloud [44]. Hence, it is decided to define the volume of the joints considering the cutting surfaces previously modelled and a cylinder between them. The centre of this cylinder is the centroid calculated from the surfaces. Then, it is necessary to subtract from the cylinder the volume intersecting the drums, which is performed through the Boolean split operation. Figure 7 shows the process to obtain separate drums and model joints as explained above—the six detailed figures focus the same area by the northern side of the third mortar joint of column C1 (lower joint of the right image in Figure 7).

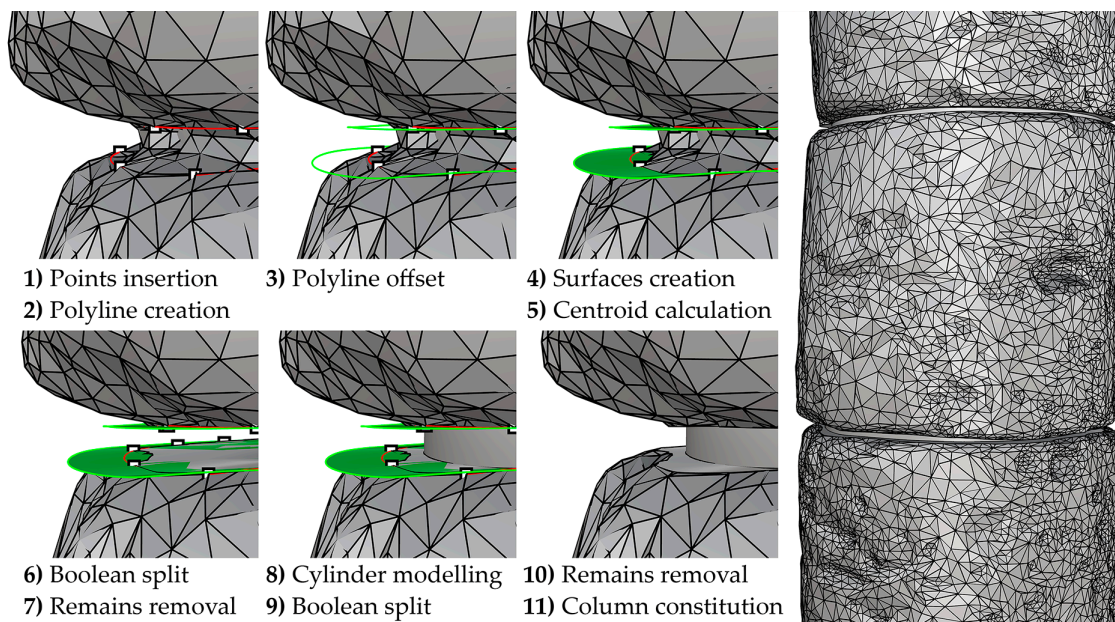


Figure 7. Drum splitting and joint modelling processes in column C1.

This drum splitting process can be semi-automated using a simple script within Grasshopper [57] (build 0.9.0076) environment. Grasshopper, a visual programming language for Rhinoceros 5, is a plug-in that allows intuitively creating algorithms, based on the workspace of Rhinoceros to operate the 3D model in real-time. The following script (shown as a diagram in Figure 8) was created ad hoc in this research to reproduce the processes explained above, conducted to divide the columns into parts (drums).

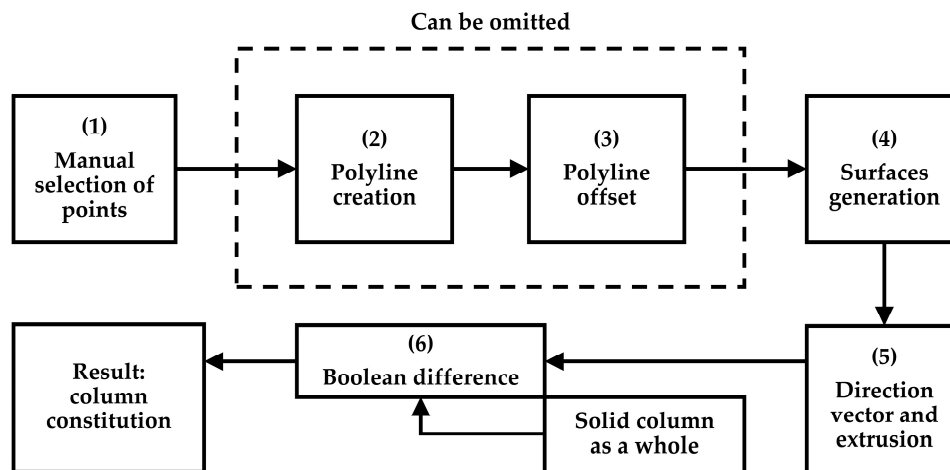


Figure 8. Column splitting procedure.

The script performs the following semi-automatic algorithm: (1) selection of points manually inserted on the drum edges near the joints; (2) polyline creation from those points; (3) polyline offset; (4) drum base surfaces generation; (5) surface extrusion along a given direction; and (6) Boolean difference (subtraction) operations from the entire solid column with the extrusion as an operator. Steps 2 and 3 can be omitted, since the points in step 1 can be ‘patched’ as well to produce surfaces. In order to complete the splitting process for the rest of drums, it is necessary to select the rest of the points on the drum bases and repeat the steps. The application of this script to all the columns of the basilica should save significant time in their digital reconstitution.

In this paper, it is assumed that modelling minor elements such as the joints between drums as simplified entities should not have great impact on the structural simulation, when compared to the

actual geometry of the joints on site. It is also worth noting that the use of Boolean operations produces uniform and accurate contact surfaces connecting the parts, which is essential for the structural behaviour assessment [58].

Once all the processes for the 3D meshing and solid modelling of the columns and their deformations are completed, the digital reconstitution of the basilica through as-built models can be displayed (Figure 9).

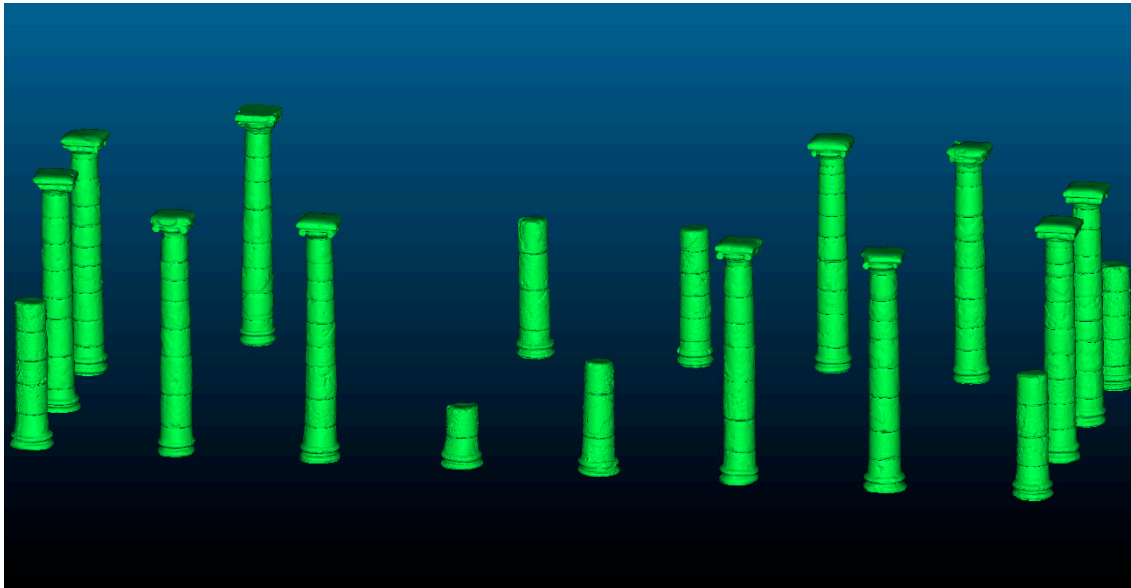


Figure 9. Digital reconstitution of the basilica in the Archaeological Ensemble of Baelo Claudia.

Additionally, additional modelling methods in Rhinoceros are presented to achieve the third specific objective of this research, which is to evaluate the suitability of different modelling approaches by assessing their structural behaviour. These approaches are implemented for the most unfavourable column (C19) (see Figure 5 to locate the column). The enquiry into which column is the one with greater displacements and distortions is based on the methods described in Section 4.4. Geometric Analysis. The complete results are gathered in Table S1: Displacements and distortions in columns in Supplementary Materials.

Prior to undertaking the modelling processes, it is necessary to calculate the centroids of the drum bases in the as-built model in order to maintain the exact position of the drums and the joints in both simplified and ideal models. To do this, these bases (surfaces) must be extracted from the drums. Subsequently, the base centroids needed are calculated from those surfaces.

On the one hand, the *simplified approach* is described. This method considers horizontal joints and drum displacements with respect to the vertical axis of the column, following traditional measurements:

1. To generate three horizontal sections of the drum: one in the middle of its height to extract its general diameter; two for its lower and upper bases, respectively, to represent the diameter reduction and produce horizontal joints.
2. To insert multiple points in the curves (divide the curves).
3. To automatically draw a circumference fitting those points.
4. To clone the middle section (circumference) to where the diameter changes with respect to the general diameter of the drum, so that the drum can be modelled as following traditional measurements.
5. To match the direction of all circumferences to establish a coherent set of curves.
6. To create an open fitting transition with automatic seam point orientation, straight sections, and 10 control points, selecting the circumferences at the top, bottom and the two curves where the diameter varies (four circumferences in total).

7. To close the transition by covering the holes at the bottom and the top of the drums with planar surfaces to obtain closed polysurfaces (solid objects).
8. To create cylinders in the joints as for the standard joint modelling method presented above, taking the base centroids as the cylinders' centres, and their height larger than the space in the joint. To perform Boolean subtractions to remove the volume that exceeds the bases and intersects the drums.
9. To section the original column capital to extract the average dimensions of the top (rectangle), middle part and bottom (circumferences), and model using primitive geometries accordingly. To perform Boolean subtraction to remove part of the volume that is missing in the capital.

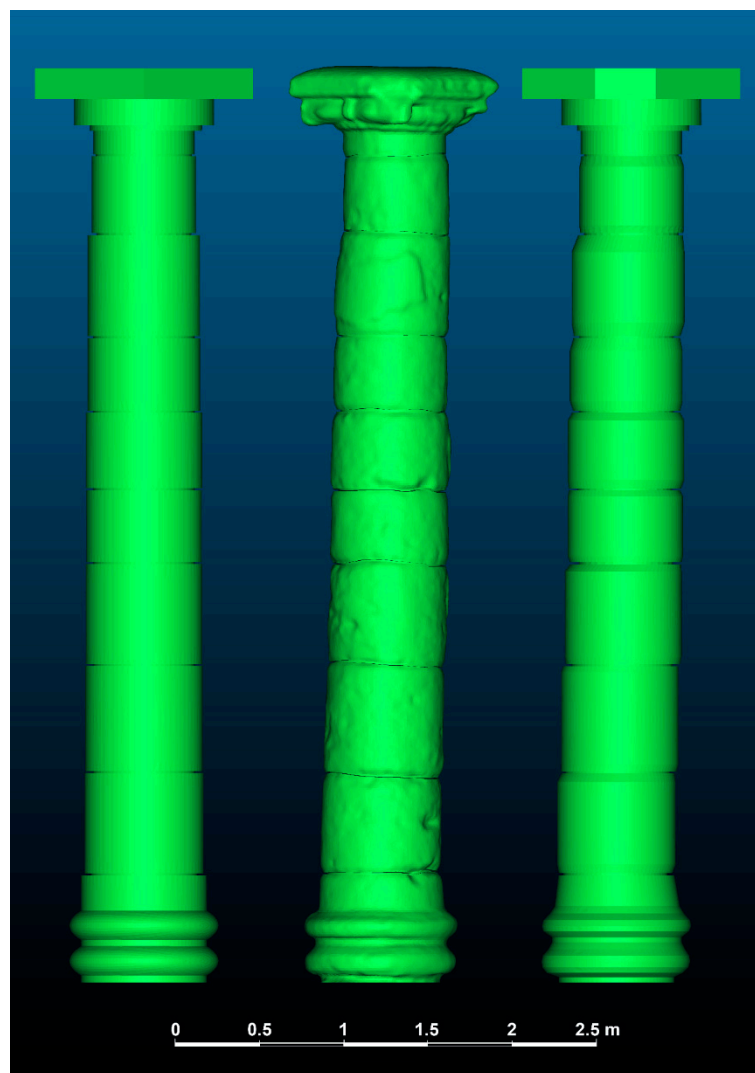
On the other hand, the *ideal approach* without displacements is explained:

1. To create three equidistant horizontal sections dividing the height of the drum into four parts.
2. To generate the average/characteristic section (curve) from the three curves above two by two, matching the original ones.
3. To insert multiple points in the curve (divide the curve).
4. To automatically draw a circumference fitting those points.
5. To create a planar surface from that circumference.
6. To extrude the surface towards the base centroids to obtain the height of each drum, thus producing horizontal joints between them.
7. To create cylinders in the joints, taking the base centroids as the cylinder's centres, and their height larger than the space in the joint. Perform Boolean subtractions to remove the volume exceeding the bases.
8. To section the original column capital to extract the average dimensions of the top (rectangle), middle part and bottom (circumferences) and model using primitive geometries accordingly.

Figure 10 shows the unfavourable column (C19) modelled following different approaches: (i) the as-built column through the semi-automatic procedure proposed; (ii) the simplified model using sections by the base centroids to create transitions; and (iii) the ideal column built with transitions along the vertical axis.

Finally, the drums and joints are separately exported as STL 3D mesh format for subsequent import into ANSYS ICEM CFD 18.0 [59] to produce the FEM mesh in order to perform the structural analysis on the columns. As abovementioned—in Section 4.1. 3D Scanning—by following the proposed modelling procedure, each individual object maintains its coordinates within the same system. That eases the import procedure, since the location of the elements is automatically defined.

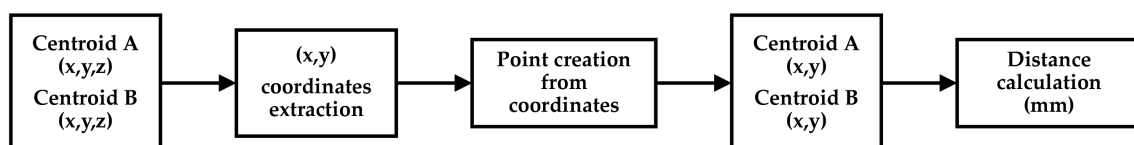




**Figure 10.** Digital reconstitution of the column C19: (left) ideal model; (centre) as-built model; (right) simplified model.

#### 4.4. Geometric Analysis

This section is intended to achieve the second objective of this paper about analysing the displacement, distortion and deformations of the columns. Although the methods to extract these geometric data from the as-built models are described throughout this section, Grasshopper was also used for the calculation of the distance between the points (centroids) analysed in the drums. The Euclidean distances [60] between these points are calculated in vector space  $R^2$  and gathered in Table S1 (Supplementary Materials). The ensuing Grasshopper script (shown as a diagram in Figure 11) automates the calculation of the Euclidean distance:



**Figure 11.** Euclidean distance calculation for geometric analysis.

This simple script was also created ad hoc in this research to measure the displacement and distortions in the drum bases and their volume centroids, respectively, in order to geometrically analyse

the columns. Being intended to avoid the time-consuming manual task of measuring the distances one by one, the script performs the following semi-automatic algorithm: (1) point selection (manual); (2) extraction of X and Y coordinates; (3) creation of subsequent points on the XY plane; (4) Euclidean distance calculation; and (5) result. Basically, this procedure avoids the Z coordinate to compute the distance between those two points translated to the XY plane, given the fact that the displacements and distortions are measured in the top view.

Finally, it is also worth mentioning that the accurate modelling of the columns in the basilica allows the calculation of the surface of the 3D meshes and their average triangle area, as well as the volume of all the drums. Considering the density of the materials, the volume is essential to calculate the mass of the different drums by following Equation (1):

$$m = dV, \quad (1)$$

where  $m$  is the mass of the element in kg,  $d$  accounts for the density in  $\text{kg/m}^3$ , and  $V$  is the volume in  $\text{m}^3$ .

The surface and volume of all the drums are gathered in Table S2 (Supplementary Materials).

The specific approaches to perform the geometric analysis are described in the following Sections.

#### 4.4.1. Displacements of Columns and Drums

The global displacement of the columns is calculated considering the centroids of the upper side of the column base and the lower base of the column capital. This procedure provides the displacement of the column axis at the top—the extent the column capital shifts from the base. Therefore, given the fact that the columns without capitals (C1, C4, C5, etc.) are not complete since they lack several drums, the general displacement calculation is not addressed in these cases. In addition, the particular displacement between the upper and lower bases of each drum is determined considering their respective base centroids.

Following a non-algorithmic measurement method as in the script (Section 4.4), the displacement could be calculated either mathematically using the coordinates of the centroids—this is essentially the aim of the script, measuring the distance between them on the horizontal plane—or geometrically by creating a vertical axis from the first centroid and measuring the distance perpendicular to it from the second point.

#### 4.4.2. Distortions of Drums

The geometric analysis also comprises the distortion calculation of drums with respect to the vertical axis of the ideal column without deformations. To do this, both as-built and ideal columns are aligned by taking the column bases' upper base centroids as a reference. In this way, the two column versions are placed in the same coordinate system. The developed Grasshopper script can also be applied to calculate the distance (distortion) by selecting the specific centroid and any point in that axis as a reference. Similarly, the mathematical and geometric approaches are able to measure the distance perpendicular to the ideal axis from each centroid, thus calculating their distortions. However, the drum distortion of the column capitals was not considered, given the impossibility of capturing their upper base with TLS and, therefore, of modelling them accurately. In this way, calculating the volume centroid of the capitals would entail significant errors. The distortion measurement of their lower bases is approximated instead.

In addition, it is worth considering the distortions of the drums in relation to the drums that are located below, which constitutes the eccentricity of these parts. The calculation using the script is simple, since it only requires selecting the volume centroid of each drum to display the distance between them on the XY plane. This provides a direct insight into which drums shift the most from each other.

#### 4.4.3. Deformations of Drums

The surface deformations of the drums are also quantitatively analysed. This is carried out for the unfavourable column C19, which is studied in detail. As seen in Figure 10, the as-built models take into account the deformations of the columns, whereas the ideal modelling approach considers surfaces based on primitive geometries but containing their overall dimensions. In this way, the analysis of different sections of both models for each drum provides an insight of the irregularities of the as-built surface and, thus, allows the identification of parts to be restored. To do this, both models need to be aligned. The proposed methodology for the digital reconstitution guarantees that all the elements of the basilica maintain their original position within the same coordinate system. The alignment of the as-built drums is then automatically performed. However, the ideal modelling was conducted separately to ease the workflow. Therefore, it is necessary to align the ideal drums with the as-built components drum by drum, as if there is no distortion with respect to the vertical axis. The volume centroids of the as-built drums and the centre of the ideal sections (circumferences) are aligned. The horizontal sections of the drums are created in three levels—lower, middle, and upper—and named accordingly, but in the case of the more complex column bases, for which a second middle section is given. The deviation of points within the curves (sections) is analysed. These points can be directly extracted from the polysurfaces (solids), but it is considered that the insertion of 32 points on the as-built sections allows a clear interpretation of the deformations. These points, numbered and aligned with the quadrant of the ideal sections, ease the identification of weak parts in the drums.

Subsequently, the distance between the sections aligned is measured. These curves intersect with each other, because the as-built sections are not regular. With a view to distinguish between areas where the points in the as-built section are located either under the ideal section—negative distances ( $x < 0$ ) are considered—or over it—positive distances ( $x > 0$ )—it is worth splitting the as-built curve with the ideal one. Then, the minimum and maximum distances between them, respectively, are computed.

In addition, the general deviation between both sections is calculated in Rhinoceros. The distances from the points inserted in the as-built curve to the ideal curve (circumference) are analysed in order to obtain statistical measurements on the drum deformations, such as the average, the median and the standard deviation.

The deformation analysis of all the sections in column C19 are collected in Figure S2 (Supplementary Materials).

#### 4.5. Structural Modelling and Analysis

In order to determine the column structural performance, focusing both on the accuracy and suitability of the geometric model, static and modal analyses are carried out on the 3D models by means of FEM. The numerical meshes are generated with the software ANSYS-ICEM v.14 [59] and the finite element software ANSYS [61] is used to build the numerical models and to analyse the structural performance.

These numerical analyses are prior and crucial steps aimed at controlling the structural response, and they allow for:

- Understanding the general structural behaviour;
- Detecting structural weaknesses;
- Obtaining the main dynamic properties;
- Determining the accuracy level of the different geometric models.

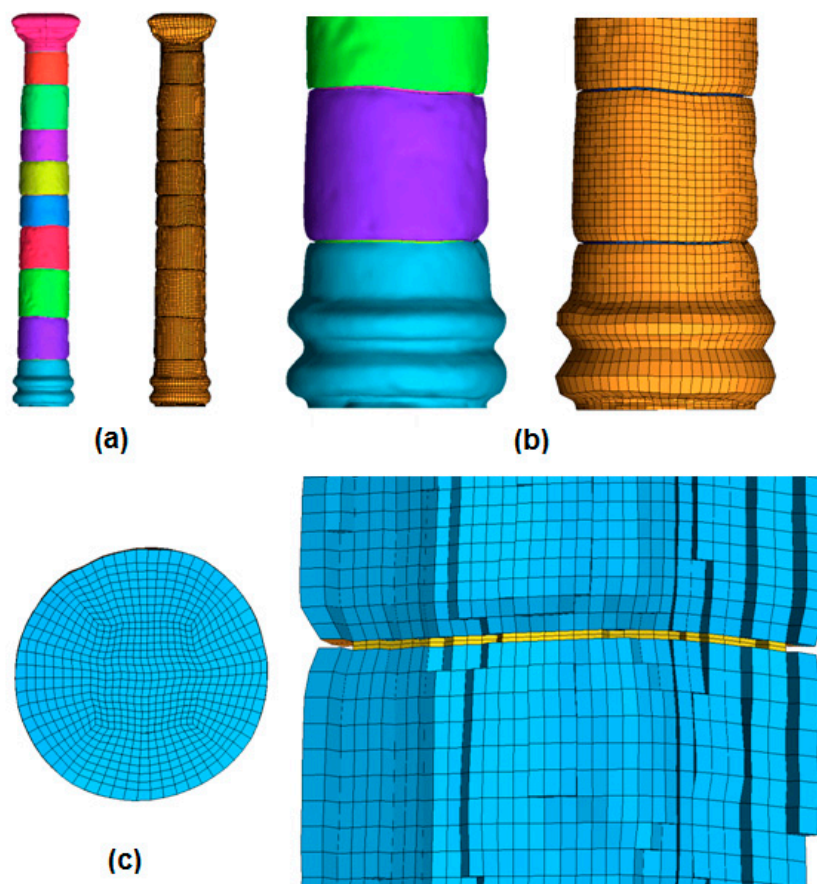
##### 4.5.1. 3D FEM Mesh Generation

For the objective of FEM modelling, column C19 has been meshed with hexahedral elements with the software ANSYS-ICEM CFD hexa [59]. The geometry in STL format has been imported from the output of Rhino software, as described in Section 4.3.

As explained for Figure 10 in Section 4.3, three different geometries have been modelled (their names have been adapted to the common structural terminology):

1. As-built model: the real geometry as obtained with the laser measuring system (Figure 10, centre).
2. Simplified model: the geometry as can be measured by conventional measuring methods (Figure 10, right, where leaning is accounted for, but neither distortion nor geometry imperfections).
3. Ideal model: the geometry representing an ideal column, without any damage, distortion or leaning (Figure 10, left).

Regarding the as-built model, a general view of the imported geometry and resulting surface mesh is depicted in Figure 12a, with a detailed view in Figure 12b. Figure 12c presents the internal 3D mesh (slice plane and detail of a front view). The O-grid topology was used to correctly mesh the cylindrically-shaped geometry with an appropriate mesh quality (see Figure 12c).



**Figure 12.** Column C19. (a) General view of the imported geometry and surface mesh. (b) Base detail. (c) Slice plane view of the 3D hexahedral mesh (yellow elements represent the mortar joint between drums).

Column C19 has been meshed with a total of 174,360 hexahedral elements (153,284 nodes). The number of mesh elements in the height of each drum is 20, as well as in the capital and base. Two elements were used for the height of the mortar joint thickness, where the average height of the mortar thickness is 12 mm. The average hexahedral element face angle is above  $75^\circ$ , but due to the complexity of the capital (in particular in the as-built geometry), a few elements with smaller angles are present, featuring a minimum value of  $18^\circ$ . The minimum aspect ratio of the mesh elements (size of the minimum element edge divided by the size of the maximum element edge) is 0.05, and the minimum skewness is 0.15. Highest mesh expansion factor is 45. The average mesh resolution ( $\Delta_x$ ) is 3 mm, which is ensuring an appropriate mesh refinement for the structure under analysis. It must be considered that the mesh resolution is having an impact on the FEM results and, thus, a mesh

independence study is generally required for ensuring accurate FEM results. All three geometries were meshed with the same parameters and, therefore, the number of elements and nodes, and the overall mesh resolution are the same for all the modelled geometries.

#### 4.5.2. 3D FEM Structural Modelling and Analysis

After modelling the three 3D FEM mesh (as-built, simplified and ideal), 3D FEM structural models are built, and the three column models are numerically tested and compared.

Three-dimensional eight-node solid elements, SOLID 65, are implemented within the mesh. The SOLID 65 element comprises eight nodes, having three degrees of freedom at each node: translations in the nodal  $x$ ,  $y$ , and  $z$  directions.

The structural numerical analyses are carried out under gravity loading. The structural performance is analysed in the linear range, focusing on the ultimate limit state verification. Although, the nonlinear approach is the reference analysis for comprehensive safety assessments, the linear range makes possible to obtain significant data from both a qualitative and a general quantitative perspective [62,63]. Additionally, the linear analyses are the preliminary and necessary steps for future comprehensive assessments under dynamic loading and aging phenomena [64]. Taking into account the main scope of this work, the data provided by the linear range are of special interest.

A macro-model with homogenized properties is implemented into the mathematical formulation. A smeared model is assumed, considering that the structural materials are initially isotropic until either one of the tensile or the compressive strength are exceeded. Thus, stone units, mortar and interfaces are smeared out in the continuum, and the damage pattern is inserted in the model by adjusting the stress-strain matrix.

The material control parameters of the 3D-solid models are determined on the basis of the material properties that were obtained in previous research [24,65]. The structural materials are calcarenite stone (capital, base and drums) and lime mortar (joints). From the aforementioned, the specific weight  $w$  is equal to 21,000 N/m<sup>3</sup>, the Young modulus  $E$  is equal to  $2 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>, and the Poisson ratio  $\nu$  is equal to 0.2.

As far as boundary conditions are concerned, the base of the C19 column is completely constrained.

In order to verify the ultimate limit states, static analyses are performed, following the Eurocode prescriptions [66]. In addition, modal (eigenvalue) analyses are also carried out in order to obtain the dynamic properties—natural frequencies,  $\omega_n$ , and modal shapes,  $\zeta_n$ .

After performing the numerical analyses via FEM, the compliance factor  $\alpha$  is obtained. With that factor, the resistance or the deformation capacity (related to the ultimate limit state, in correspondence to the compressive strength values) is proportioned to the gravity loading effects ( $\alpha = R/D$ ). If the compliance factor  $\alpha$  reaches a value larger than or equal to one, the safety requirements are completely fulfilled.

In addition, the stress-strain gradients are compared, as well as the maximum value variations (in terms of stress-displacement fields) among the models. The  $\alpha$  factor and the comparative analyses provide valuable data both on the accuracy and suitability of each model.

## 5. Results

The outcomes deriving from the different sections containing quantitative data are presented here by following the structure of the methodology: (i) 3D meshing and its evaluation; (ii) geometric analysis, comprising the calculation of displacements, distortions and deformations of columns and drums; and (iii) structural behaviour assessment of the three modelling approaches for the most unfavourable column.

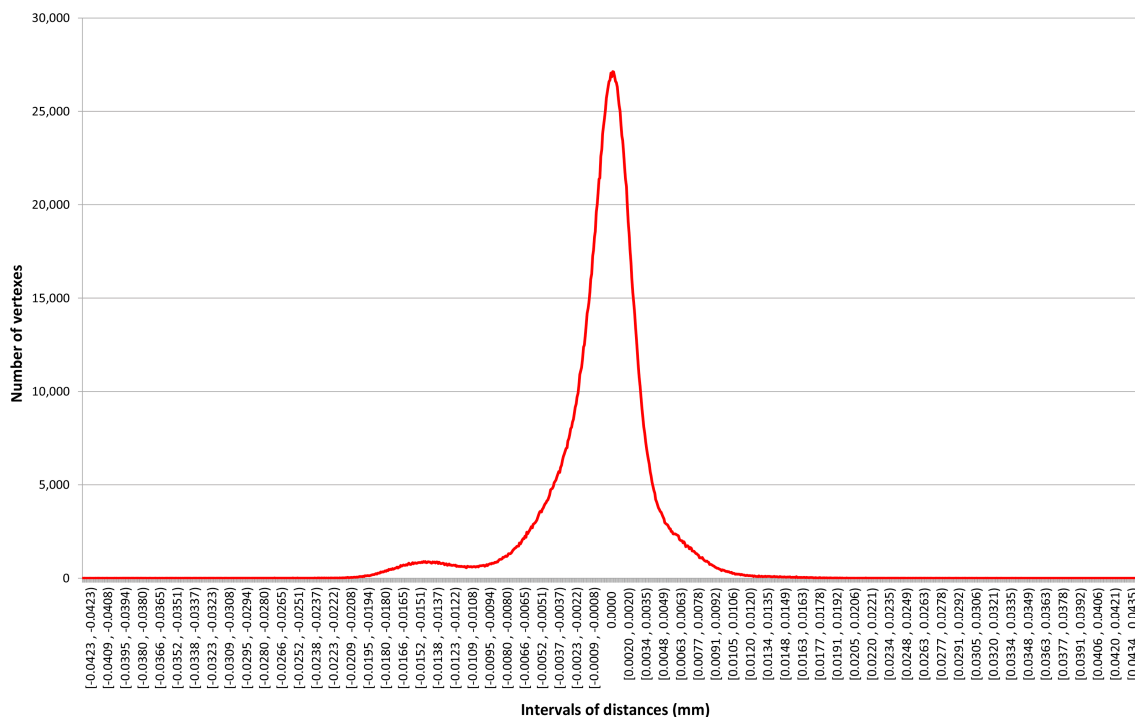
### 5.1. 3D Meshing Process Validation Test

The validation test of the 3D meshing process explained in Section 4.2 constitute a quantitative analysis of the features of the original column meshes—those produced directly from the point cloud—the meshes simplified to diverse degrees, and the original point cloud (Table 1).

**Table 1.** Quantitative analysis of the meshing accuracy in column C1.

Object	Octree Depth	Number of Points	Number of Faces	Mesh Surface (m <sup>2</sup> )	Average Triangle Surface (m <sup>2</sup> )	Mesh Volume (m <sup>3</sup> )	Standard Deviation (Points)
Mesh 0	8	62,520	125,040	12.163	$9.727 \times 10^{-5}$	1.582	136.895
Mesh 1	9	257,188	514,392	12.693	$2.468 \times 10^{-5}$	1.612	4432.056
Mesh 2	9 simplified	49,992	100,000	12.655	$1.265 \times 10^{-4}$	1.612	239.839
Mesh 3	9 simplified	24,992	50,000	12.617	$2.523 \times 10^{-4}$	1.611	57.926
Mesh 4	9 simplified	9992	20,000	12.535	$6.268 \times 10^{-4}$	1.607	10.639
PointCloud	–	2,013,465	–	–	–	–	–

The mesh features gathered in Table 1 are calculated using CloudCompare, except for the standard deviation, which accounts for the dispersion of points with respect to the distance intervals in the subsequent Figures 13–15. From the table, given the significant geometry loss in terms of surface and volume of meshes 0 and 4, these degrees of smoothing and simplification, respectively, are dismissed. The digital reconstitution of the basilica according to those parameters would produce columns with excessive simplification. On the other hand, higher Octree Depths such as level 10 onwards produced an excessive number of triangles and vertexes—level 11 created more points than those existing in the original point cloud—as well as noise on the column surface, thus reducing the mesh quality as the same time as the computational resources demand in processing, subsequent modelling and FEM meshing, and visualisation increases. For this reason, it is worth presenting the meshing accuracy of mesh 1 approach (Octree Depth 9), which is used in this research to produce the meshes to be later slightly simplified with a view to reduce the computational effort during the digital reconstitution. This is calculated using the cloud-to-mesh feature in CloudCompare to determine the deviation between the original point cloud and mesh 1 for the sample column C1 (Figure 13).



**Figure 13.** Meshing accuracy: point deviation in comparison with the original point cloud.

In addition, the deviation between points of the simplified meshes 2 and 3 is respectively analysed in relation to the original mesh (1) (Figures 14 and 15).

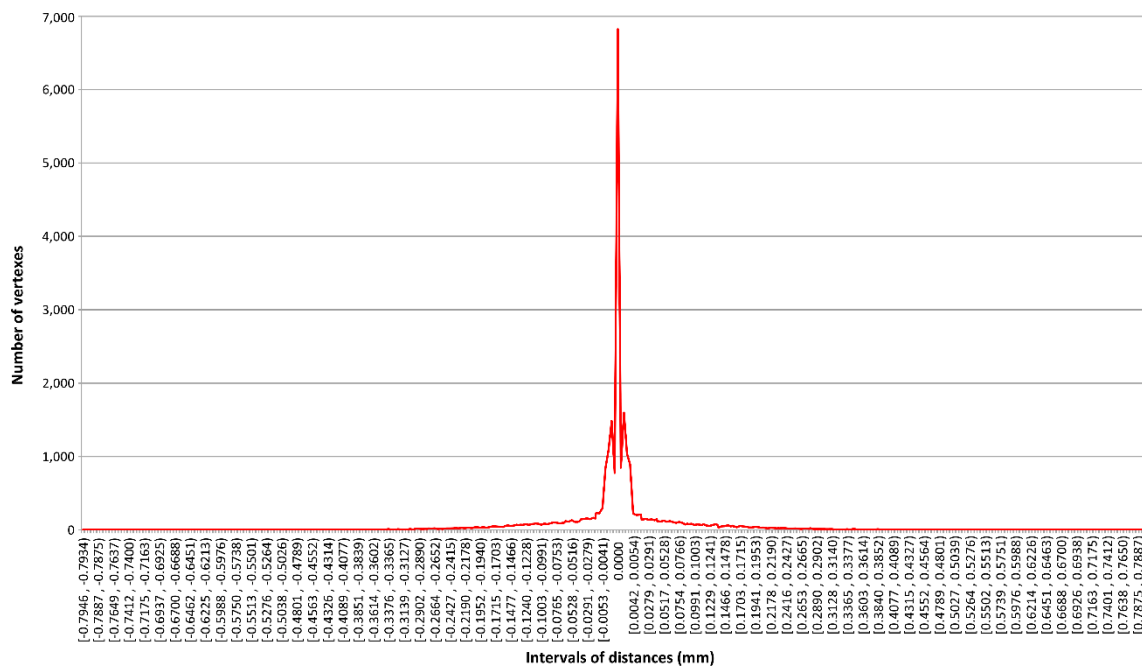


Figure 14. Point deviation in comparison between mesh 1 and mesh 2.

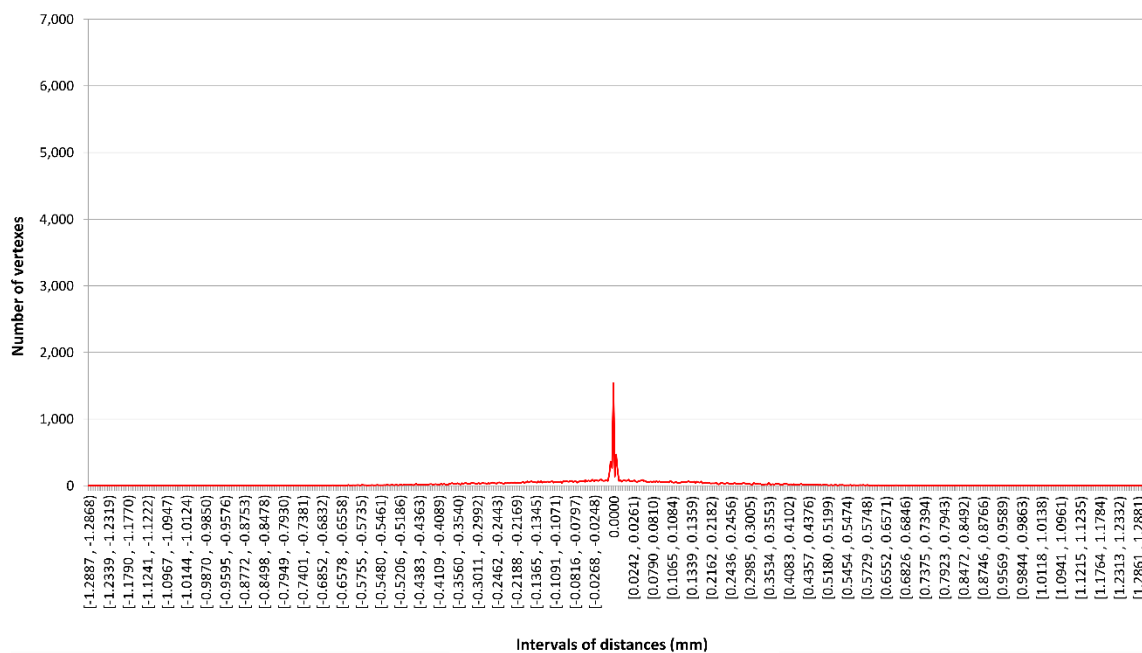


Figure 15. Point deviation in comparison between mesh 1 and mesh 3.

The abscissa axis in these graphs represents the point deviation between the 3D meshes (or between meshes and point clouds) divided into intervals. The ordinate axis shows the number of points or vertexes contained in those intervals. The high number of points in the central value (zero) indicates the null distance between homologous points of both meshes (or comparing a point cloud and a mesh), which means that the 3D objects compared are similar. Additionally, as explained by Ant3n et al. [3], lower values of the standard deviation mean less similarity between the compared and the reference meshes, whereas higher values account for greater similarity. The deviation graphs complement the standard deviation to show the location of the majority of points (zero value). The standard deviation, as a dispersion measurement statistical tool, is considered valid in this research to evaluate the similarity between the 3D objects since the compared simplified meshes derive from the reference meshes (or

original point cloud as for mesh 0), given the simplification process required to produce the meshes (or smoothening through different Octree level). On the one hand, in order to analyse the meshing accuracy in this research, both the geometric features in Table 1 and the highest standard deviation of mesh 1 from the original point cloud (4432.056 points) in comparison with mesh 0 (Octree Depth 8) indicate the suitability of the former meshing approach. Moreover, the geometric features of mesh 0 are poorer than those of mesh 2 (mesh 1 simplified). On the other hand, meshes 2 and 3 are compared. The scale is constant in both graphs to ease comprehension. A higher similarity between meshes is more evident in Figure 14, since the points in Figure 15 are more dispersed; in the former (mesh 2), the standard deviation is 202.23 points when interpolating the zero value in the intervals, while in the latter (mesh 3), the standard deviation decreases to 49.23 points. In addition, considering the extreme intervals in both cases, the highest deviation of mesh 2 (maximum distance between the compare and reference meshes) is 0.89 mm, while mesh 3 reaches 1.49 mm in relation to the original mesh 1. These results show the inaccuracy of mesh 3, which is not considered for modelling in this work. It is also worth noting the difference between the point-cloud-to-mesh (Figure 13) and mesh-to-mesh (Figure 14) deviation graphs. There are more points in the intervals surrounding the zero value in the point cloud meshing (mesh 1 from point cloud, in Figure 13) than in those of the mesh simplification (mesh 2 from mesh 1, in Figure 14). Finally, taking into consideration the outcomes from this 3D meshing process validation test, it can be stated that the simplification degree for mesh 2 (from Octree Depth level 9) is optimal to model the deformations and the columns in the basilica, although the number of points should be proportionally defined according to the number of drums in the columns. In the case of C1, which has 5 drums, the total of 100,000 triangles per column leads to set a simplification threshold at 20,000 triangles per drum for accurate column modelling in the case study.

## 5.2. Geometric Analysis

### 5.2.1. Displacements and Distortions of Columns and Drums

The results of the geometric analysis regarding displacements and distortions calculation of all the columns and their drums as in Section 4.4.1. and Section 4.4.2. are gathered in Table S1 (Supplementary Materials). A colour scale is jointly applied to the displacement and distortion values of all the columns and drums, so that the greatest centroid deviations—the greatest drum alterations—can be individually, easily identified within the whole context of the basilica. The outcomes of the enquiry into the displacements and distortions of the as-built models reveal the unfavourable column (C19), to which both the deformations analysis and structural behaviour assessment are addressed. The global displacement of this column and the average distortion of its drums are calculated and given in Tables 2 and 3.

**Table 2.** Displacement analysis.

Column	Part/Drum	Displacement (mm)
C19	1 base	–
	2	17.56
	3	28.19
	4	26.41
	5	12.54
	6	11.70
	7	2.53
	8	25.73
	9	2.33
	10 capital	–
	Global	109.65



**Table 3.** Distortion analysis in column C19.

Drum	Centroid	Distortion (mm)
2	Inferior	1.06
	Volume centroid	8.53
	Superior	17.96
3	Inferior	18.42
	Volume centroid	26.54
	Superior	42.88
4	Inferior	43.42
	Volume centroid	55.48
	Superior	68.98
5	Inferior	69.53
	Volume centroid	71.69
	Superior	71.59
6	Inferior	71.35
	Volume centroid	78.35
	Superior	82.70
7	Inferior	81.40
	Volume centroid	84.08
	Superior	83.93
8	Inferior	85.26
	Volume centroid	92.65
	Superior	109.86
9	Inferior	111.10
	Volume centroid	113.37
	Superior	108.82
—	Average	66.62

The results of the eccentricity analysis of drums—distortion of the drums in relation to the parts below—are also given (Table 4).

**Table 4.** Eccentricity analysis in column C19.

Drum	Element	Distortion Below (mm)
2	Volume centroid	14.28
3	Volume centroid	19.30
4	Volume centroid	29.24
5	Volume centroid	19.00
6	Volume centroid	7.81
7	Volume centroid	5.85
8	Volume centroid	10.80
9	Volume centroid	23.91
—	Average	109.65

On the other hand, the top-view representation of the complete as-built columns—those with capital—enables the displacement analysis. The as-built columns' tilt is calculated against the ideal, vertical axis. The considered centroids are the same as in the calculation of the global (red line) and particular displacements (black lines): the upper side of the column base, each drum base (numbers), and the lower base of the column capital (see Figure 16).

The representation of the displacements of all the complete columns and their drums as in Figure 16 are gathered in Figure S1 (Supplementary Materials).

Selecting all these points (base centroids) in the column, it is possible to calculate the graphical linear regression ('LR' green segment in Figure 16) from them in Rhinoceros. This provides an approximated insight into the direction of column leaning. On this basis, according to the orientation

of the archaeological site given by Fincker et al. [41], the azimuth of the global leaning of the columns with capitals can be calculated taking the south direction as a reference. This is shown in Table 5.

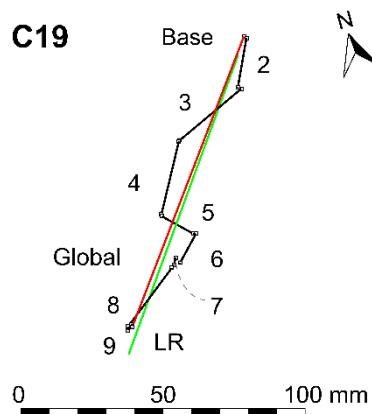


Figure 16. Displacements representation of column C19.

Table 5. Leaning orientation of columns.

Column	Orientation	Azimuth (from South) (°)	Global Displacement (mm)
2	Southwest	-26.99	71.94
3	Southwest	-7.75	38.54
6	Southeast	14.99	20.11
7	Southwest	-21.24	45.22
9	Southeast	44.80	19.89
10	Southeast	62.40	25.22
12	Southwest	-43.54	17.25
13	Southeast	58.00	13.18
17	Southeast	41.49	66.64
19	Southwest	-39.64	109.65
20	Southwest	-37.14	92.18

It is worth noting that all the considered columns lean towards the coast, six of them especially to the southwest, whereas five lean southeast.

### 5.2.2. Deformations of Columns

Concerning the drum deformations, the results of the Section 4.4.3 are shown in Figure 17, focusing on a representative section in column C19. The deformation analysis of all the sections in column C19 are collected in Figure S2 (Supplementary Materials).

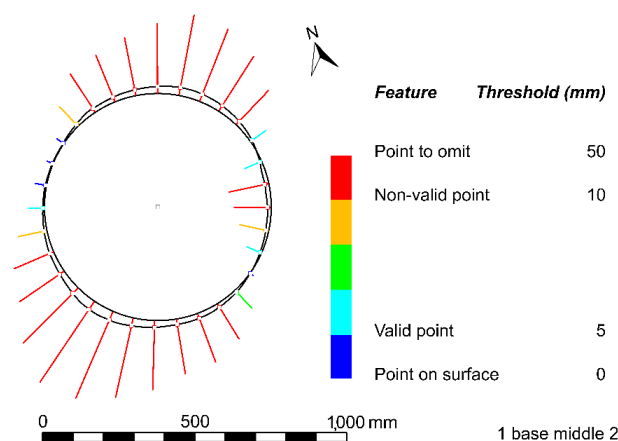


Figure 17. Deformation analysis of the upper middle section in the column C19 base.

The extension of the colour scale depends on threshold values to be set according to the criteria of the specialists. In this research, considering the width or diameter of the columns, the mean and median distance, as well as the standard deviation obtained from the deformation analysis in Rhinoceros, the thresholds are set to 5 mm and 10 mm for the valid and non-valid points in the as-built sections, respectively. The points beyond the 50 mm limit are not considered in this analysis.

The statistics for the deviation analysis of the points in the real drum sections in relation to the ideal curves (deformation analysis) are given in Table 6. This analysis is carried out in the drums of column C19, including the base and excluding the capital.

**Table 6.** Deviation analysis of as-built and ideal drum sections in column C19.

Drum	Section	Minimum Distance (mm)	Maximum Distance (mm)	Points over Surface (units)	Points under Surface (units)	Mean Distance (mm)	Median Distance (mm)	Standard Deviation (mm)
1.Base	Lower	-15.57	13.42	18	14	7.03	6.46	4.06
	Middle1	-14.68	33.20	27	5	14.85	14.60	8.77
	Middle2	-36.19	29.21	17	15	12.69	12.23	7.77
	Upper	-23.75	10.96	8	24	11.38	12.42	7.22
2	Lower	-2.60	10.18	24	8	4.68	4.77	2.95
	Middle	-28.07	7.40	17	15	4.35	3.46	4.98
	Upper	-13.47	7.98	12	20	4.78	4.12	2.83
3	Lower	-7.54	9.36	19	13	3.64	3.01	2.54
	Middle	-7.70	10.30	15	17	3.10	2.41	2.50
	Upper	-11.56	16.22	14	18	4.55	3.08	4.00
4	Lower	-11.59	16.42	21	11	6.73	5.94	4.77
	Middle	-8.93	14.74	18	14	4.95	4.16	3.26
	Upper	-10.70	20.01	20	12	5.95	5.28	5.00
5	Lower	-7.45	10.38	23	9	4.33	4.11	3.28
	Middle	-12.13	8.48	14	18	3.83	3.16	2.42
	Upper	-10.36	6.48	11	21	3.89	3.67	2.91
6	Lower	-6.15	16.75	21	11	4.30	2.92	3.64
	Middle	-4.64	16.90	18	14	2.94	1.38	4.06
	Upper	-6.33	16.40	9	23	3.19	2.36	3.37
7	Lower	-10.84	11.46	18	14	4.32	4.10	3.00
	Middle	-9.41	9.09	20	12	4.66	4.92	2.42
	Upper	-11.56	7.28	14	18	4.59	4.21	3.12
8	Lower	-15.72	20.83	13	19	8.26	5.52	6.28
	Middle	-13.97	14.15	19	13	6.56	6.57	3.75
	Upper	-15.87	18.84	7	25	7.73	6.71	4.78
9	Lower	-6.51	8.77	14	18	2.68	1.64	2.49
	Middle	-5.59	10.53	14	18	4.08	3.05	2.94
	Upper	-9.70	10.31	10	22	5.15	5.14	2.75

The performed analysis to obtain Figure 17 and Table 6, together with the colour scales depending on the values, indicate the specific deformations of the drums in an intuitive way. Here, the standard deviation in mm accounts for the traditional dispersion measurement of the points in relation to the ideal or ideal drum sections (Figure 17). According to the results from Table 6, considering the median distance, and the standard deviation, as well as the minimum and maximum distance from the ideal sections, both the middle and upper sections of the base of column C19 are the areas with greatest alterations in their surface/shape, especially in their north and south faces.

Finally, as stated in Section 4.4, the area of the 3D meshes and their average triangles, as well as the volume of the drums are calculated and gathered in Table S2 (Supplementary Materials).

### 5.3. Structural Performance

Figure 18 summarises the main results from the static analyses, providing the maximum values of the stress and displacement fields. Those results are essential in order to:

1. Assess the structural response, determining areas that are prone to undergo local or global collapse;
2. Identify the strongest and weakest structural directions.

3. Determine the confidence threshold of each numerical model in terms of compliance factor.

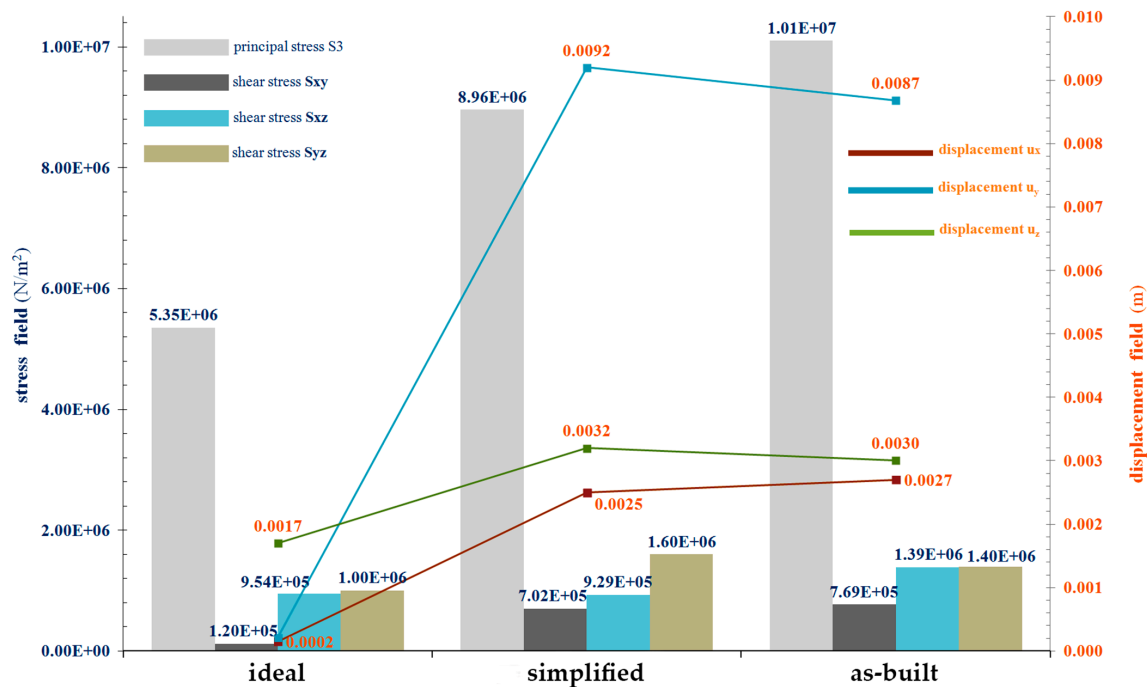


Figure 18. Maximum stresses (principal S3 and shear (Sxy, Sxz, Syz)) and displacements (ux, uy, uz).

In the displacement field (Figure 19), the column tilt, which is taken into account in the as-built and simplified models, causes the main differences. In the ideal model, the maximum displacement is in the vertical axis (0.0017 m  $u_z$ ), but in the simplified and as-built models the highest values are located in the horizontal axis y (0.0092 m and 0.0082 m, respectively). It is worth noting that the differences between the simplified and as-built models are more relevant in the stress field than in the displacement field (8%  $u_x$  decrease, 6%  $u_y$  decrease and 6%  $u_z$  decrease, considering the simplified model as the reference).

From the static numerical results, it may be observed that although the maximum compressive levels are reached in the base area, as expected, the stress distribution and values are different (Figure 20). Obviously, the column tilt yields significant variations between the ideal model (maximum compressive level,  $0.535 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, is reached in the base), and the as-built and simplified ones (maximum levels,  $0.101 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup> and  $0.896 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> are located in the joints). The lean also has a strong effect on the stress distributions, being more unfavourable those of the as-built and simplified models. Focusing on the aforementioned FEM models, although the principal stress S3 distributions are almost equal, the as-built based model exhibits higher values than the simplified one (13% increase in the maximum S3 with respect to the simplified one).

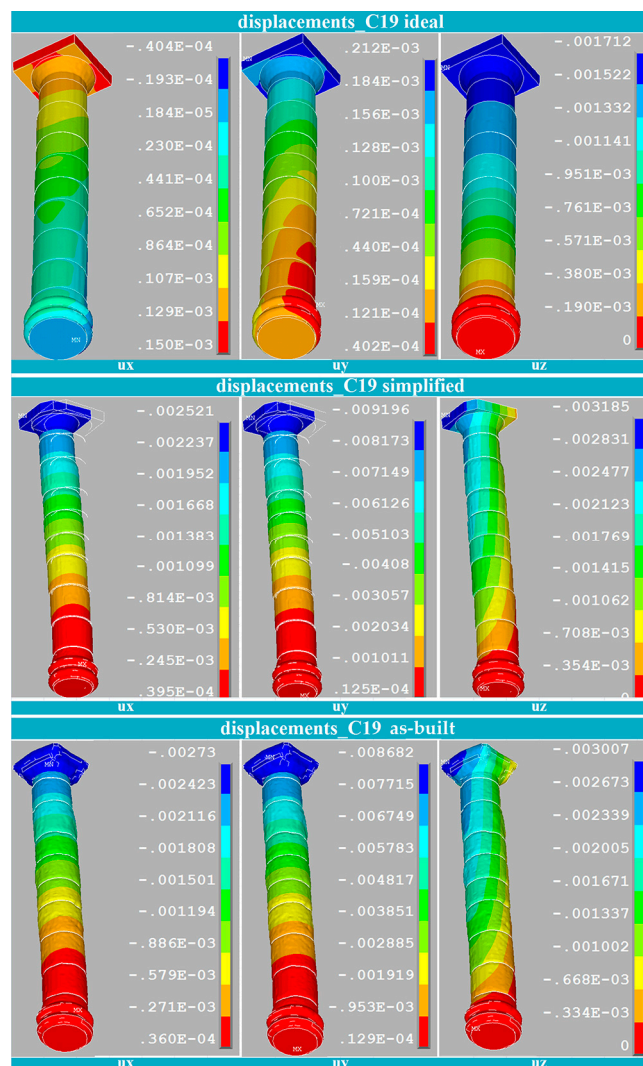


Figure 19. Displacement field distribution (m): (top) ideal model; (centre) simplified model; (bottom) as-built model.

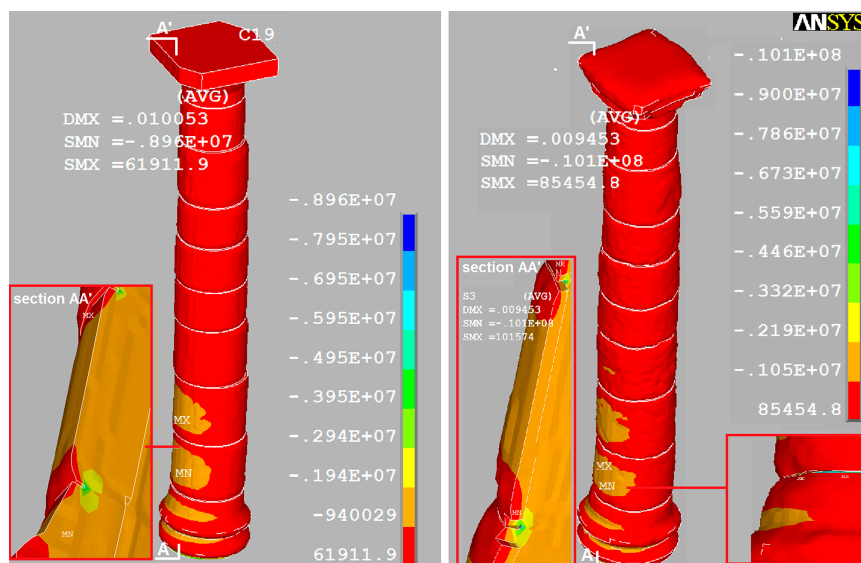


Figure 20. Principal stress  $S_3$  distribution ( $N/m^2$ ): (left) simplified model; (right) as-built model.

Regarding shear stresses, significant differences are obtained. The maximum values, which are quite similar for the most realistic models ( $1.6 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> for the simplified one and  $1.4 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> in the as-built model), are provided by the Syz. However, the most remarkable result is the Sxz variation between the simplified and the as-built model (50% increase in the as-built model, as shown in Figure 21). That variation could be highly significant, in terms of safety compliance, under dynamic loading.

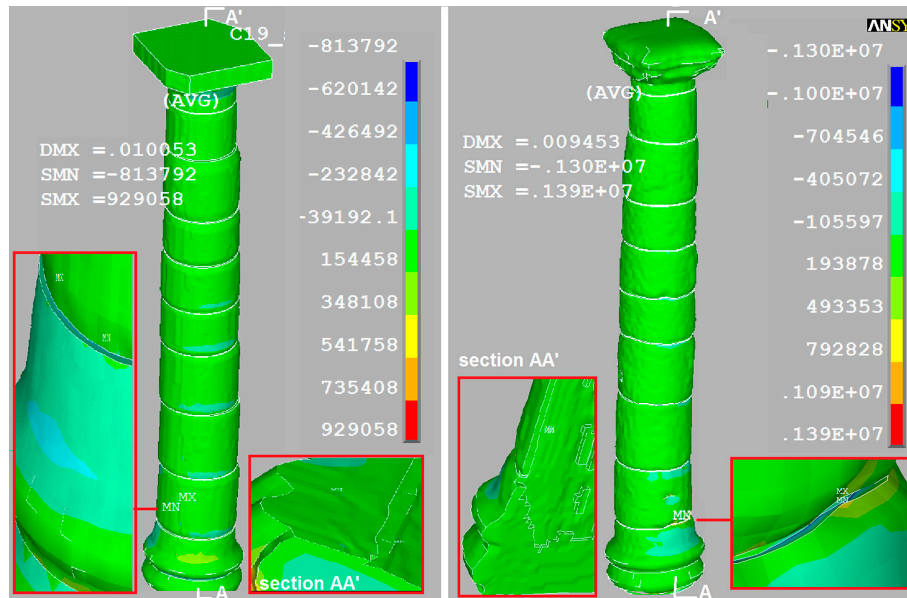


Figure 21. Shear stress Sxz distribution (N/m<sup>2</sup>): (left) simplified model; (right) as-built model.

Focusing on the modal analysis results, the values of the main periods are quite similar, as shown in Table 7. Neither the stiffness degradation—due to the lack of material—nor the geometric imperfections—leaning and distortions—have provoked a significant period increase. Indeed, in the 1st mode, the period of the as-built model is almost equal to that of the ideal one (only 0.79% increase).

Table 7. Modal results: Main periods.

Mode No	Period T (s)		
	Ideal	Simplified	As-built
1	1.01390	1.02190	1.02350
2	1.01290	1.02060	1.01420
3	0.18056	0.18888	0.18261
4	0.18033	0.18846	0.18020
5	0.11966	0.11905	0.11822
6	0.07204	0.07268	0.07230
7	0.07063	0.07207	0.07054
8	0.07051	0.07161	0.06967
9	0.04297	0.04302	0.04269
10	0.03989	0.04060	0.03962
11	0.03973	0.04023	0.03928
12	0.02649	0.02697	0.02625
13	0.02635	0.02666	0.02608
14	0.02516	0.02546	0.02523
15	0.02500	0.02532	0.02469
16	0.01943	0.01978	0.01919
17	0.01931	0.01947	0.01907
18	0.01728	0.01747	0.01706
19	0.01544	0.01558	0.01529
20	0.01520	0.01541	0.01491

In Table 8, the effective masses are provided. Those mass values allow for distinguishing among the most significant modal shapes, which are those with the highest mass contribution. The most remarkable difference among values, is that, as expected, the leaning leads to a minimum effective mass redistribution among the horizontal axis  $x$  and  $y$ , being modes nos. 1 and 2 the most relevant. It is worth noting that in spite of the differences in the axis distribution, the structural response that can be assumed from those results is almost equivalent. Additionally, those results perfectly match the expected behaviour from the geometric features of the models, as the modal shape describes the configuration into which the column will naturally displace. In the three models, the first four modal shapes provide the highest mass contribution in the  $x$  and  $y$  directions. In the vertical direction, the highest value is obtained in the 14th mode.

**Table 8.** Modal results: Effective masses (the highest values are highlighted).

Mode No	Effective Masses, Meff (%)								
	Ideal			Simplified			As-built		
	x-Direction	y-Direction	z-Direction	x-Direction	y-Direction	z-Direction	x-Direction	y-Direction	z-Direction
1	13.26	<b>42.31</b>	0.00	<b>52.75</b>	2.73	0.01	<b>47.14</b>	9.13	0.00
2	<b>42.32</b>	13.25	0.00	2.74	<b>52.72</b>	0.03	9.12	<b>47.04</b>	0.03
3	0.03	<b>19.21</b>	0.00	<b>15.76</b>	3.77	0.02	<b>16.26</b>	2.98	0.00
4	<b>19.21</b>	0.03	0.00	3.79	<b>15.74</b>	0.02	2.96	<b>16.36</b>	0.04
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
6	0.01	0.03	<b>75.47</b>	0.04	1.12	<b>68.54</b>	0.08	0.85	<b>70.57</b>
7	0.30	7.30	0.23	4.87	2.61	0.52	6.85	0.47	3.02
8	7.32	0.29	0.13	2.77	4.01	6.45	0.67	6.41	2.59
9	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.06	0.01	0.00
10	0.03	4.38	0.00	2.54	1.98	0.02	3.16	1.24	0.01
11	4.41	0.03	0.00	1.97	2.51	0.04	1.27	3.19	0.02
12	0.01	2.94	0.02	1.42	1.47	0.06	2.57	0.30	0.13
13	2.95	0.01	0.02	1.42	1.44	0.36	0.30	2.59	0.10
14	0.00	0.01	<b>9.72</b>	0.07	0.01	<b>9.98</b>	0.03	0.02	<b>9.70</b>
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
16	0.01	2.12	0.00	1.04	1.12	0.02	1.82	0.28	0.01
17	2.12	0.01	0.00	1.13	1.05	0.02	0.27	1.79	0.01
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.02	0.08	3.85	0.31	0.04	2.98	0.04	0.02	3.92
20	0.04	1.40	0.17	0.38	0.76	0.65	1.33	0.09	0.06

The modal shapes are provided in Figure 22. In those shapes, the sum of the effective modal masses is more than the 90% of the total column mass. The 1st, 2nd and 4th modes involve global bending, and the modes that display torsional response are not representative (e.g., around 0.01% effective mass contribution in mode no. 15). The 3rd modal shapes provide significant out-of-plane deformations. The 6th and 14th modal shapes provide bending and translation in the vertical direction. The most representative shapes are characterized by a high global monolithic behaviour among drums and capital, and the highest stiffness is in the base area. It is worth noting that at higher frequencies (e.g., mode no. 16) the capital seems to be vulnerable, but in those cases the mass contribution is quite low.

Finally, Figure 23 shows the maximum stress and displacement variations, being the simplified model the reference.

That figure also depicts the compliance factor values in terms of ultimate limit state. The  $\alpha$  values of the ideal and simplified models are satisfactory (1.68 and 1, respectively). However, the value of the as-built model (0.89) is under the confidence level. It is worth noting that under a structural framework, the compliance factor is a key element in order to determine if strengthening or retrofitting works are required. Indeed, that value measures up to which level the safety requirements are accomplished. As aforementioned, for the simplified and ideal models the safety requirements are completely fulfilled. But, as for the as-built model the compliance factor is less than one, the safety requirements are fulfilled only partially. In that case, the necessity of strengthening or retrofitting measures should be clarified on the basis of risk-based decision criteria.

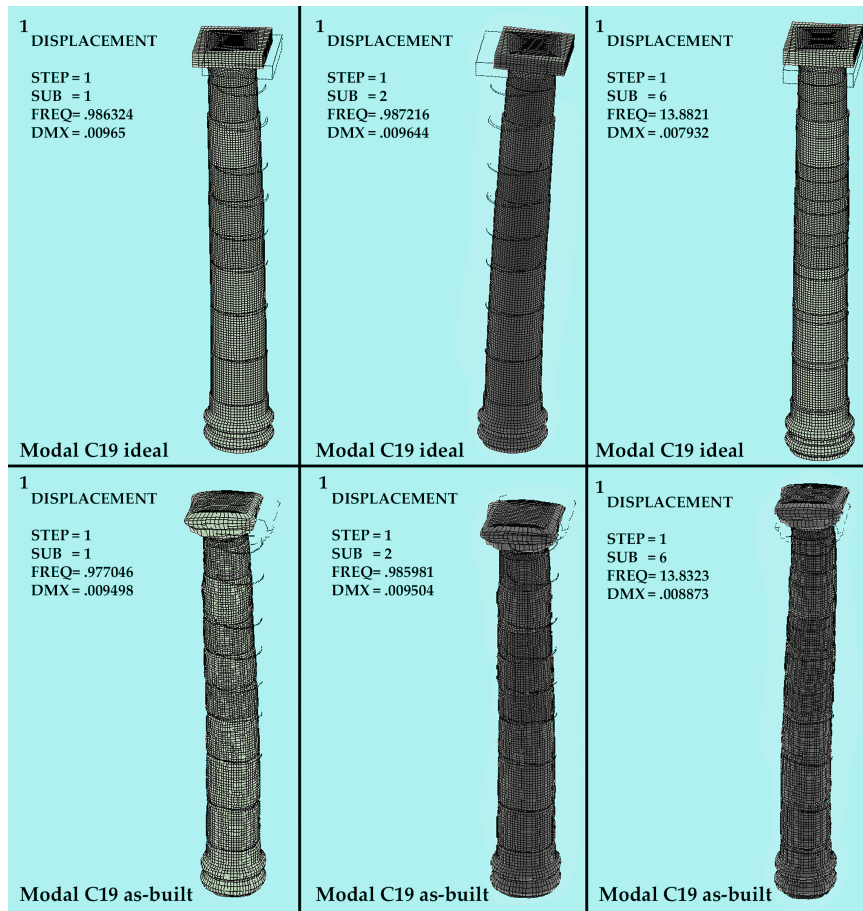


Figure 22. Modal shapes: ideal model (top) and as-built model (bottom).

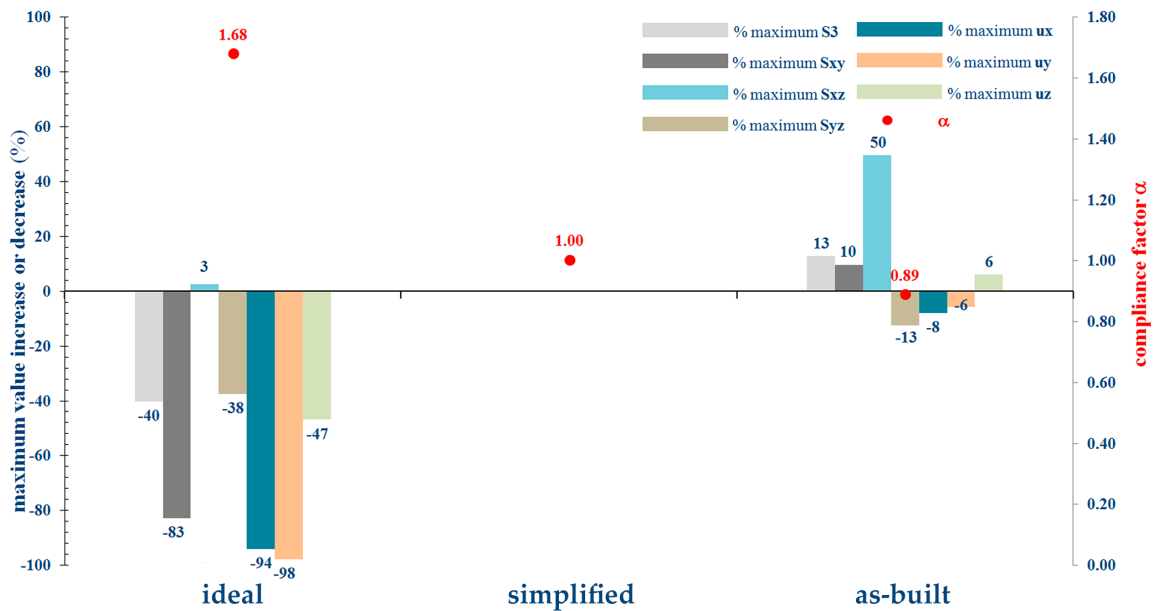


Figure 23. Compliance factor (axial ultimate limit state), and maximum stress-displacement variation (simplified model vs. ideal and as-built models).



## 6. Discussion

Concerning the survey and the modelling stages of this research, Tables 9 and 10 quantitatively show the errors and accuracies achieved.

**Table 9.** 3D scanning errors and accuracies.

3D Survey			Registration		
Laser Beam Error at 3.5 m (mm)	Tilt Error (°)	Accuracy at 10 m (mm)	Bundle Error (mm)	Scan Linking Strength (%)	Overlap (%)
0.60	0.0385	4	6	81	54

The quality of the column modelling is directly related to the suitability of the remote sensing technology. In this case, the Leica BLK360 laser scanner proves to be valid for that purpose, especially considering the reduced errors and high accuracy achieved in the 3D scanning. The scanner's resolution and accuracy are taken from the technical specifications, and the registration data derives from the scanning report. The point cloud produced consists of a total of approximately 56 million points after the segmentation process for the columns. The laser beam error is calculated as standard deviation from sample points extracted from the point cloud of the basilica. Concerning the tilt error (levelling accuracy), both the laser scanner's tilt sensor and the cloud-to-cloud registration minimise errors in the creation of a coordinate system without control points. The tilt error is calculated by comparing the slope of a plane from three points recorded using GNSS (Leica GS18 receiver and Leica CS20 data logger) and the plane from those three points located in a BLK360 sample point cloud. The tilt accuracy obtained ( $0.0385^\circ$  or  $2'18.5''$ ) allows to calculate the structural alterations of the basilica.

**Table 10.** 3D meshing accuracies and features.

Point Cloud Fitting		Mesh Simplification		
Octree Depth (level)	Accuracy (Standard Deviation) (points)	Minimum Total of Faces per Drum (units)	Average Face Surface ( $\text{mm}^2$ )	Accuracy (Standard Deviation) (points)
9	4432.06	20,000	33.28	239.84

Regarding the point cloud 3D meshing, the Octree depth selected (level 9) provides a higher accuracy (considered as standard deviation) in comparison with other levels and a high number of triangles in the drums, which allows to represent the surface deformations in detail. Apart from the difference in the geometric features of the meshes (Table 1), the greater standard deviation of mesh 2 (level 9 simplified) in comparison with mesh 0 (level 8) reveals that it is more convenient—in terms of preserving geometry—to simplify the meshes (pure triangle reduction) than increase the smoothing of the meshes (worse point cloud fitting through Octree level reduction). This can be observed in Section 5.1, where the difference between the point-cloud-to-mesh (Figure 13) and mesh-to-mesh (Figure 14) deviation graphs is analysed. A greater number of points exist in the intervals surrounding the zero value in the point cloud meshing (mesh 1 from the original point cloud, in Figure 13) than in those of the mesh simplification (mesh 2 from mesh 1, in Figure 14). This could be due to the way the mesh is produced from the reference object—original point cloud or mesh—it is revealed that the smoothing to reduce the number of triangles is not as accurate as the simplification. Therefore, the smoothing level and the simplification degree considered in this research proves to be suitable for the digital reconstitution of the basilica. The simplification of these geometries according to the optimal parameters obtained from the 3D meshing validation test eases the data processing and modelling in comparison with original (non-simplified) complex meshes. In this research, the threshold of 20,000 faces per drum is established, but the minimum triangle quantity achieved in a drum is even higher (29,232 faces in drum 3, column C5). These data are gathered in Table S1 (Supplementary Materials). The geometry accuracy achieved is represented in Table 10 as both the standard deviation

of the meshing accuracy and the mesh simplification, and as average triangle surface from all the columns, which is weighted according to the total of triangles in drums per column. As calculated in Table S2 (Supplementary Materials), the total of faces obtained in the basilica is approximately 8 million, the total column surface is 269.688 m<sup>2</sup> and the total volume is 29.697 m<sup>3</sup>. From the aforementioned, it is necessary to refer to the work by Korumaz et al. [29], given the fact that they also use TLS for geometry capture, mesh and solid modelling for FEM analysis. In their case, the original and simplified point clouds have 7 and 3 million points, which constitutes a significant reduction in comparison with the dense point cloud of the columns in the basilica of Baelo Claudia (56 million), despite the great dimensions of their case study (minaret). In addition, the Octree depth 12 is suitable for the simplified point cloud data of the minaret, whereas it generates noise in denser point clouds as in the basilica.

Focusing on the physical features of the solid models (see Figure 10) for the column C19, created through the three different modelling approaches, it is worth describing the differences and similarities they involve. Concerning the as-built model, the surface deformations of the drums and their joints become evident: neither the relief is homogeneous, nor the joints are horizontal. The distortion of the drums and the general displacement of the column at the top are also clear. In contrast with Korumaz et al. [29] and most of the research works gathered in Section 2 in this paper of the Baelo Claudia case study, CAD software is not used to create some parts of the columns from documentary sources. Moreover, the geometric analysis in the columns of the basilica provides full measurements of displacements, distortions and deformations on the top view instead of in one axis of tilt. Consequently, the analyses carried out are based on scanned geometry, considering the deformations of the columns surface, which is useful to identify particular geometry alterations for subsequent restoration works.

In relation to the structural behaviour assessment, the as-built modelling approach has great impact on the results of the analysis in terms of compliance factor accomplishment—especially when both the axial ultimate limit state and the shear stress field are analysed. The simplified model maintains the distortion and displacement of the drums and the column, respectively, but it avoids the deformation of the drums surface and their joints. Concerning the ideal model, it only considers the average diameter and the actual height of the drums, but using primitive geometries (cylinders); the base centroids remain invariable in relation to the other approaches. The regular geometry of the ideal model, as shown in the structural analysis results, implies minor structural deformations and stresses as well as a significant stress redistribution (especially in the compressive stresses) as expected. As explained in Section 5.3, the differences between the as-built and the simplified model, which reproduce the most realistic geometries, are more significant in the stress field than in the displacement field. Thus, the maximum  $S_{xz}$  shear stress undergoes 50% increase in the as-built model. That could represent the unfulfillment of the shear ultimate limit state under dynamic loading. Additionally, the maximum principal stress  $S_3$  exhibit 13% increase when the as-built model is compared to the simplified one. However, as far as the eigenvalue analysis is concerned, the differences among models are no relevant. Indeed, it is worth highlighting that neither the stiffness degradation nor the geometric imperfections yield a period increase. However, the most crucial difference that is provided from the structural assessment is the value of the compliance factor, which is of fundamental interest within structural safety assessment. The axial ultimate limit state compliance factor is accomplished in the ideal and simplified models, but in the as-built model is less than the accepted limit value of 1.0. Those divergent values represent the difference between deciding whether strengthening and/or retrofitting works are necessary or unnecessary.

The as-built modelling allows the accurate measurement of the geometrical alterations and the structural behaviour assessment on the columns in the basilica of Baelo Claudia. The potential of the proposed methods is clear, since their application to different archaeological and architectural heritage assets in the cities would enrich the analyses of their physical status for conservation purposes. The quantitative data to study the displacement, distortions and deformations of the elements, as well as the volume and surface of columns and drums gathered in Table S2, can be used by the specialists to both assess the refurbishment needs in accordance with technical and scientific criteria and conduct health

monitoring from changes in their geometry. In addition, the geometric analysis can be implemented for other shapes of archaeological or architectural heritage models from TLS, whether they are based on pure parametric objects (using basic shapes such as circumference, arc, rectangle, etc.) or using closed polysurfaces (solids) from meshes as the as-built models in this paper. In this way, although this research article focuses on the analysis of columns, other element typologies can be geometrically assessed within their reference coordinate system. The analysis of diverse structural components—foundations, walls, beams, rafters, etc.—through, e.g., cross-sections or centroids displacement, and the deformation calculation due to tilt, bulges, deflections, etc., reveal their conservation status.

It is also worth noting that, although this research has not considered specific BIM software yet, the outcomes of this case study (the columns of the basilica of Baelo Claudia and the analysis data obtained) could be considered a HBIM, since the accurate 3D modelling of archaeological heritage sites supported by TLS point cloud data is achieved. According to Azhar [67], BIM goes beyond software; it is considered a process or a methodology rather than the mere use of certain programmes. The as-built models of this paper can be easily transferred as IFC (industry foundation classes) format to interoperate with BIM and later insert data, such as the geometric and FEM analyses results.

Concerning the limitations of this research, the 3D scanning was carried out within a user coordinate system. The global point cloud was not geo-referenced using GNSS due to technical issues during the survey. For this reason, the orientation of the basilica at the geometric analysis stage was established according to the site map provided by Fincker et al. [41]. The model geo-referencing would entail more accuracy in the results of the column leaning orientation. However, from Table 9, the low tilt error achieved is considered valid to calculate the displacements, distortions and deformations of columns and drums and, therefore, suitable for the purpose of this research, which is to rationalise the need of creating as-built models to support analyses more accurate than those performed utilising non-deformed heritage 3D models.

The capture of the joints between drums at a higher position was not possible due to the limitation of the scanning survey itself, since the device is placed on the ground level, surrounding the columns. Consequently, the joints' geometry was simplified as described in this paper.

In addition, it should be said that the semi-automatic procedure and algorithm to subdivide the columns into different parts entail the manual insertion of points on the drum edges near the joints. Further improvements of this process could consist on the implementation of artificial intelligence (AI) by pattern recognition to set the points, which define the (patch) surfaces to split the columns. The AI could be also implemented for ground removal (point cloud segmentation) to extract the columns.

Other future research works will consist of a thoroughgoing assessment of the available meshing algorithms in terms of accuracy to produce as-built 3D heritage models, since the structural analyses on these assets could benefit from more precise geometries.

## 7. Conclusions

The results of this research derive from the geometric analysis and the structural behaviour assessment of the as-built models produced by using terrestrial laser scanning, semi-automatic modelling methods and algorithms. The as-built solid models of the columns in the basilica are created in different stages: (1) from TLS with a  $0.0385^\circ$  tilt error and 4 mm point accuracy at 10 m; (2) point cloud 3D meshing with an accuracy of 4,432.06 points (standard deviation in comparison with the original point cloud); (3) mesh simplification degree with an accuracy of 239.84 points (standard deviation in comparison with the original mesh); and (4) an average triangle resolution of  $33.28 \text{ mm}^2$  and the weighted value of 64,037.56 faces per drum, which is higher than the modelling simplification threshold of 20,000 triangles per drum set in this research to achieve accurate geometry in columns.

In order to provide quantitative results from the geometric analysis, the following findings are highlighted:

- Focusing on the global column displacements gathered in Table S1. Displacements and distortions in columns (Supplementary Materials), four out of 11 columns have capital present values above 65 mm, whereas only three have displacements below 20 mm.
- It is revealed the poor conservation status of columns C3, C7, C2, C17, C19 and C20 in terms of structural alterations, the last four having the highest values of both displacement and distortion when compared to the ideal model: their joint mean values are 85.10 mm and 46.97 mm, respectively.
- The global displacement of column C19 is 132% higher than the average displacement (47.26 mm) of the columns with capitals. In relation to C19's distortions, the value accounting for the vertical ideal axis is 235% greater than the average distortion of all the columns (19.92 mm), and the distortion with respect to the drums below is 80% higher than the mean (9.06 mm). Thus, as seen throughout this paper, C19 is the most unfavourable column and, therefore, constitutes a suitable sample for the structural analysis.

On the other hand, the following conclusions are obtained from the numerical structural assessment:

- The modal results are quite similar among models, and neither the stiffness degradation nor the geometric imperfections (leaning and distortions) provoke a significant period increase. The only difference is that the leaning leads to an effective mass redistribution in the horizontal axis, but maintaining the modal shape nature.
- The maximum displacement and stress values exhibit significant differences among models: (i) In the displacement field, the column tilt provokes relevant variations between the ideal model and the most realistic ones (simplified and as-built), as expected. Taking the simplified one as the reference, the  $u_y$  displacement decreases 98% in the ideal model and 6% in the as-built one. (ii) In the stress field, considering the simplified model as the reference, the stresses values present an important decrease in the ideal model (e.g., 40% in the maximum compressive value,  $S_3$ , and 83% in the shear stress,  $S_{xy}$ ). The differences in the shear stress values between the simplified and the as-built models are also remarkable, as the obtained variation (50% increase in the as-built model) could represent the unfulfillment of the shear ultimate limit state under dynamic loading.
- The most important difference is the compliance factor value. The axial ultimate limit state compliance factor is accomplished in the ideal and simplified models (1.68 and 1.00, respectively), but in the as-built is not completely fulfilled (0.89). Those divergences actually make the difference between deciding whether strengthening and/or retrofitting works are necessary or unnecessary. From those results, the necessity of strengthening or retrofitting measures should be clarified on the basis of risk-based decision criteria. In any case, the requirement for an accurate representation of the real geometry when assessing structural performance is demonstrated, as it has been achieved within the methodology proposed in this work.

Therefore, this paper highlights the relevance of modelling the archaeological and architectural heritage accurately from remote sensing. Here, the simulations and geometric analysis become a direct application of the integration of point cloud data into the as-built modelling of heritage. In this sense, the implementation of the methods described into other sites leads to achieve the as-built 3D heritage city modelling in order to contribute to the conservation of these assets for the future.

**Supplementary Materials:** Supplementary materials are available online at <http://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1276/s1>. Table S1. Displacements and distortions in columns; Table S2. Column surface and volume with units; Figure S1. Centroid displacements; Figure S2. Deformation analysis.

**Author Contributions:** Conceptualisation: D.A., P.P. and B.M.; methodology: D.A., P.P., B.M., and A.I.; software: D.A., P.P., and A.I.; validation: D.A., P.P., B.M., and A.I.; formal analysis: D.A., P.P. and A.I.; investigation: D.A., P.P. and A.I.; resources: D.A., P.P., B.M. and A.I.; data curation: D.A., P.P. and A.I.; writing—original draft preparation: D.A., P.P. and B.M.; writing—review and editing: D.A., P.P., B.M. and A.I.; visualisation: D.A., P.P. and A.I.; supervision: P.P. and B.M.; project administration: D.A., P.P. and B.M.; funding acquisition: D.A. and B.M.

**Funding:** This research was funded by Universidad de Sevilla through VI Plan Propio de Investigación y Transferencia (VIPPIIT) grant number CONV-822, PP2017-8696 and PP2018-10628.

**Acknowledgments:** The authors would like to gratefully thank Iván García Jiménez, Chief Archaeologist of the Baelo Claudia ensemble, for his strong interest in this research, and for providing all the required data and information. Special thanks to Roberto Gallardo and Leica Geosystems for collaboration in laser scanning. The authors also wish to thank the Creative and Virtual Technologies Research Laboratory (Nottingham Trent University) for providing access to their facilities during the research stay.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

## Appendix A

The results of the geometric analysis described in Sections 4.4.1 and 4.4.2 are gathered in Table S1: Displacements and distortions in columns. This table is referred to in Section 4. Methodology/Section 4.3. Digital Reconstitution: Solid Modelling, and Section 4.4. Geometric Analysis to calculate the displacement at the top of the column and the distortion of the drums.

The displacements of all the complete columns and their drums are gathered in Figure S1: Centroid displacements. The deformation analysis of all the sections in column C19 are collected in Figure S2: Deformation analysis. As stated in Section 4.4. Geometric Analysis, the surface and volume of all the drums are gathered in Table S2: Column surface and volume with units.

Research equipment used:

- Desktop computer for point cloud data processing and 3D meshing: six-core microprocessor at 3.6 GHz with 15 MB cache; 32 GB DDR4 RAM memory at 2400 MHz; dual PCIe 3.0 graphic card with 2560 cores at 1607 MHz and 2 × 8 GB 256-bit GDDR5X memory at 10 GHz with 320 GB/s bandwidth each.
- Portable computer for 3D meshing accuracy evaluation, solid modelling, scripting in Grasshopper, and geometric analysis: four-core microprocessor at 3.3 GHz with 6 MB cache; 16 GB DDRIII RAM memory at 1600 MHz; dual PCIe 2.0 graphic card with 336 cores at 598 MHz and 3 GB 192-bit GDDR5 memory at 1500 MHz with 72 GB/s bandwidth.
- HP Z600 Workstation for FEM mesh generation and FEM structural simulation, with 2 × Intel Xeon 3.3 GHz, 12 cores, and 24 GB DDR3 RAM.
- Leica BLK360 laser scanner: technical specifications can be found at [42].

## References

1. Bakker, W.H.; Feringa, W.; Gieske, A.S.M.; Gorte, B.G.H.; Grabmaier, K.A.; Hecker, C.A.; Horn, J.A.; Huurneman, G.C.; Janssen, L.L.F.; Kerle, N.; et al. *Principles of Remote Sensing*, 4th ed.; Tempfli, K., Kerle, N., Huurneman, G.C., Janssen, L.L.F., Eds.; The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC): Enschede, The Netherlands, 2009; ISBN 978-90-6164-270-1.
2. Mosalam, K.M.; Takhirov, S.M.; Park, S. Applications of laser scanning to structures in laboratory tests and field surveys. *Struct. Control Health Monit.* **2014**, *21*, 115–134. [[CrossRef](#)]
3. Antón, D.; Medjdoub, B.; Shrahily, R.; Moyano, J. Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *Int. J. Archit. Herit.* **2018**, *12*, 790–805. [[CrossRef](#)]
4. Murphy, M.; McGovern, E.; Pavia, S. Historic building information modelling (HBIM). *Struct. Surv.* **2009**, *27*, 311–327. [[CrossRef](#)]
5. Thomson, C.; Boehm, J. Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 11753–11775. [[CrossRef](#)]
6. Barlish, K.; Sullivan, K. How to measure the benefits of BIM—A case study approach. *Autom. Constr.* **2012**, *24*, 149–159. [[CrossRef](#)]
7. López, F.J.; Leronés, P.; Llamas, J.; Gómez-García-Bermejo, J.; Zalama, E.; López, F.J.; Leronés, P.M.; Llamas, J.; Gómez-García-Bermejo, J.; Zalama, E. A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technol. Interact.* **2018**, *2*, 21. [[CrossRef](#)]
8. Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Autom. Constr.* **2014**, *38*, 109–127. [[CrossRef](#)]

9. Mukupa, W.; Roberts, G.W.; Hancock, C.M.; Al-Manasir, K. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Surv. Rev.* **2017**, *49*, 99–116. [[CrossRef](#)]
10. Vežočanik, R.; Ambrožič, T.; Sterle, O.; Bilban, G.; Pfeifer, N.; Stopar, B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors* **2009**, *9*, 9873–9895. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Pesci, A.; Teza, G.; Boschi, E.; Nazionale, I.; Bologna, S.; Bologna, U. Laser scanning-based detection of morphological changes of a historical building occurred during a seismic sequence: Method and Case study. *Int. J. Geomat. Geosci.* **2015**, *5*, 427–447.
12. Baraccani, S.; Silvestri, S.; Gasparini, G.; Palermo, M.; Trombetti, T.; Silvestri, E.; Lancellotta, R.; Capra, A. A Structural Analysis of the Modena Cathedral. *Int. J. Archit. Herit.* **2016**, *10*, 235–253. [[CrossRef](#)]
13. Shen, Y.; Wang, J.; Lindenbergh, R.; Hofland, B.; Ferreira, V.G. Range Image Technique for Change Analysis of Rock Slopes Using Dense Point Cloud Data. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1792. [[CrossRef](#)]
14. Xu, H.; Li, H.; Yang, X.; Qi, S.; Zhou, J.; Xu, H.; Li, H.; Yang, X.; Qi, S.; Zhou, J. Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam. *Sensors* **2018**, *19*, 22. [[CrossRef](#)]
15. Lerma, J.L.; Navarro, S.; Cabrelles, M.; Villaverde, V. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: The Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *J. Archaeol. Sci.* **2010**, *37*, 499–507. [[CrossRef](#)]
16. Cortés-Sánchez, M.; Riquelme-Cantal, J.A.; Simón-Vallejo, M.D.; Parrilla Giráldez, R.; Odriozola, C.P.; Calle Román, L.; Carrión, J.S.; Monge Gómez, G.; Rodríguez Vidal, J.; Moyano Campos, J.J.; et al. Pre-Solutrean rock art in southernmost Europe: Evidence from Las Ventanas Cave (Andalusia, Spain). *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0204651. [[CrossRef](#)]
17. Calantropio, A.; Chiabrando, F.; Rinaudo, F.; Teppati Losè, L. Use and evaluation of a short range small quadcopter and a portable imaging laser for built heritage 3D documentation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2018**, *42*, 71–78. [[CrossRef](#)]
18. Sun, Z.; Zhang, Y. Accuracy Evaluation of Videogrammetry Using A Low-Cost Spherical Camera for Narrow Architectural Heritage: An Observational Study with Variable Baselines and Blur Filters. *Sensors* **2019**, *19*, 496. [[CrossRef](#)]
19. Moisan, E.; Charbonnier, P.; Foucher, P.; Grussenmeyer, P.; Guillemin, S. Evaluating a Static Multibeam Sonar Scanner for 3D Surveys in Confined Underwater Environments. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1395. [[CrossRef](#)]
20. De Felice, G.; De Santis, S.; Lourenço, P.B.; Mendes, N. Methods and Challenges for the Seismic Assessment of Historic Masonry Structures. *Int. J. Archit. Herit.* **2017**, *11*, 143–160. [[CrossRef](#)]
21. AlShawa, O.; Sorrentino, L.; Liberatore, D. Simulation Of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part (II): Combined Finite-Discrete Elements. *Int. J. Archit. Herit.* **2017**, *11*, 79–93. [[CrossRef](#)]
22. Cannizzaro, F.; Lourenço, P.B. Simulation of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part (VI): Discrete Element Approach. *Int. J. Archit. Herit.* **2017**, *11*, 125–142. [[CrossRef](#)]
23. Mordanova, A.; de Felice, G. Seismic Assessment of Archaeological Heritage Using Discrete Element Method. *Int. J. Archit. Herit.* **2018**, 1–13. [[CrossRef](#)]
24. Pineda, P.; Iranzo, A. Analysis of sand-loaded air flow erosion in heritage sites by Computational Fluid Dynamics: Method and damage prediction. *J. Cult. Herit.* **2017**, *25*, 75–86. [[CrossRef](#)]
25. Al Aqtash, U.; Bandini, P.; Cooper, S.L. Numerical Approach to Model the Effect of Moisture in Adobe Masonry Walls Subjected to In-Plane Loading. *Int. J. Archit. Herit.* **2017**, *11*, 805–815. [[CrossRef](#)]
26. Riveiro, B.; Caamaño, J.C.; Arias, P.; Sanz, E. Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Autom. Constr.* **2011**, *20*, 380–388. [[CrossRef](#)]
27. Castellazzi, G.; D’Altri, A.M.; de Miranda, S.; Ubertini, F. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Eng. Struct.* **2017**, *132*, 229–248. [[CrossRef](#)]
28. Garofano, A.; Lestuzzi, P. Seismic Assessment of a Historical Masonry Building in Switzerland: The “Ancien Hôpital De Sion”. *Int. J. Archit. Herit.* **2016**, *10*, 975–992. [[CrossRef](#)]
29. Korumaz, M.; Betti, M.; Conti, A.; Tucci, G.; Bartoli, G.; Bonora, V.; Korumaz, A.G.; Fiorini, L. An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Eng. Struct.* **2017**, *153*, 224–238. [[CrossRef](#)]

30. Instituto Geográfico Nacional Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. Available online: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (accessed on 11 March 2019).
31. Padilla, A. Some Notes about the Elite of the Roman Municipality of Baelo. Available online: [http://institucional.us.es/revistas/habis/41/art\\_12.pdf](http://institucional.us.es/revistas/habis/41/art_12.pdf) (accessed on 19 April 2018).
32. Bernal, D.; Arévalo, A.; Lorenzo, L.; Aguilera, L. Imitations of Italic amphorae for fish sauce in Baetica. New evidence from the salt-fish factory of Baelo Claudia (Hispania). *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta* **2003**, *38*, 305–313.
33. Bernal, D.; Arévalo, A.; Roselló, E.; Morales, A. Garum y salsas mixtas: Análisis arqueozoológico de los paleocontenidos de ánforas procedentes de Baelo Claudia (s. II a. C.). In *Avances en Arqueometría 2003*; Feliu, M.J., Martín, J., Edreira, M.C., Fernández, M.C., Martínez, M.P., Gil, A., Alcántara, R., Eds.; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz: Cádiz, Spain, 2003; pp. 85–90. ISBN 84-96274-65-9.
34. Bernal, D.; Arévalo, A.; Morales, A.; Roselló, E. Un ejemplo de conservas de pescado baelonenses en el siglo II a.C. In *Las "Cetariae" de "Baelo Claudia": Avance de Las Investigaciones Arqueológicas en el Barrio Meridional (2000–2004)*; Arévalo, A., Bernal, D., Eds.; Junta de Andalucía, Consejería de Cultura and Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones: Cádiz, Spain, 2007; pp. 355–374. ISBN 978-84-9828-155-2.
35. Muñoz, Á.; Expósito, J.Á. The Archaeological Ensemble of Baelo Claudia and its monographic museum. Historiographical and management brief notes. *Boletín del Museo Arqueológico Nacional* **2017**, *1*, 89–93.
36. Bernal, D.; Expósito, J.Á. Baelo Claudia, puerto pesquero, comercial y de viajeros. Nuevas perspectivas. In *Los Puertos Atlánticos Béticos y Lusitanos y su Relación Comercial Con el Mediterráneo*; Campos, J.M., Bermejo, J., Eds.; L'Erma di Bretschneider: Roma, Italy, 2017; pp. 307–344. ISBN 9788891315205.
37. Amaro-Mellado, J.L.; Morales-Esteban, A.; Asencio-Cortés, G.; Martínez-Álvarez, F. Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics* **2017**, *717*, 449–472. [[CrossRef](#)]
38. Amaro-Mellado, J.L.; Morales-Esteban, A.; Martínez-Álvarez, F. Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system. *Cent. Eur. J. Oper. Res.* **2018**, *26*, 739–758. [[CrossRef](#)]
39. Dirección General de Bienes Culturales—Consejería de Cultura y Medio Ambiente. *Resolución de 10 de Diciembre de 1991*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, Spain, 1991; pp. 4667–4672.
40. Junta de Andalucía. *Decreto 129/1989*; Boletín Oficial de la Junta de Andalucía: Seville, Spain, 1989; pp. 3053–3054.
41. Fincker, M.; Moretti, J.-C.; Fellague, D.; Le Meaux, H.; Rodríguez-Gutiérrez, O. Recherches récentes au théâtre de Baelo Claudia. In *II Jornadas Internacionales de Baelo Claudia: Nuevas Investigaciones*; Junta de Andalucía, Consejería de Cultura: Cádiz, Spain, 2010; pp. 237–257. ISBN 9788499592145.
42. Leica Geosystems BLK360 Laser Scanner. Leica Geosystems AG: Heerbrugg, Switzerland, 2018. Available online: <https://leica-geosystems.com/en-GB/products/laser-scanners/scanners/blk360> (accessed on 19 April 2018).
43. Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.C.; Gorte, B. Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; Chen, J., Jiang, J., Maas, H.-G., Eds.; International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS): Beijing, China, 2008; Volume XXXVII, pp. 615–620.
44. Riquelme, J.A.; Ferrer, B.; Mas, D. Use of High-Quality and Common Commercial Mirrors for Scanning Close-Range Surfaces Using 3D Laser Scanners: A Laboratory Experiment. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 1152. [[CrossRef](#)]
45. Leica Geosystems. Leica Cyclone REGISTER 360-3D Laser Scanning Point Cloud Registration Software. Leica Geosystems AG: Heerbrugg, Switzerland, 2018. Available online: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360> (accessed on 24 January 2019).
46. Tang, P.; Huber, D.; Akinici, B.; Lipman, R.; Lytle, A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Autom. Constr.* **2010**, *19*, 829–843. [[CrossRef](#)]
47. Vosselman, G.; Gorte, B.G.H.; Sithole, G.; Rabbani, T. Recognising structure in laser scanning point clouds. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—ISPRS Archives: Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*; Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., Weinacker, H., Eds.; Institute for Forest Growth, Institute for Remote Sensing and Landscape Information Systems: Freiburg, Germany, 2004; pp. 33–38.

48. Girardeau-Montaut, D. Cloud Compare: 3D Point Cloud and Mesh Processing Software. Available online: <http://www.danielgm.net/cc/> (accessed on 1 March 2017).
49. Zhang, W.; Qi, J.; Wan, P.; Wang, H.; Xie, D.; Wang, X.; Yan, G.; Zhang, W.; Qi, J.; Wan, P.; et al. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 501. [CrossRef]
50. Girardeau-Montaut, D. Normals\Compute. Available online: <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Normals%5CCompute> (accessed on 28 November 2018).
51. Unity Technologies Unity Manual. Available online: <https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/AnatomyofaMesh.html> (accessed on 12 November 2016).
52. Kazhdan, M.; Hoppe, H. Screened poisson surface reconstruction. *ACM Trans. Graph.* **2013**, *32*, 29. [CrossRef]
53. Lorensen, W.E.; Cline, H.E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques—SIGGRAPH'87, Anaheim, CA, USA, 27–31 July 1987; ACM Press: New York, NY, USA, 1987; Volume 21, pp. 163–169.
54. Cignoni, P.; Callieri, M.; Corsini, M.; Dellepiane, M.; Ganovelli, F.; Ranzuglia, G. MeshLab: An Open-Source Mesh Processing Tool. In *Eurographics Italian Chapter Conference*; Scarano, V., De Chiara, R., Erra, U., Eds.; The Eurographics Association: Salerno, Italy, 2008.
55. Artec 3D. *Artec Studio 10 Professional*; Artec 3D, 2015. Available online: <https://www.artec3d.com/> (accessed on 1 March 2017).
56. Robert McNeel & Associates Rhinoceros. 2014. Available online: <https://www.rhino3d.com/> (accessed on 1 March 2017).
57. Robert McNeel & Associates Grasshopper. 2014. Available online: <https://www.grasshopper3d.com/> (accessed on 1 March 2017).
58. Roca, P.; Cervera, M.; Gariup, G.; Pelà, L. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. *Arch. Comput. Methods Eng.* **2010**, *17*, 299–325. [CrossRef]
59. ANSYS Inc. *ANSYS CFD Guide*; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2018.
60. Anton, H.; Rorres, C. *Elementary Linear Algebra: Applications Version*, 10th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2010; ISBN 978-0-470-56157-7.
61. ANSYS Inc. *ANSYS Manual Set*; ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive: Canonsburg, PA, USA, 1998.
62. Pineda, P. Collapse and upgrading mechanisms associated to the structural materials of a deteriorated masonry tower. Nonlinear assessment under different damage and loading levels. *Eng. Fail. Anal.* **2016**, *63*, 72–93. [CrossRef]
63. Pineda, P.; García-Martínez, A.; Castizo-Morales, D. Environmental and structural analysis of cement-based vs. natural material-based grouting mortars. Results from the assessment of strengthening works. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *138*, 528–547. [CrossRef]
64. Pineda, P. Ancient Materials and Singular Constructions: Numerical, Experimental, and Heritage Strategies to Preserve Masonry Structures in Seismic Areas. In *Civil and Environmental Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*; Association, I.R.M., Ed.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2016; pp. 340–359. ISBN 9781466696198.
65. Elhaddad, F.; Carrascosa, L.A.M.; Mosquera, M.J. Long-term effectiveness, under a coastal environment, of a novel conservation nanomaterial applied on sandstone from a Roman archaeological site. *J. Cult. Herit.* **2018**, *34*, 208–217. [CrossRef]
66. AENOR. *UNE-ENV 1996-1-3 EUROCODIGO 6, Proyecto de Estructuras de Fábrica; Parte 1–3: Reglas Generales Para Edificios, Reglas Detalladas Para Acciones Laterales*; Normalización Española: Madrid, Spain, 2000. (In Spanish)
67. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadersh. Manag. Eng.* **2011**, *11*, 241–252. [CrossRef]





### **I.2.3. Trabajo tercero: Implementation and management of structural deformations into Historic Building Information Models**

Este artículo de revista (Nieto-Julián *et al.*, 2019) aborda la implementación y gestión de deformaciones estructurales de edificios históricos en modelos de información HBIM. Para lograrlo, la metodología propone dos procedimientos de modelado del Cenador de Carlos V del Real Alcázar de Sevilla, a fin de generar elementos estructurales paramétricos que constituyan el proyecto HBIM del caso de estudio. Además, mediante el análisis llevado a cabo en esta tesis, fruto de anteriores publicaciones (Antón *et al.*, 2018; Antón *et al.*, 2019), se comparan dos estados de elementos estructurales en el proyecto HBIM del edificio: el modelo teórico —sin deformaciones— de uno de sus muros, generado a partir de fuentes documentales, y el modelo *as-built* del mismo, creado mediante nubes de puntos procedentes de escaneado láser y fotogrametría. Este análisis muestra desviaciones importantes a nivel geométrico entre ambos modelos. Finalmente, tiene lugar la gestión de deformaciones existentes en el edificio mediante BIM. Los elementos que presentan patologías son identificados y etiquetados, además de clasificados en función de su estado de conservación, lo cual adquiere especial relevancia a nivel de intercambio de información entre los distintos agentes que intervienen en el proceso de conservación patrimonial.

La referencia de este artículo de revista es la siguiente:

Nieto-Julián, J. E., Antón, D., & Moyano, J. J. (2019). Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1610523>

Autores y adscripciones:

- **Juan Enrique Nieto Julián.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla
- **Daniel Antón García.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla
- **Juan José Moyano Campos.** Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla



### I.3. Otras publicaciones

La presente tesis doctoral es el resultado de más de seis años de investigación por parte del doctorando sobre las tecnologías de escaneo 3D en el patrimonio arquitectónico, por lo que cabe enumerar las distintas publicaciones que han llevado a adquirir los conocimientos necesarios para realizar esta tesis. Se enumeran por orden cronológico dichas publicaciones:

Nieto Julián, J. E., Moyano Campos, J. J., Rico Delgado, F., & Antón, D. (2013). La necesidad de un modelo de información aplicado al patrimonio arquitectónico. In B. Fuentes Giner & I. Oliver Faubel (Eds.), *1er Congreso Nacional BIM – EUBIM 2013* (pp. 21–32). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/29127>

Nieto, J. E., Moyano, J. J., Rico, F., & Antón, D. (2016). Management of built heritage via HBIM Project: A case of study of flooring and tiling. *Virtual Archaeology Review*, 7(14), 1. <https://doi.org/10.4995/var.2016.4349>

Moyano, J. J., Barrera, J. A., Nieto, J. E., Marín, D., & Antón, D. (2017). A Geometrical Similarity Pattern as an Experimental Model for Shapes in Architectural Heritage: a Case Study of the Base of the Pillars in the Cathedral of Seville and the Church of Santiago in Jerez, Spain. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, XLII-2/W3(March), 511–517. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-511-2017>

Cortés-Sánchez, M., Riquelme-Cantal, J. A., Simón-Vallejo, M. D., Parrilla Giráldez, R., Odriozola, C. P., Calle Román, L., ... Cantero-Chinchilla, F. N. (2018). Pre-Solutrean rock art in southernmost Europe: Evidence from Las Ventanas Cave (Andalusia, Spain). *PLOS ONE*, 13(10), e0204651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208212>

Chaza Chimeno, M. R., Rico Delgado, F., & Antón, D. (2018). Registro del estado de conservación de elementos arquitectónicos singulares del Pabellón de Industrias, Manufacturas y Artes Decorativas de la Exposición Iberoamericana de Sevilla. In A. Graciani García & M. Ponce Ortiz de Insagurbe (Eds.), *Devenir y actualidad del legado de la Exposición Iberoamericana* (pp. 43–56). Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.



## Anexo II

### II.1. Materiales suplementarios

- Los resultados de 4.2.4. *Análisis geométrico* descrito en los subapartados *Desplomes de columnas y tambores* y *Distorsión de tambores*, presentados en 6.4.1. *Desplomes y distorsiones de columnas y tambores* para determinar cuál es la columna que presenta mayores desplomes/desplazamientos y distorsiones, se recogen como anexo en la Tabla A1. Desplazamientos y distorsiones en columnas.
- La superficie y el volumen de todos los tambores de columna de la Basílica de Baelo Claudia se presentan como anexo en la Tabla A2. Superficie y volumen de columnas.
- Los desplomes o desplazamientos de centroides de todas las columnas completas (con capitel) y sus tambores se muestran como anexo en la Figura A1. Desplazamientos de centroides.
- El análisis de alteraciones geométricas superficiales de todas las secciones de la columna C19 se recogen como anexo en la Figura A2. Análisis de deformaciones.

### II.2. Equipos usados en la investigación

- Ordenador portátil para el escaneado óptico, mallado 3D, la validación del proceso, el modelado sólido para la reconstitución digital, la programación en Grasshopper, el análisis geométrico y la evaluación de la nivelación del escáner Leica BLK360: microprocesador de 4 núcleos a 3,3 GHz con 6 MB de caché; 16 GB de memoria RAM DDRIII a 1,600 MHz; tarjeta gráfica PCIe 2.0 con 336 núcleos a 598 MHz y 3 GB de memoria GDDR5 de 192 bits a 1,500 MHz y ancho de banda de 72 GB/s.
- Ordenador de escritorio para el procesado de nubes de puntos y el mallado 3D: microprocesador de 6 núcleos a 3,6 GHz con 15 MB de caché; 32 GB de memoria RAM DDR4 a 2,400 MHz; tarjeta gráfica dual PCIe 3.0 con 2,560 núcleos a 1,607 MHz y 2 x 8 GB de memoria GDDR5X de 256 bits a 10 GHz con ancho de banda de 320 GB/s cada una.
- Estación de trabajo para la generación de mallas FEM y la simulación estructural FEM: 2 x microprocesador (12 núcleos) Intel Xeon a 3,3 GHz; 24 GB de memoria RAM DDR3.
- Escáner láser Leica ScanStation C10 (Leica Geosystems, 2016b).
- Escáner óptico 3D Artec MHT (Artec 3D, 2010).
- Escáner láser Leica BLK360: sus especificaciones técnicas se pueden encontrar en (Leica Geosystems, 2018a).
- Receptor Leica GS18 y registrador de datos Leica CS20 para la toma de puntos de control mediante GNSS para la evaluación de la nivelación del escáner Leica BLK360.