



PROYECTO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DE UN ESPACIO
ARQUITECTÓNICO MEDIANTE ELEMENTOS PARAMÉTRICOS
HOTEL ARIZÓN, SANLUCAR DE BARRAMEDA (CÁDIZ)

Autor: Ignacio Gil Arizón | Tutor: Dr. Juan José Moyano Campos | Curso 2020/2021

INDICE

MEMORIA ACADÉMICA.....	3
Agradecimientos	3
Justificación del tema elegido	4
Competencias de la asignatura.....	4
Aportación del grado de investigación en mi carrera profesional.....	6
MEMORIA DE INVESTIGACIÓN	7
Introducción	7
¿Qué consideramos bien de interés cultural?	7
Antecedentes en las técnicas de adquisición de datos.....	7
<i>Método tradicional</i>	7
<i>Fotogrametría</i>	8
<i>LiDAR</i>	8
<i>Escáner láser</i>	8
Objetivos.....	11
<i>Objetivos generales</i>	11
<i>Objetivos específicos</i>	11
Reseña histórica del Hotel Arizón	11
Metodología de trabajo	11
<i>Fotogrametría</i>	12
<i>Escáner láser</i>	18
<i>Modelado en software BIM</i>	20
<i>Resultado del modelado 3D del patio de honor del Hotel Arizón</i>	28
<i>Análisis de deformaciones en las columnas</i>	29
Resultados obtenidos en las distintas metodologías.	34
<i>Interpretación de las desviaciones a través de los resultados obtenidos por el software Dynamo©</i>	34
<i>Interpretación de las desviaciones a través de los resultados obtenidos por el software C2C©</i>	38
Fiabilidad de las distintas metodologías	41
Discusión de los resultados.....	43
Conclusiones	44
Futuras investigaciones	45
Glosario de términos	45



Bibliografía.....	47
Anexos.....	49

MEMORIA ACADÉMICA

Agradecimientos

Me gustaría agradecer este trabajo a mi familia, por ser un apoyo constante y una fuente de motivación e inspiración a lo largo de mi carrera.

A mis amigos, que incluso en la distancia siempre han estado ahí, en las buenas y en las malas, y me han aconsejado en cada consulta de redacción durante este trabajo.

A mi tía Tere, tanto por la ayuda que me ha prestado con su trabajo, como también por la alegría y el optimismo que siempre me transmite.

Quería agradecer también a todos los profesores que han sabido guiarme en este largo camino. Cada uno de ellos ha sabido despertar la curiosidad por esta profesión, y con ello las ganas de seguir aprendiendo cuando esta etapa finalice.

En especial, quería mencionar a Juan José Moyano Campos, mi tutor, que tanto me ha guiado en el proceso haciendo de este proyecto un trabajo motivante y enriquecedor.

Al Profesor Dr. Juan Enrique Nieto Julián, por toda la ayuda que me ha aportado en el trabajo de campo.

A Ana Caraballo Bocanegra y al Dr. José David Bienvenido Huertas, por el tiempo que han dedicado a resolver algunas de mis dudas.

Justificación del tema elegido

A lo largo de los últimos años, hemos sido testigos de diversas intervenciones en el ámbito de la construcción que, fruto de especulaciones, intereses económicos o negligencia, atentan contra nuestro patrimonio arquitectónico. A consecuencia de lo anterior, nacen en España organizaciones como “Lista Roja del Patrimonio”, donde se recogen, entre otros elementos del Patrimonio Cultural Español, aquellos inmuebles sometidos a riesgo de desaparición, destrucción o alteración (Morales, 1996). Es deber nuestro, como ciudadanos y como técnicos, velar por su conservación, ya que el patrimonio cultural constituye una parte esencial de nuestra identidad.

Al comienzo de este trabajo, era voluntad realizar un proyecto de investigación sobre fotogrametría aplicada a conservación de patrimonio, con el objetivo personal de adquirir conocimientos sobre estas nuevas tecnologías de levantamiento.

Con el avance del trabajo, y viendo que los resultados fotogramétricos no eran satisfactorios, optamos por enfocarnos en el análisis estructural a partir de un escaneo láser y un modelo 3D idealizado, haciendo una comparativa de resultados con distintos softwares.

Con esto, nos adentramos en un trabajo de investigación innovador que aplica conocimientos BIM, programación visual enfocada a nuestra profesión y análisis e interpretaciones estadísticas.

Competencias de la asignatura

Competencias extraídas del Proyecto Docente de la asignatura.

- Competencias básicas
 - o B01. Haber demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.
 - o B02. Saber aplicar los conocimientos al trabajo o vocación propia de una forma profesional y poseer las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro del área de la arquitectura.
 - o B03. Tener la capacidad para reunir e interpretar datos relevantes en el ámbito de la arquitectura para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.
 - o B04. Capacidad de transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.
 - o B05. Haber desarrollado aquellas habilidades básicas de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.
- Competencias genéricas
 - o G01. Capacidad de organización y planificación.
 - o G02. Capacidad para la resolución de problemas.
 - o G03. Capacidad para tomar decisiones.

- G04. Aptitud para la comunicación oral y escrita de la lengua nativa.
 - G05. Capacidad de análisis y síntesis.
 - G06. Capacidad de gestión de la información.
 - G07. Capacidad para trabajar en equipo.
 - G08. Que los estudiantes tengan capacidad para el razonamiento crítico y sepan examinar y enjuiciar los temas tratados a través de procesos analíticos y deductivos, así como analizar su propia actuación utilizando los mismos criterios.
 - G09. Capacidad para trabajar en un equipo de carácter interdisciplinar.
 - G10. Que los estudiantes tengan capacidad para el razonamiento crítico de manera que sepan integrarse y comunicarse con expertos en otras áreas y trabajar en contextos abiertos apreciando el valor de otras personas para enriquecer el proyecto, demostrando una apertura a la interdisciplinariedad.
 - G11. Capacidad de improvisación y adaptación para enfrentarse a nuevas situaciones.
 - G12. Que los estudiantes tengan capacidad y aptitud para el liderazgo y sepan influir sobre otros individuos y/o grupos anticipándose al futuro y contribuyendo a su desarrollo personal y profesional.
 - G13. Actitud social positiva frente a las innovaciones sociales y tecnológicas.
 - G14. Capacidad de razonamiento, discusión y exposición de ideas propias.
 - G15. Capacidad de comunicación a través de la palabra y de la imagen.
 - G16. Capacidad de búsqueda, análisis y selección de la información.
 - G17. Capacidad para el aprendizaje autónomo.
 - G19. Aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y resolución de problemas dentro de su área de estudio.
 - G23. Conocer y comprender el respeto a los derechos fundamentales, a la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres, la accesibilidad universal para personas con discapacidad, y el respeto a los valores propios de la cultura de la paz y los valores democráticos.
 - G24. Que los estudiantes hayan adquirido los conocimientos, actitudes y habilidades para actuar de forma proactiva, poniendo en acción sus ideas en forma de actividades y proyectos.
 - T1. Que tengan un compromiso con la identidad, desarrollo y ética profesional, y capacidad para reconocerse y valorarse como profesional que ejerce un servicio a la comunidad y se preocupa por su actualización permanente respetando y apoyándose en los valores éticos y profesionales.
 - T2. Que tengan capacidad para evaluar los posibles impactos que se provocan como consecuencia los trabajos relacionados con la edificación, manifestando especial sensibilidad hacia temas medioambientales.
 - T3. Que tengan especial motivación por la calidad de manera que desarrolle habilidades y actitudes que le permitan realizar trabajos que tengan por resultado mayor eficacia y productividad.
- Competencias Específicas
- E71. Presentación y defensa ante un tribunal universitario de un PFG, consistente en un ejercicio de integración de los contenidos formativos recibidos y las competencias adquiridas.

Aportación del grado de investigación en mi carrera profesional

Viendo la importancia que tiene en la actualidad la metodología BIM, y mi interés por desarrollar estudios complementarios, completé los estudios de un máster enfocado en esta metodología. Este máster supuso una gran ayuda para el desarrollo de este trabajo.

Con el presente trabajo, he tenido la oportunidad de adentrarme en una parcela aún poco investigada usando el software de scripts Dynamo®. A nivel profesional, este software puede utilizarse dentro del software BIM Revit® para crear rutinas (como duplicación de vistas, creación de niveles, etc.), o para elaborar diseños paramétricos de un edificio. En este trabajo, además de usarlo para crear alguna rutina, también se ha usado para el análisis estructural de las columnas.

Con los datos migrados de Dynamo® a Excel®, se ha podido realizar un análisis de deformaciones de los elementos estructurales, resultados que hemos contrastado con un software específico de comparación de nubes, CloudCompare®.

También se ha podido profundizar en el entorno BIM, elaborando modelos complejos con una nube de puntos como plantilla.

Todo este trabajo se traduce en una mejora de competencias en el análisis de resultados, en el uso de software específico usado en los distintos sectores profesionales a los que tenemos acceso, en el uso de nuevas tecnologías aplicables tanto para la conservación del patrimonio como para la certificación de ejecución de obra o levantamientos topográficos, además de suponer una apertura a nuevas líneas de investigación con la entrada de programas de scripts que pueden usarse en beneficio productivo dentro de nuestra profesión.

MEMORIA DE INVESTIGACIÓN

Introducción

Es objeto de este trabajo profundizar sobre las alternativas de levantamiento arquitectónico haciendo uso de las nuevas tecnologías que tienen que ver con la adquisición de datos precisos, concretamente el uso de Structure from Motion (SfM) y Terrestrial Laser Scanning (TLS).

Así mismo, y aprovechando los resultados obtenidos con estas técnicas de adquisición de datos masivos, elaboraremos un análisis sobre un modelo ideal construido a partir de estos datos para determinar la calidad del modelaje y la determinación de posibles deformaciones constructivas.

Cuando relacionamos estos dos métodos de levantamiento (SfM y TLS) con la arquitectura, estamos obligados a entrar en el campo del patrimonio arquitectónico, puesto que, dentro de la arquitectura, estos métodos están suponiendo a día de hoy una herramienta fundamental para la conservación del patrimonio. Es por eso que debemos definir el concepto de patrimonio arquitectónico, y con él, todos los conceptos que encontramos cuando hablamos de la conservación del patrimonio.

¿Qué consideramos bien de interés cultural?

Es un concepto de carácter general, recogido en la Ley de Patrimonio Histórico Español, el cual tiene el objeto de otorgar una singular protección y tutela al patrimonio que se considere, sea mueble o inmueble. Dentro de la Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico de España (España. Ley 16/1985, 1985) concretan que las distintas naturalezas de estos bienes implicarán medidas asimismo singulares. Enfocándonos en los Bienes Inmuebles de Interés Cultural, se recogen los siguientes:

- Monumentos históricos.
- Jardines históricos.
- Conjuntos históricos.
- Sitio histórico.
- Zonas arqueológicas.
- Lugares de interés etnológico.

En nuestro caso, el inmueble objeto de estudio se declaró Bien de Interés Cultural, con categoría de Monumento, mediante el Decreto 142/2001 de 12 de junio (Olaciregui Arrieta, 2015).

Antecedentes en las técnicas de adquisición de datos

Método tradicional

Uno de los métodos más recurridos en la adquisición de datos a lo largo de la historia de la arquitectura ha sido el dibujo arquitectónico, plasmando en éste los datos recogidos usando como herramientas fundamentales la triangulación, para medir las distancias; y los jalones, usado principalmente para determinar las distintas cotas del suelo en un punto concreto.

(Carrero Santamaría, 2008)

Fotogrametría

En el último siglo se ha dado un salto tecnológico importante. El método tradicional se había estado usando hasta entonces prácticamente como único método de adquisición de datos, además de otros medios visuales como la fotografía que nos permitían interpretar los detalles más singulares. Fue con el descubrimiento de la fotogrametría cuando hemos podido representar, de una manera más fidedigna, la realidad de los elementos arquitectónicos y topográficos, adquiriendo con éste método toda la información que una volumetría puede dar.

(Carrero Santamaría, 2008)

LiDAR

El LiDAR (Light Detection and Ranging) es una técnica de detección óptica usada principalmente en aplicaciones de representación cartográfica aérea. El sensor óptico transmite rayos láser hacia un objetivo, el cual lo refleja y es detectado por los receptores en el sensor LIDAR. Estos receptores registran el tiempo transcurrido desde la emisión del pulso láser hasta su regreso, calculando así la distancia entre sensor y objetivo.

El resultado de esta técnica de adquisición de datos es una nube de puntos, con sus coordenadas (x,y,z) y los datos RGB, y lo que denominamos “atributos LiDAR”. Entre estos atributos, encontramos el atributo “clasificación de puntos” el cual, en el postprocesado, define el tipo de objeto que reflejó el pulso láser. Este atributo clasifica al punto LiDAR en varias categorías, incluyendo: terreno desnudo, parte superior de cubierta forestal y agua.

(ArcGIS, 2019)

Escáner láser

Aunque no ha sido mencionado anteriormente, existe otro método de adquisición de datos que antecede a la fotogrametría moderna, y siendo complementaria a otros métodos de adquisición, nos referimos al método que usa una estación total.

Se puede considerar a la estación total como el antecesor del escáner láser. Ambos necesitan estacionarse y posicionarse. Ambos pueden georreferenciarse usando coordenadas UTM, coordenadas locales y/o GPS.

Sin embargo, el escáner laser también determina el color de los puntos mediante los datos RGB, exceptuando el color negro. (Izquierdo Toscano, 2017)

El resultado del escaneo láser, al igual que la fotogrametría digital y el LiDAR, es una nube de puntos situados en el espacio con unas coordenadas X,Y,Z. Aprovechando este apartado vamos a comparar estos tres métodos para conocer mejor sus diferencias en cuanto a instrumentalización:

Fotogrametría

Instrumentalización en campo:

Cámara fotográfica digital
Dianas
Trípode
Estación Total
Foco de luz difusa

Obtiene la nube de puntos correlacionando los puntos comunes de una serie de fotografías tomadas.

Tanto las fibras no reflectantes pueden causar problemas a la hora de la adquisición de datos.

Cuanto mayor sea la calidad y nitidez de la fotografía, mejores serán los resultados.

LIDAR

Instrumentalización en campo:

Láser Escáner Terrestre (TLS)
Diana de registro
Estación Total + Prisma
GPS
Generador eléctrico

Emite un pulso de láser desde un dispositivo móvil sobre una superficie y atrapa el eco del pulso en la fuente LiDAR, midiendo el tiempo de vuelo del láser, y con eso, la distancia de los distintos puntos.

Utilizado fundamentalmente en sistemas de información geográfica (SIG).

Escáner láser

Instrumentalización en campo:

Escáner láser
Trípode

Nube de puntos obtenidas mediante un haz de láser, que por medio de la diferencia de fase calcula la distancia desde el estacionamiento del escáner hasta los distintos puntos del espacio.

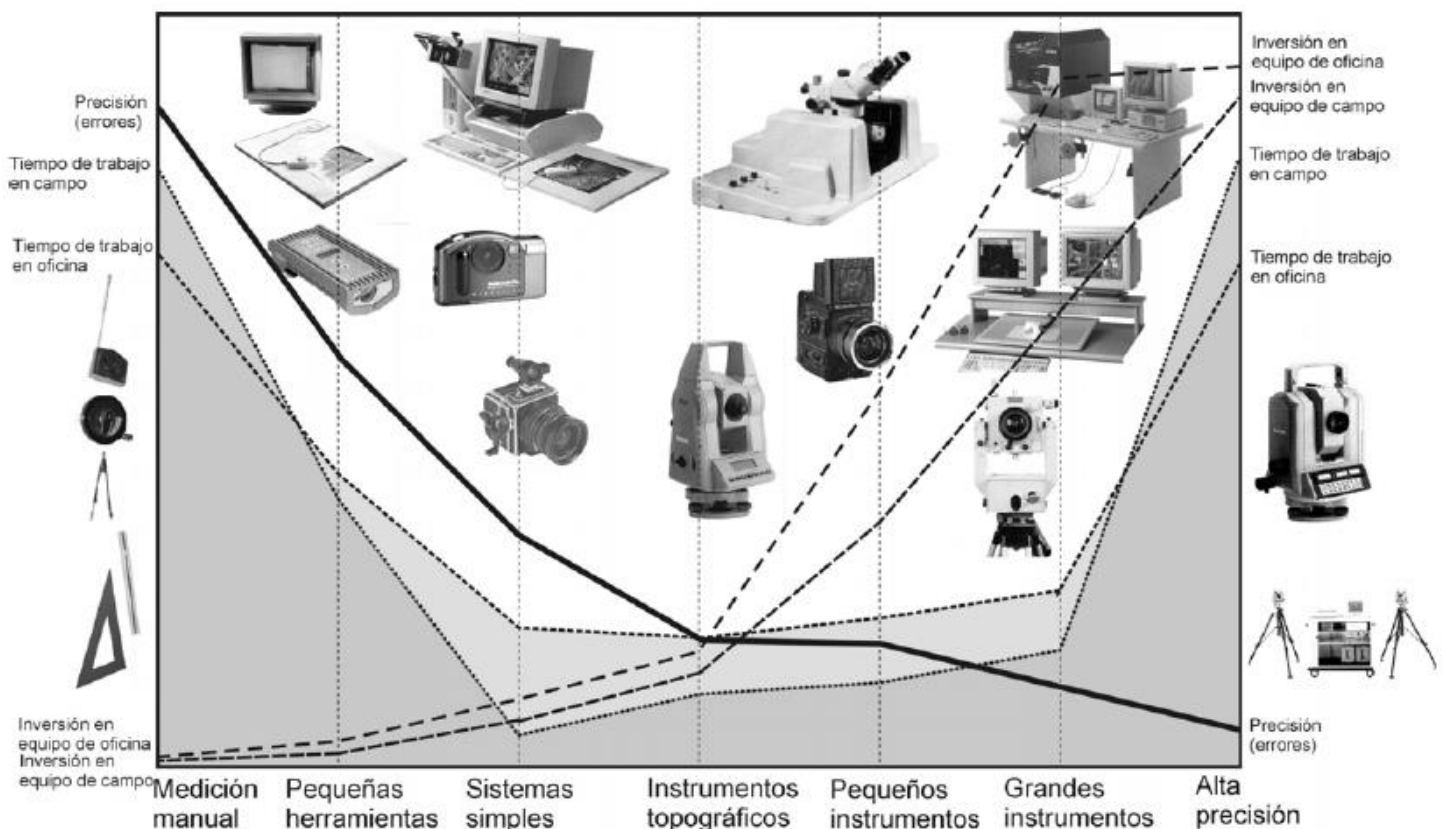


Imagen: (Almagro Gorbea, 2000)

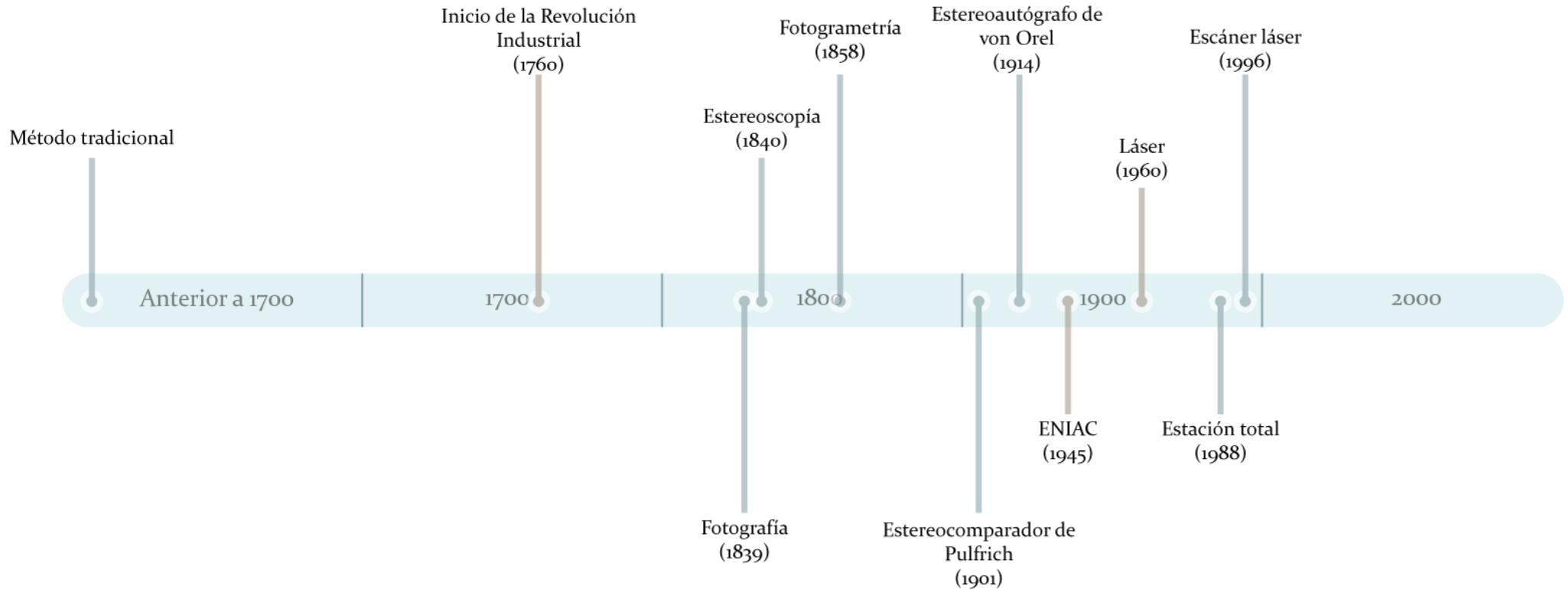


Imagen: elaboración propia

Fuentes usadas:

(Jacobs, 2020)

(Leica & Wild Heerbrugg, 2019)

(Kurtz, 2001) Kurtz, Gerardo F. (2001).

(Molero Alonso, 2017)

Objetivos

Objetivos generales

Levantamiento y reconstrucción 3D mediante plataforma digital BIM del patio del Hotel Arizón.

Objetivos específicos

Aproximación al estudio de las técnicas de adquisición de datos, mediante fotogrametría y escáner láser terrestre.

Levantamiento y reconstrucción 3D de los elementos estructurales.

Comprobación de las deformaciones estructurales entre la nube de puntos, obtenida mediante TLS, y los elementos paramétricos.

Aplicabilidad de los algoritmos Dynamo© y C2C© al análisis de las deformaciones estructurales.

Reseña histórica del Hotel Arizón

En ocasiones llamado erróneamente “palacio”, este conjunto arquitectónico constituía una casa de cargadores de Indias, poseyendo espacios destinados tanto a residencia como a almacenaje. Situada en Sanlúcar de Barrameda (Cádiz), entre la calle Divina Pastora y calle Banda de la Playa, se ubicaba en un punto estratégico para la actividad comercial con las Indias, teniendo acceso cercano tanto al río Guadalquivir como al mar.

Su distribución se consolidó en 1759. Entre las distintas modificaciones que sufrió el complejo desde que se tienen datos, uno de los más destacables es la incorporación de la ya inexistente calle Suela a la propiedad el 25 de enero de 1730. El patio de honor, objeto de estudio, se construyó entre 1721 y 1727.

Esta propiedad, que fue adquirida por los Arizón a finales de la primera década del siglo XVIII, fue vendida en 1989 en parte motivada por un programa de mejoras del entorno. En este momento, se conocía que las playas de Cádiz recibirían un impulso en materia de desarrollo turístico, y concretamente en Sanlúcar de Barrameda debido a la Exposición Universal de Sevilla prevista para 1992. Esto motivó un plan de actuación sobre el conjunto para su rehabilitación.

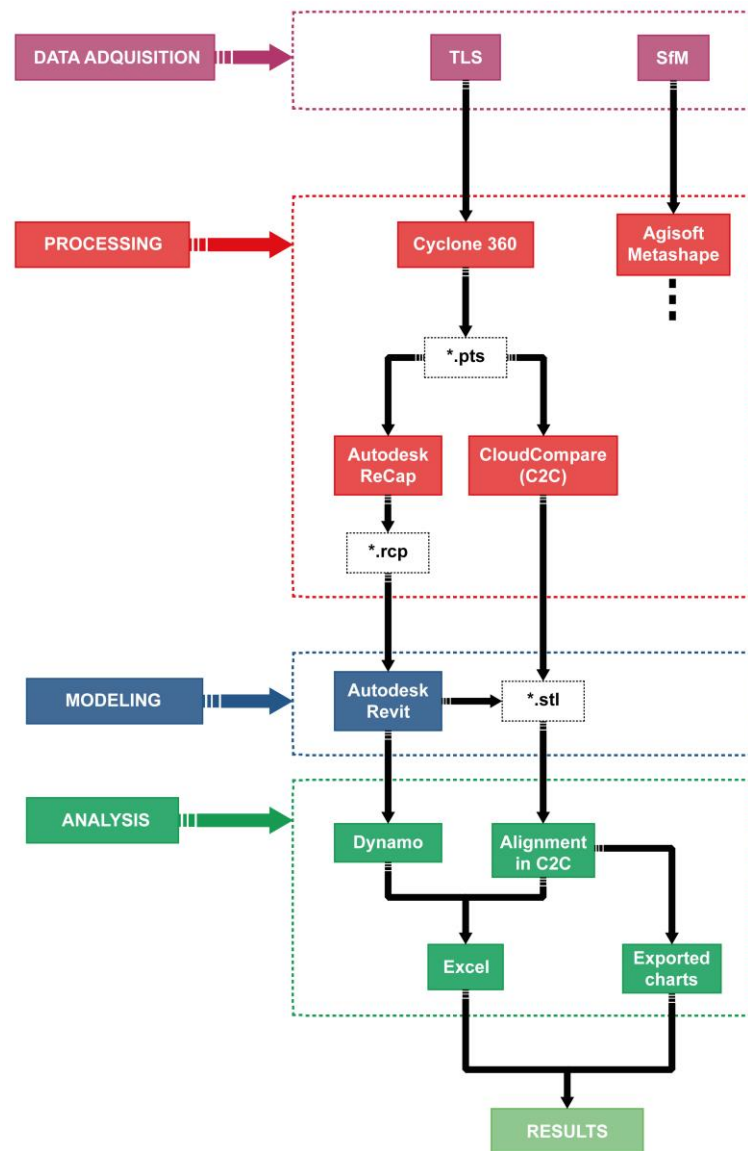
Ya en 1995, se le confirió al conjunto arquitectónico una protección en grado integral, una propuesta que estuvo incluida en la revisión-adaptación del P.G.O.U. de Sanlúcar de Barrameda, y más adelante, en 2001, fue declarado Bien de Interés Cultural por el Servicio de Protección del Patrimonio Histórico mediante Decreto 142/2001 del 12 de junio.

(Olaciregui Arrieta, 2015)

Metodología de trabajo

Se utilizó el TLS como técnica de adquisición de datos para la campaña experimental. El empleo de la nube de rango se tomó como auxiliar de referencia para levantar el modelo HBIM. Posteriormente para evaluar la calidad del modelo construido y analizar las desviaciones estructurales entre el modelo y la verdadera geometría, se utilizó el software complementario

a Revit© con Dynamo© (core build 2.1.0.7500, Revit© build 2.1.0.7733) y el software de C2C©. El uso de sensores de tiempo de vuelo es recomendable para edificios de grandes dimensiones, así como paisajes, o estudios arqueológicos. Para evitar las oclusiones en el levantamiento 3D, se realizó una planificación ordenada de los puntos de barrido del escáner al objeto de capturar toda la geometría posible.



I. Flujo de trabajo

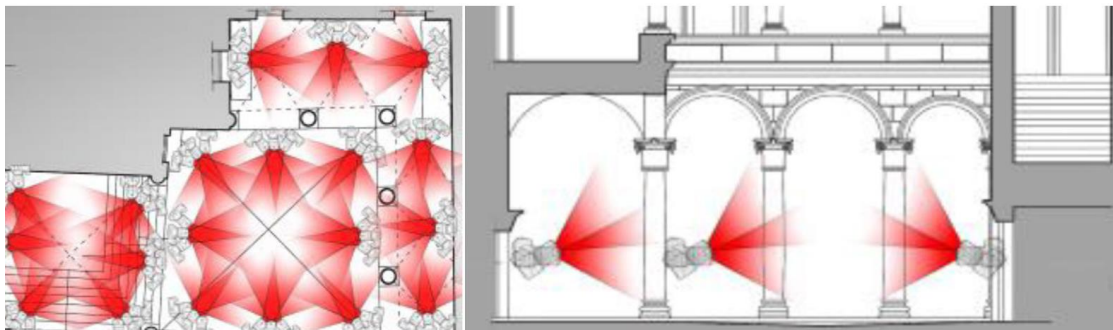
Fotogrametría

Aunque los resultados obtenidos no fueron satisfactorios para este trabajo, comentaremos la metodología de trabajo seguida tanto en campo como en gabinete. Nos apoyaremos en el PFG del autor (Ornia Nuñez, 2019); el artículo *Análisis sobre el diseño orientalista del tercer trasatlántico Alfonso XIII y su relación con el patio principal de La Casa de Pilatos*, (Sánchez Gordo, Nieto Julián, Antón García, Bienvenido-Huertas, & Moyano Campos, 2019); y el artículo de las autoras (Ippoliti, Meschini, & Sicuranza, 2015), *Structure from Motion systems for*

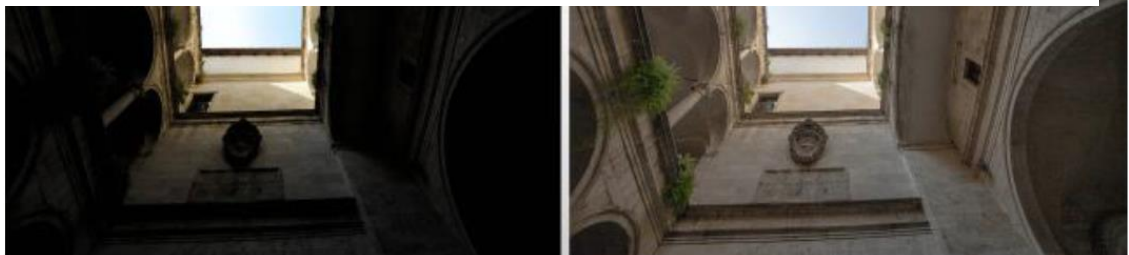
architectural heritage. A survey of the internal loggia courtyard of Palazzo dei Capitani para redactar este apartado.

- Trabajo de campo.

Se debe tener en cuenta el tratamiento de las fotografías tomadas dentro del software que vamos a utilizar, Agisoft Metashape Professional© versión 1.5.1 Build 7618. La dirección de las fotografías debe ser convergente, estemos rodeando un objeto centrado o, en el caso que nos ocupa, un patio interior. En este último caso se complica debido a las características dimensionales, dificultando la toma de fotografías a una distancia que permita la captación de detalles. Además, hay que tener en cuenta la posición del sol en el momento de realizar las fotografías. Se recomienda tomarlas con luz natural, pero sin que esta incida directamente sobre el elemento que se va a fotografiar, es decir, en penumbra.



II. Diagrama de fotografías tomadas en el patio. Autores: Ippoliti, Meschini y Sicuranza.



III. Comparación de la exposición en JPG (izquierda) y el procesado en RAW (derecha). Autores: Ippoliti, Meschini y Sicuranza.

En el trabajo de (Ippoliti et al., 2015), el equipo utilizado fue una cámara réflex Nikon 700 equipado con un sensor full-frame DSLR 36 x 23'9 mm y un objetivo Nikon Nikkor 15 mm f/3.5 Ai-S, con una resolución máxima de 4256 x 2832 pixels. En su trabajo, las fotos fueron tomadas en formato JPG+RAW con la exposición correcta en las zonas iluminadas, dejando las zonas más oscuras de la fotografía para una posterior corrección en gabinete, iluminando estas zonas sin sobreexponer las zonas iluminadas.

Se pretendió que las fotografías sucesivas compartieran un 80% de solapamiento cuando fuera posible, nunca siendo menor del 60%. Se tomaron un total de 152 fotografías.

En nuestro caso, el equipo consistía en una cámara réflex Nikon D80 equipado con un sensor Nikon DX 23.6 x 15.8 mm y un objetivo Nikon Nikkor 18 mm f/3.5, con una resolución máxima de 3872 x 2592 pixels. Las fotos fueron tomadas en formato JPG+RAW, y la edición se realizó mediante unos presets automáticos en el programa

Darktable, que modificaban el balance de blancos y el ruido, y exportando la imagen en formato TIFF 16bits.



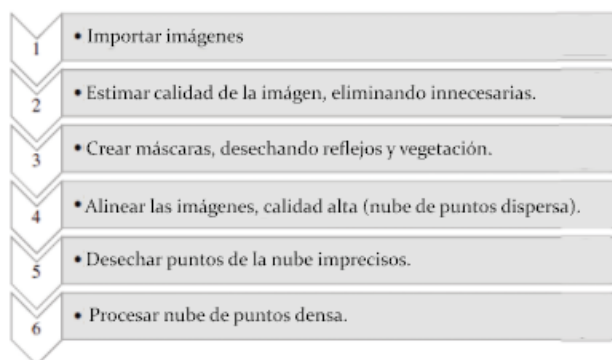
Tras la toma de fotografías, establecimos unos puntos de control tomados con una Estación Total con el fin de escalar la nube de puntos e indexarla mediante los distintos

IV. Comparación de la exposición en JPG(izquierda) y el procesado en RAW(derecha). Elaborado por el autor, 2020.

chunks.

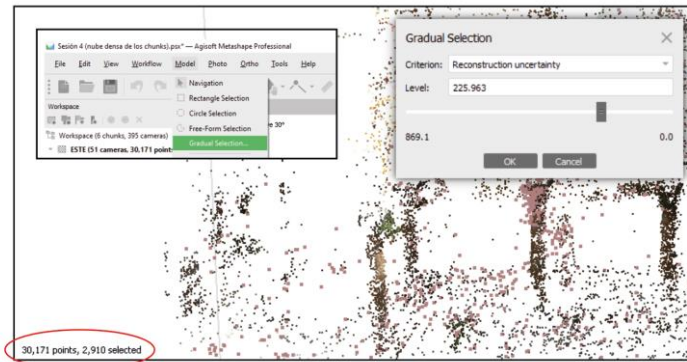
- Trabajo de gabinete.

Una vez realizado el trabajo en campo, y teniendo las fotografías en formato RAW procesadas, las dividimos según la orientación de la fachada para crear distintos chunks y las introducíamos en el programa de Agisoft Metashape Professional (Agisoft, 2020). Dentro del programa el flujo de trabajo por cada chunk quedaría así:



V. Flujo de trabajo dentro de Agisoft Metashape Pro


El método para desechar los puntos imprecisos es el siguiente. Dentro del programa de Agisoft, seleccionamos la nube de puntos dispersa (Tie Points). Abrimos la pestaña "Model", y seleccionamos "Gradual selection". Elegimos el criterio "reconstruction uncertainly", y desplazamos la barra hasta seleccionar el 10% de los puntos, y los eliminamos.



VI. Selección aproximada del 10% de los puntos de la nube.

Después de esto, elegimos el criterio “reprojection error” en “Gradual selection”, y volvemos a seleccionar el 10% de los puntos.

Este proceso lo repetimos hasta conseguir que en un “level”: 0’3, seleccione menos del 10% de los puntos.

Después de cada proceso, optimizamos las cámaras. En el panel “Reference”, pinchamos en  (Optimize camera alignment).

Tras este proceso lo ideal es limpiar manualmente aquellos puntos que no pertenezcan al objeto de estudio, y proseguimos con la creación de la nube densa.

En nuestro caso, realizando una inspección visual de la nube resultante, concluimos que no reflejaba la realidad de una manera fiable debido al exceso de ruido.



VII. Resultado de la nube densa tras el proceso.

Analizando el proceso, vimos que en las fotografías tomadas no se definían los detalles como deberían, conteniendo una gran superficie de la realidad en un único pixel y mostrando los bordes indefinidos.

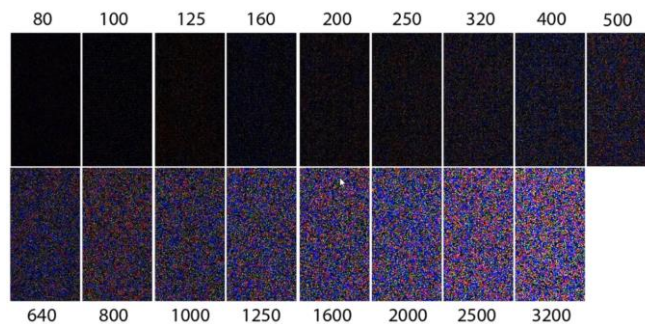


VIII. Zoom aplicado de izquierda a derecha: 100%, 200%, 400% y 800%.

En este punto, decidimos dirigir el presente trabajo por otra dirección, pero no quería dejar de comentar este proceso debido a que se analizaron errores que en un futuro trabajo pueden subsanarse. Para entender qué errores se cometieron, tenemos que profundizar en algunos conceptos fotográficos.

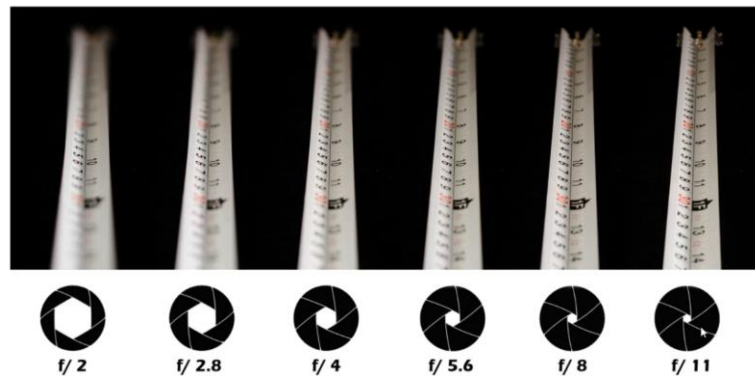
1. Parámetros de la cámara. (Bejarano, 2020)

- a. Distancia focal (f). Es la distancia entre el centro óptico de la lente y el sensor de la cámara. Cuanto mayor sea la distancia focal, menor será la deformación de la fotografía, pero perderá profundidad. Con ella puede determinarse la escala nominal de la fotografía. Distancia focal usada: 18mm.
- b. ISO. Este parámetro refleja la sensibilidad del sensor, cuando menor sea la ISO, mayor luz necesitaremos, pero será menor el ruido que se genere en la fotografía. Si la ISO es alta, se necesitará menos luz para hacer la fotografía, pero se generará ruido y la fotografía perderá calidad en la definición de detalles. Trabajando en campo, la ISO estaba configurada en 200.



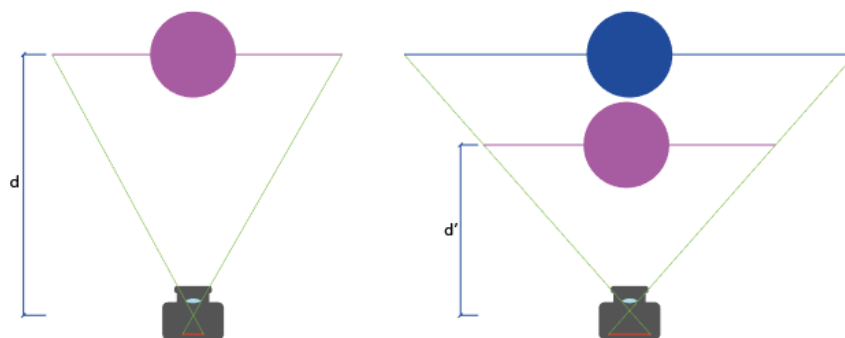
IX. Nivel de ruido relacionado con la sensibilidad ISO.

- c. Velocidad de obturación. También llamado “tiempo de exposición”. Corresponde al tiempo que la luz está incidiendo en el sensor. Si el tiempo de exposición es alto, los movimientos en la fotografía se verán como una estela, pero también necesitaremos menos luz. Parámetro que puede variar en cada fotografía, aunque no fue modificada en nuestro caso, siendo de 1/30 sg.
- d. Apertura de la lente (Punto F – $f/n.n$). Con este parámetro, controlamos la apertura de diafragma, o dicho de otra manera, cuanta luz dejo entrar en la cámara. Cuanto menor sea la apertura, más enfocada saldrá la fotografía. La apertura de nuestras fotos fue de $f/3.5$.



X. Variación del enfoque según la apertura del diafragma.

2. Iluminación y ruido. Nuestro objetivo en las fotografías es evitar lo máximo posible el ruido, pues nos genera píxeles con información residual, esto implica bajar la ISO lo máximo permitido. Además de esto, debemos poder definir los bordes de los objetos, por lo que será ideal tener una apertura de la lente lo más cerrada posible. Esto implica que las fotografías saldrán muy oscuras, pues entrará poca luz al sensor, y eso supone pérdida de información. Podemos corregir esto aumentando el tiempo de exposición, por lo que es fundamental el uso de un trípode que mantenga la cámara inmóvil durante la toma de fotografías, o podemos incorporar una fuente de luz difusa externa a la cámara y fija en un punto de la escena a fotografiar.
3. Importancia del tamaño de sensor. El sensor de la cámara es uno de los elementos a considerar más importantes. Cuanto mayor sea el sensor de la cámara, mayor capacidad tendrá de recoger señales con poca luz, y menor ruido presentará la fotografía al subir la sensibilidad del sensor (ISO). Además, cuanto mayor sea el sensor, podremos fotografiar el objeto desde más cerca, captando mejor los detalles al tener mayor resolución.



XI. Para un mismo tamaño de fotografía, se requiere menor distancia con un mayor sensor.

Con toda la información anterior, podemos determinar los errores que se cometieron en campo en cuanto a la configuración fotográfica, y las limitaciones que nos encontramos referentes al equipo utilizado.

1. Sensibilidad ISO. Como hemos dicho anteriormente, se configuró una sensibilidad ISO 200, cuando ésta debe ser lo mínima posible. Esto generó ruido en las fotografías.

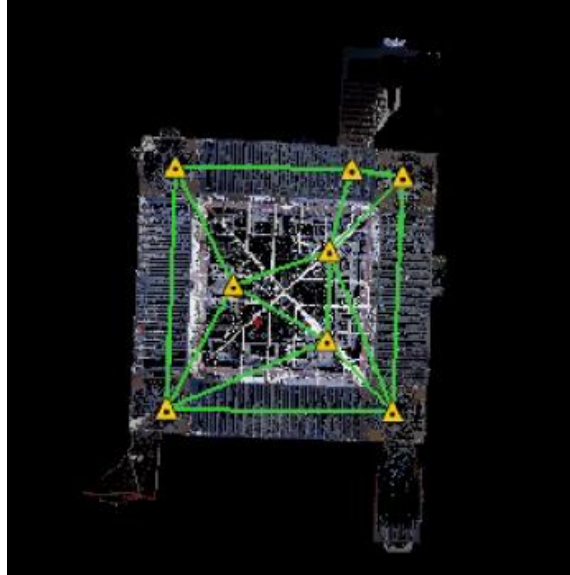
2. Apertura de la lente. Con una apertura de lente de $f/3.5$ no se consigue una definición óptima, quedando los bordes ligeramente difuminados.
3. Iluminación. Sabemos que en fotogrametría el flash de la cámara no debe usarse, por el arrojado de sombras, la variación de color, y la reflexión que produce en los objetos. El problema es cuando, al variar los dos parámetros anteriores, vemos que las fotografías salen con demasiada oscuridad, perdiendo muchísima información necesaria para una correcta fotogrametría. Por lo que tenemos que recurrir a aumentar el tiempo de exposición, dejando que la luz de la escena incida durante más tiempo sobre el sensor de la cámara.
Para esto, es entendible que sea completamente necesario el uso de un trípode, para evitar el movimiento de la cámara mientras incide la luz en el sensor. Con la variación de este parámetro puede ocurrir que las zonas de la escena que se encuentren iluminadas queden sobreexpuestas en la fotografía, lo que se conoce como el efecto “quemado”. Este efecto también supone una pérdida de información en esos píxeles, por lo que habrá que buscar un equilibrio entre las luces y las sombras.
En el artículo de Ippoliti, Meschini y Sicuranza, dieron prioridad a las zonas más iluminadas puesto que, al contar con una cámara con sensor Full-Frame, podían recoger mayor información de las zonas más oscurecidas, pudiendo corregir la exposición de manera localizada en postproducción.
En nuestro caso, al contar con un sensor “recortado”, considero más adecuado usar fuentes de iluminación externas a la cámara, focos de luz difusa que permanezcan estacionadas en la escena durante todo el proceso de adquisición de las fotografías, pudiendo así equilibrar las luces y las sombras, y evitando el efecto “quemado”. (consideración citada en la pág 246 de la tesis doctoral *Documentación Gráfica y Dinamización Del Patrimonio Histórico Mediante Nuevas Tecnologías*, 2017 del autor Alejandro Izquierdo Toscano)

Escáner láser

- Trabajo de campo.
El proceso de adquisición de datos lo realizó el profesor Juan Enrique Nieto Julián a través de 8 estacionamientos.
Se utilizó un escáner láser Leica BLK360 con un alcance de 120 metros para capturar la geometría. El rendimiento de este equipo fue estudiado por (Iindstaedt_2018), que confirmó una precisión del escáner de 6 mm a 10 metros para registrar puntos de control. Los escaneos se realizaron con un sistema de 3 cámaras HDR de 15 megapíxeles de alta resolución, obteniendo así un rango láser preciso. Los datos captados por el escáner láser fueron tratados previamente reconsiderando la posición del equipo, de modo que el escaneo de 360° pudiera registrar los espacios de los cuatro lados del patio y sus galerías. La distribución fue justa, por lo que las distancias no superaron los 5 metros. El tiempo de cada escaneo, con un escaneo de 360° con una imagen HDR de alta calidad, fue de hasta 5 min 30 seg. Una vez obtenidos los registros, el posprocesamiento se realizó con el software Leica Register 360, generando dos nubes de puntos global y parciales en .e57 formato.

- Trabajo de gabinete.

La información de los escaneos queda guardada en el escáner láser. Esta información, codificada mediante tipos de archivos nativos a la marca comercial del fabricante, se exportó al ordenador y se trabajó con el programa Cyclone Register 360 donde Juan Enrique Nieto alineó los escaneos a través de 15 enlaces, dando como resultado un archivo .pts.

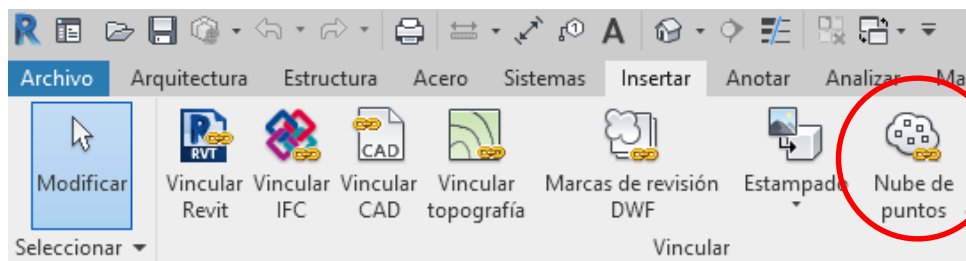


XII. Estacionamientos del escáner láser.

Este archivo se intentó procesar sin éxito en el programa de Agisoft Metashape Pro, al igual que en el programa open-source CloudCompare®, debido a que el ordenador no tenía potencia suficiente para tratar una nube de puntos tan pesada (14 gb). Las características del ordenador usado eran las siguientes:

- SO Windows 10 64 bits
- RAM 8 Gb
- Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 920M
- Microprocesador Intel Core i7

Sin embargo, pudo procesarse en el programa de Autodesk ReCap (Autodesk, n.d.) aprovechando una licencia temporal en A360. Se importó el archivo .pts en el software y se procesó en los servidores de Autodesk, dando como resultado un archivo .rcp, pudiendo vincularse dentro de otro software de Autodesk, Revit© 2020 (built 20.0.0.377) (Autodesk, 2020).



XIII. Barra de herramientas de Revit©.

Modelado en software BIM

Como hemos dicho en el apartado anterior, importamos la nube de puntos con extensión *.rcp al software Revit© 2020. Si por alguna razón, la nube de puntos no aparece, deberemos dirigirnos a la pestaña “Vista” – “Visibilidad de gráficos”, y en la ventana emergente, irnos a la pestaña “Nube de puntos” y activar su visibilidad. Una vez introducida en el programa, es recomendable editarla para que al menos uno de los paramentos quede alineado con uno de los ejes (X o Y). Tras esto, la nube de puntos funciona como una plantilla 3D, y para apoyarnos en ella seguimos este esquema:

1. Creamos secciones de apoyo.

Fundamental para tener una vista donde veamos de forma clara los distintos niveles en la nube de puntos.



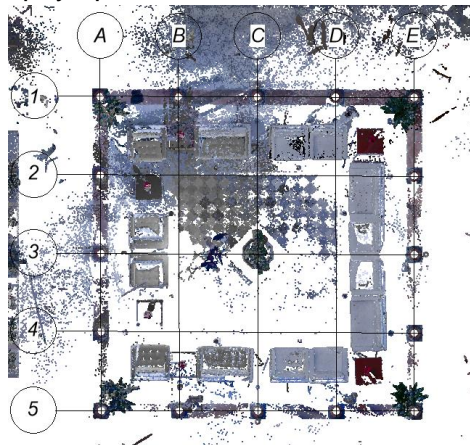
XIV. Sección tomada por el centro de la galería orientada al Este. Desde esta vista, hemos definido los niveles.

2. Definimos niveles.

En nuestro caso, los niveles definidos corresponden con el nivel de planta baja (PB), arranque de los arcos (Altura columnas), planta primera y la altura que alcanza el muro de la planta primera. Estos niveles nos ayudarán fundamentalmente a trazar los muros.

3. Introducimos elementos de referencia (planos y rejillas).

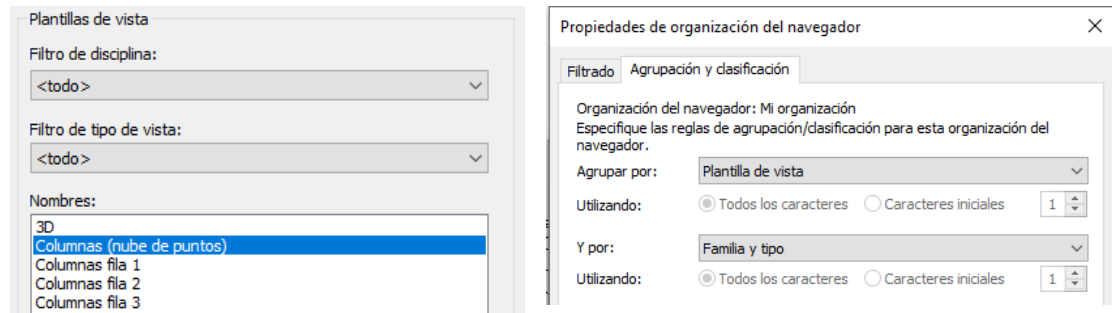
Las rejillas nos servirán para situar correctamente la posición de las columnas, además de servirnos a su vez de apoyo para trazar secciones de cada una de ellas.



XV. Vista de planta baja con las rejillas introducidas.

Los planos de referencia los usaremos a la hora de trazar los muros ya que, al no formar ángulos perfectos con respecto a los ejes X e Y, es más sencillo usar estos planos para no cometer errores.

- 4. Creamos plantillas de vista con el objeto de organizar el navegador de proyectos.** Al tener que generar tantas vistas del modelo, se hace fundamental y necesaria una organización en el navegador. Las plantillas de vista suponen una manera sencilla de hacerlo.



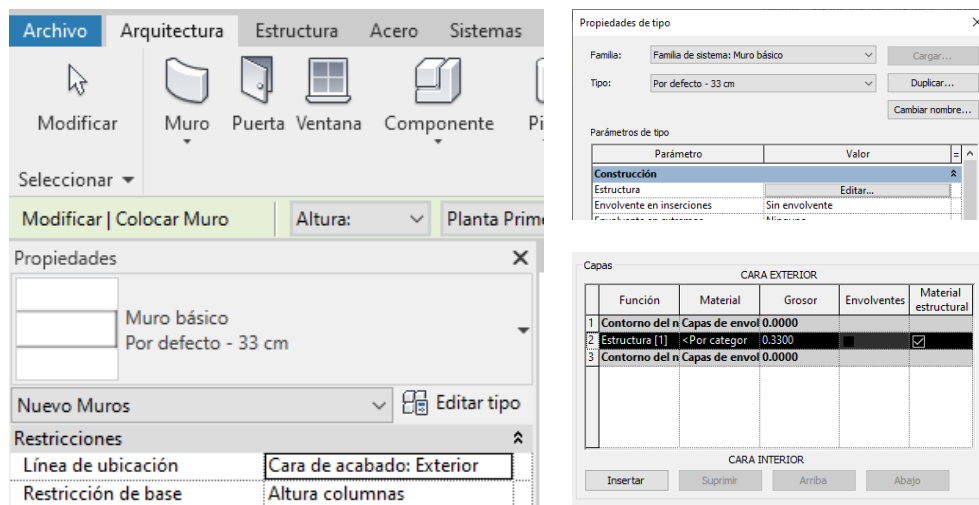
- 5. Introducimos los muros.**

Para ello nos guiamos de los planos de referencia y de los niveles. Siempre es mejor dividir el muro en los cambios de niveles. En este caso práctico, trazamos los muros estableciendo la restricción base en “Altura columnas” y la restricción superior “Hasta nivel: Planta Primera” e igual para los muros de la Planta Primera (restricción base en “Planta Primera” y restricción superior “Hasta nivel: Altura muro P1”).

Debemos establecer la anchura del muro, lo cual se recomienda antes de trazarlo. Al seleccionar la opción “Muro” en la pestaña “Arquitectura”, clicamos en “Editar tipo” dentro del panel de propiedades.

En la ventana emergente, duplicamos el tipo y lo nombramos con la anchura que vayamos a establecer. Tras crear el nuevo tipo de muro, debemos editar la estructura. Dentro de este apartado, podremos añadir las capas que componen el muro. En nuestro caso, el material de la estructura la hemos dejado “por defecto”, pero hemos editado su anchura.

Siguiendo estos pasos, hemos establecido dos anchuras: 33 y 35 cm.



6. Dibujando los arcos.

En Revit© no tenemos opción a modelar arcos de una manera directa, por tanto, tenemos que partir de los muros que hemos creado anteriormente. Para ello, debemos editar el perfil de los muros que se encuentran entre los niveles “Altura de columnas” y “Planta Primera”.

Para dibujar correctamente los arcos, creamos varias secciones de trabajo anteriormente, unas secciones que miraban a los muros desde el brocal hacia la galería y viceversa.

Aunque también podemos apoyarnos en una vista 3D de trabajo, modificando su región de vista variando las dimensiones de la caja de sección.

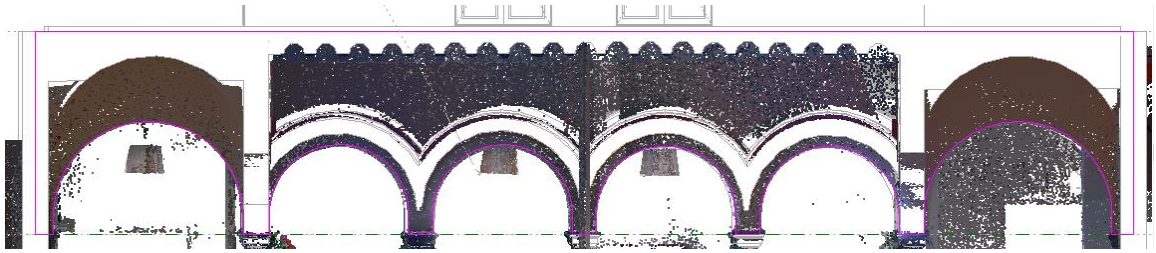
Vistas de brocal hacia galería

- B - Vista Este
- B - Vista Norte
- B - Vista Oeste
- B - Vista Sur

Vistas de galería hacia brocal

- G - Vista Este
- **G - Vista Norte**
- G - Vista Oeste
- G- Vista Sur

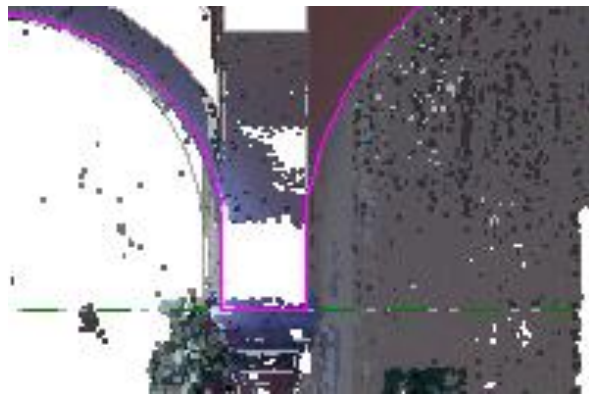
Hay que entender que, para modelar correctamente, la creación de vistas es fundamental, y la organización de nuestro navegador de proyectos será otra de las tareas que debemos cuidar durante nuestro trabajo. Una vez dentro de la vista correspondiente, y con el panel de edición del perfil del muro seleccionado activo, podemos empezar a editar hasta conseguir lo que vemos en la siguiente imagen:



XVI. Edición del perfil del muro para crear los arcos.

Puede ocurrir que nos notifiquen fallos en el momento que finalizamos la edición, y puede deberse a varios motivos:

1. “Las líneas deben estar en bucles cerrados. Las resaltadas están abiertas en un extremo”. En este caso comprobaremos las uniones resaltadas y corregiremos la unión.
2. “Las líneas no pueden intersectarse mutuamente. Las resaltadas se intersectan”. Parecido al fallo anterior. Buscaremos esa intersección y la corregiremos.
3. “No es posible crear extrusión”. Este fallo puede deberse a muchos motivos. En nuestro caso se puede dar debido a la intersección de los muros, ya que estos se unen automáticamente al intersectarse, con lo cual, no puede crear el vacío del arco en esa intersección.

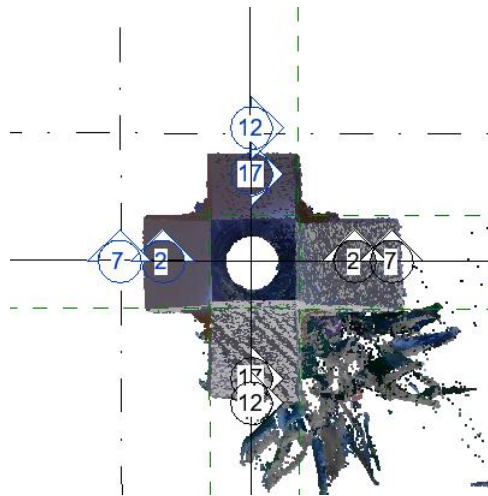


XVII. Intersección donde se producen errores

La solución más sencilla es seleccionar las líneas del perfil que pertenecen a dicha intersección y separarlas del muro intersectante hasta que Revit© nos permita crear la extrusión.

7. Modelamos las columnas in situ.

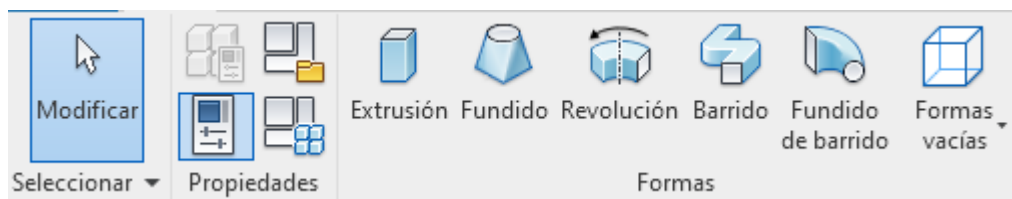
Para el modelado de las columnas, hemos establecido un modelo ideal que, guiándonos por la numeración de las rejillas, hemos denominado “columna A1”. Trazamos dos secciones en la columna A1, en el eje X e Y, seccionando por el centro de ésta.



XVIII. Secciones en la columna A1, elegida como modelo ideal

Abrimos la vista de la sección, y en la pestaña “Arquitectura”, clicamos sobre “Componente”, “Modelar in situ”, y en la ventana emergente seleccionamos la categoría “Pilares”.

Una vez hecho esto, el panel superior cambiará al siguiente:



XIX. Barra de herramientas del modelaje in situ

Analizando la forma de la columna (véase Figura 1), nos damos cuenta que se trata de una columna de orden toscano. Debido a la simplicidad de su geometría, nos facilitará su modelado. Para el modelado, también consideramos recomendable el apoyo en las fotografías tomadas para interpretar parte de su geometría. Fuente de apoyo (Battista Montano, 1562)

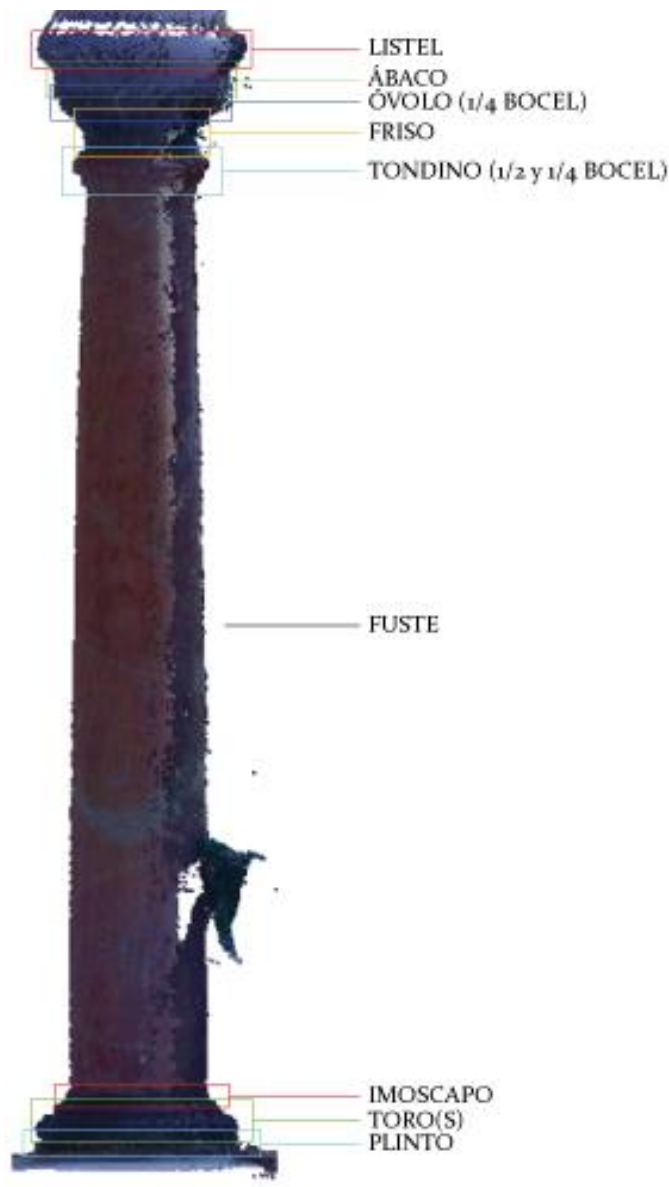


Figura 1. Vista ortogonal de los puntos de la nube que componen la columna.

recomendable asignarles los materiales. Para ello, y con el objeto de ahorrar tiempo, vamos a crear unos parámetros para los distintos materiales. En la barra “propiedades”, clicamos en “tipos de familia”, y en la parte inferior de la ventana emergente, seleccionamos “nuevo parámetro”. En tipo de parámetro, elegimos la opción “material”, y creamos el parámetro asignándole un nombre identificativo. Elegimos el material asociado al parámetro y creamos otro parámetro con un material diferente.

Una vez hecho esto, basta con elegir el elemento al que vamos a asignar el material, y en el apartado “materiales y acabados” elegimos el parámetro creado.

El plinto podemos modelarlo con una extrusión, al igual que el listel y el ábaco. Todos esos elementos deben ser modelados individualmente.

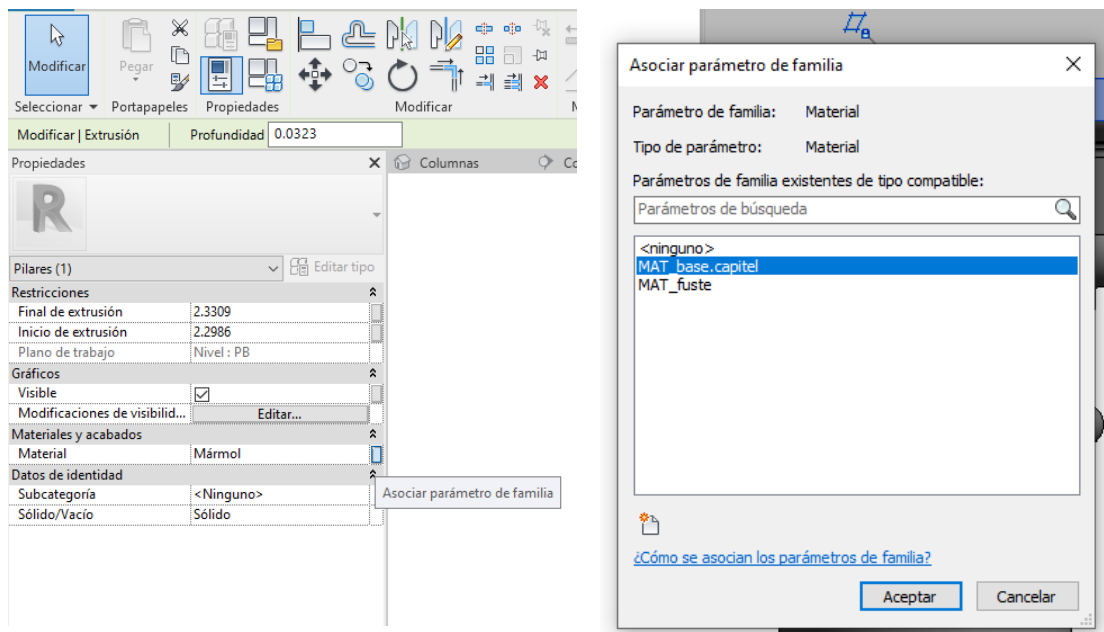
Modelamos tanto el fuste como el tondino en una única revolución.

El friso y el óvolo, aunque geoméricamente podrían incorporarse a la revolución anterior, lo modelamos en una nueva revolución, puesto que se componen de materiales diferentes, y eso nos ayudará en un futuro posterior al aplicar diferentes texturas.

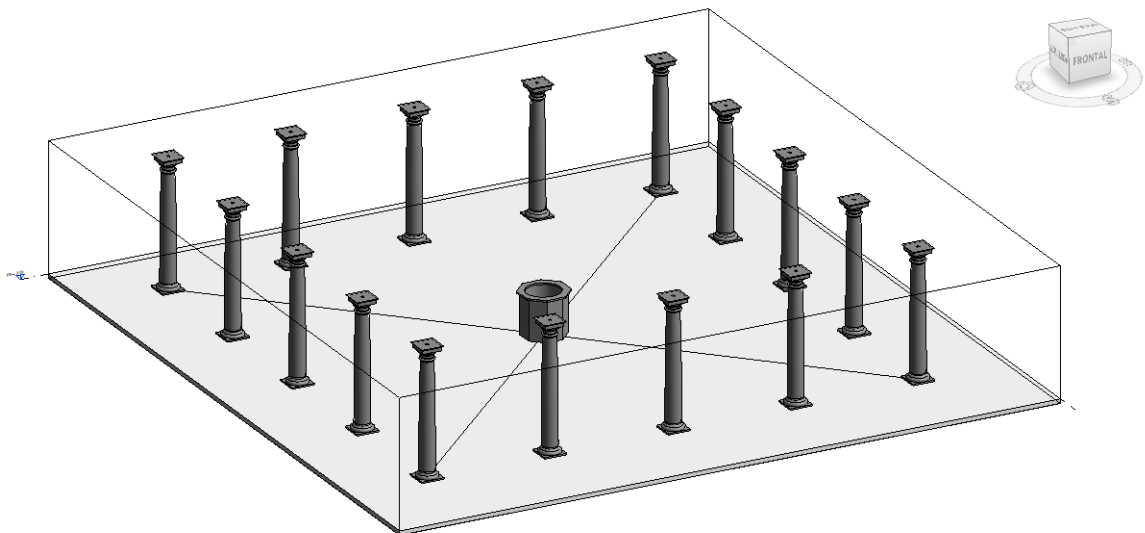
Entre el listel y el ábaco, existe una geometría que no puede modelarse de una vez con las herramientas anteriores (revolución y extrusión), así que recurrimos al barrido.

En el barrido, primero debemos indicar el camino que va a seguir el perfil que dibujaremos. En este caso, nos apoyaremos en una vista 3D, puesto que podemos seleccionar el camino en geometrías ya modeladas anteriormente, como el ábaco. Una vez seleccionado el camino, dibujaremos el perfil desde una vista que tenga las referencias necesarias.

A medida que vayamos modelando las distintas partes de la columna, es



Una vez asignados los materiales, ya podemos finalizar el modelo de la columna. Considerando esta columna como el modelo ideal (columna A1), lo siguiente es copiar el modelo y colocar las copias en su posición correspondiente, apoyándonos una vez más en las rejillas creadas anteriormente.

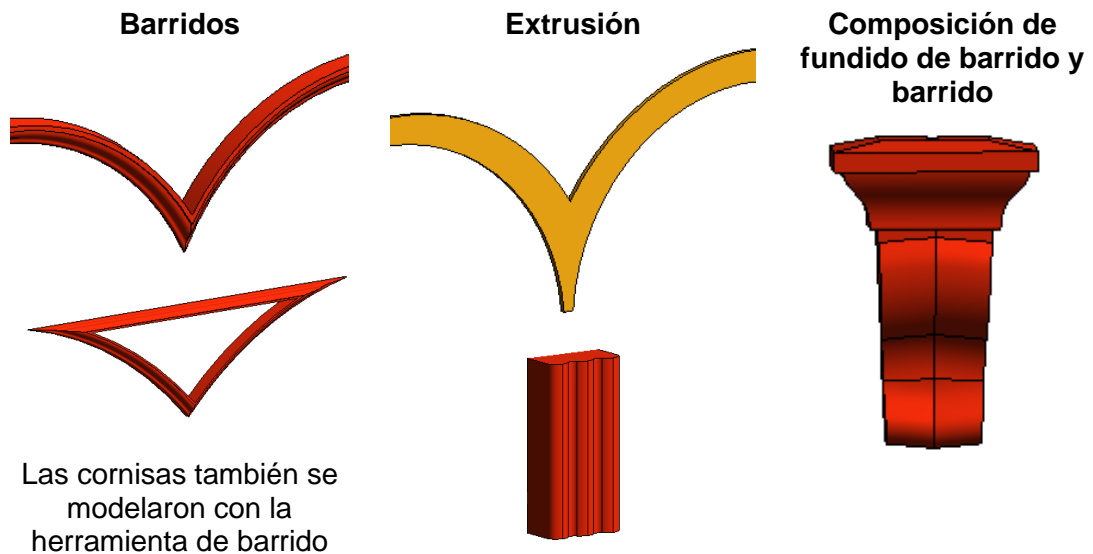


XX. Columnas situadas en el espacio 3D.

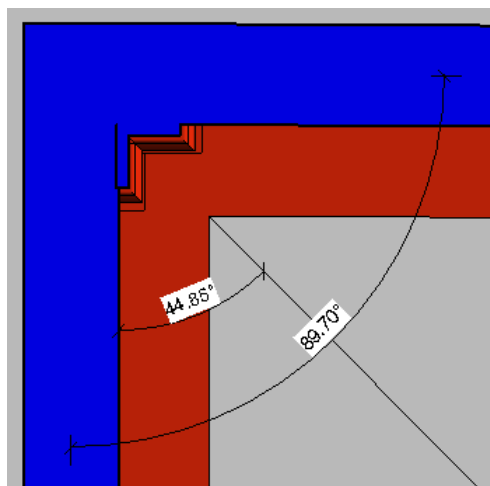
8. Ornamentación de los muros

La ornamentación de los muros las hemos modelado in situ, al igual que las columnas, categorizándolas dentro de los “modelos genéricos”. Según su geometría, los distintos

elementos ornamentales se han modelado usando las herramientas de barrido, extrusión o fundido de barrido.



Para los barridos que no se componen de caminos rectos, es altamente recomendable crear el perfil de barrido en una familia aparte, puesto que simplifica su modelado. Tanto para los barridos como para las extrusiones que presentan formas curvas, nos dimos cuenta que presentaban dificultad para hacerlos coincidir en las intersecciones de los muros que los alojaban, puesto que no se puede modelar de manera continua un barrido de esas características, por ese motivo, se optó por hacer una simetría de estos elementos en las fachadas colindantes. Para ello, trazábamos una línea de detalle que representase las bisectrices de los muros.



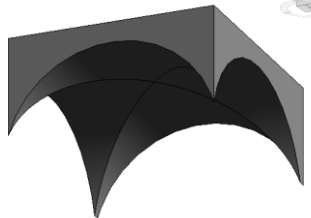
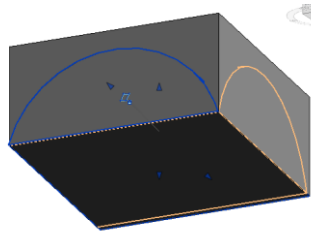
XXI. Trazando el eje de simetría

Una vez hecho esto, bastaba con seleccionar el elemento y crear su simetría seleccionando el eje, y editábamos el elemento para corregir sus dimensiones.

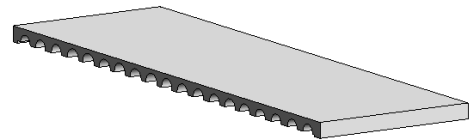
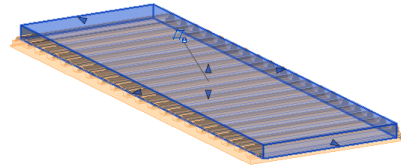
9. Bóvedas de crucería y forjado de viga y revoltón.

Ambos también son componentes modelados in situ. La bóveda se categorizó dentro de modelos genéricos, mientras que al forjado lo definimos dentro de la familia de suelos.

La bóveda no es más que un prisma al que se le han restado dos vacíos, y el forjado se ha modelado de forma similar.

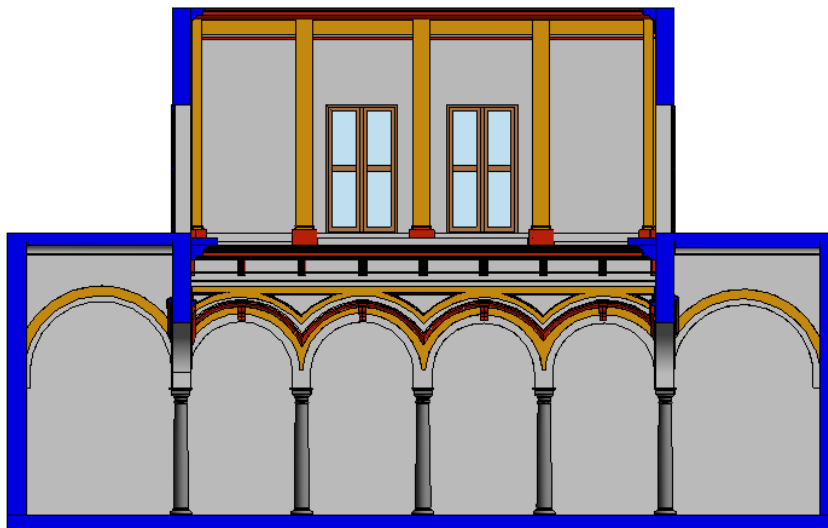


XXII. Sólido y vacíos usados para la creación de la bóveda de crucería

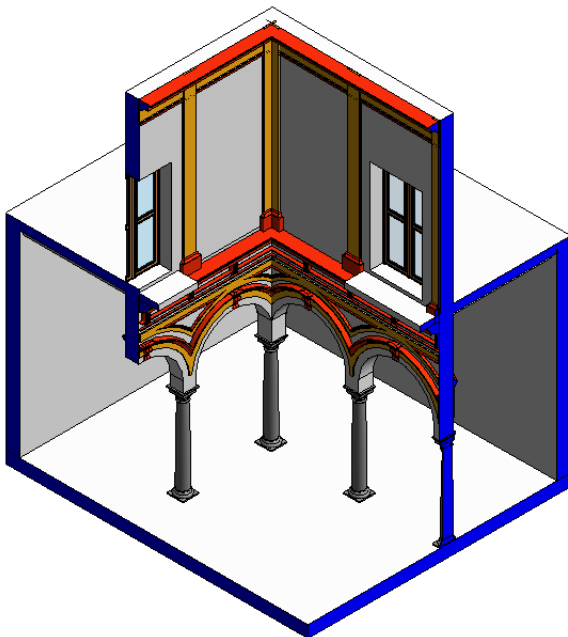


XXIII. Sólido y vacíos usados para la creación del forjado de viga y revoltón.

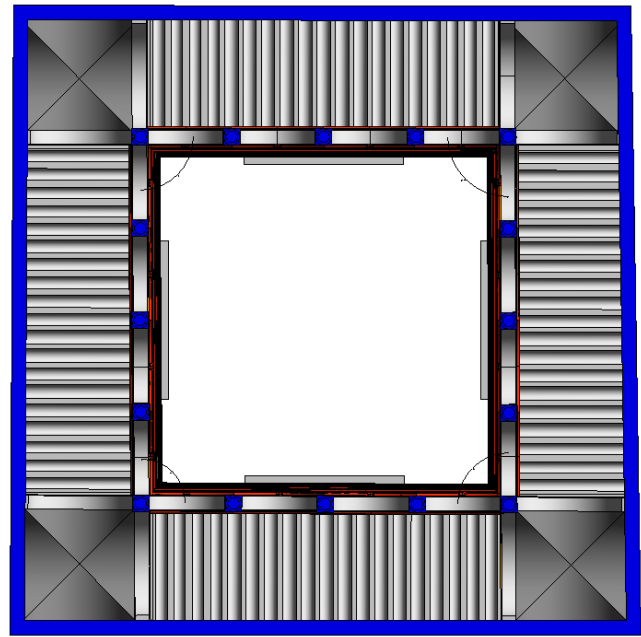
Resultado del modelado 3D del patio de honor del Hotel Arizón.



XXIV. Sección con vista a la galería norte



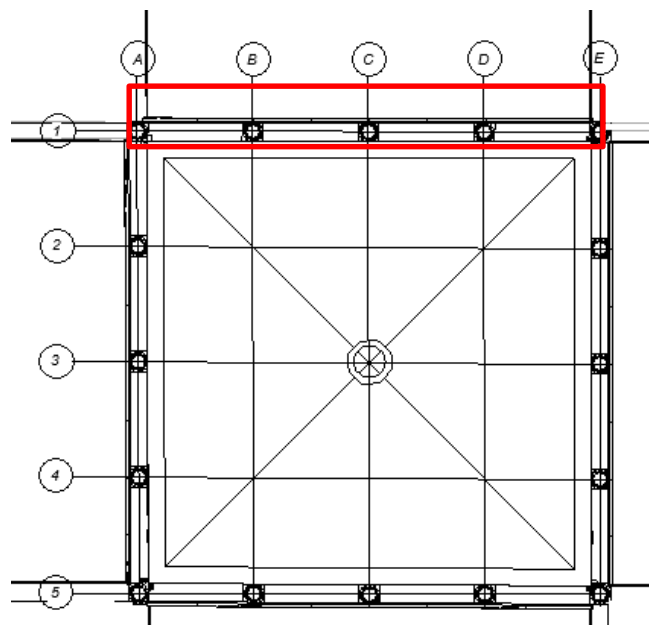
XXV. Sección volumétrica a 3/4



XXVI. Vista de techo desde la basa de las columnas

Análisis de deformaciones en las columnas

Una vez modelados todos los elementos, nos centramos en el segundo objetivo de este trabajo, el análisis. Al modelar la columna A1 la consideramos un modelo ideal, es decir, no presenta deformaciones ni desplomes con respecto a su eje. Esta columna fue reproducida en las distintas intersecciones de las rejillas donde se situaban las otras columnas de la nube de puntos. En el análisis nos hemos enfocado únicamente en una de las filas de columnas, concretamente la fila correspondiente a la rejilla 1.



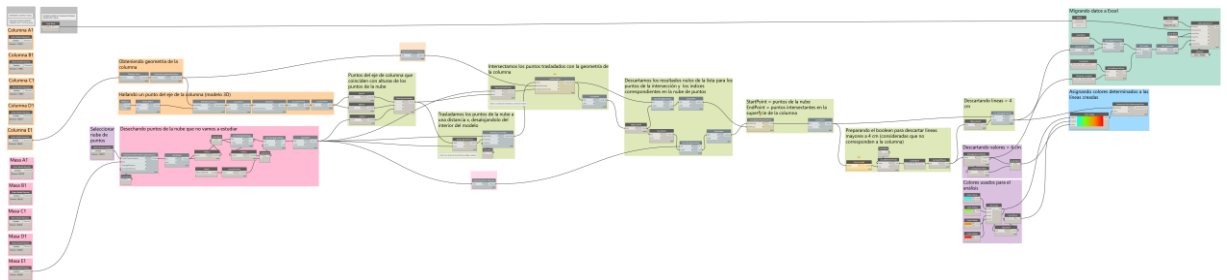
XXVII. Plano de planta con rejillas. En rojo, localización del pórtico objeto de estudio.

Para este análisis, recurrimos a dos programas, Dynamo© y C2C©, con el objeto de hacer una comparativa de los resultados obtenidos tanto en uno como en otro.

1. Dynamo©

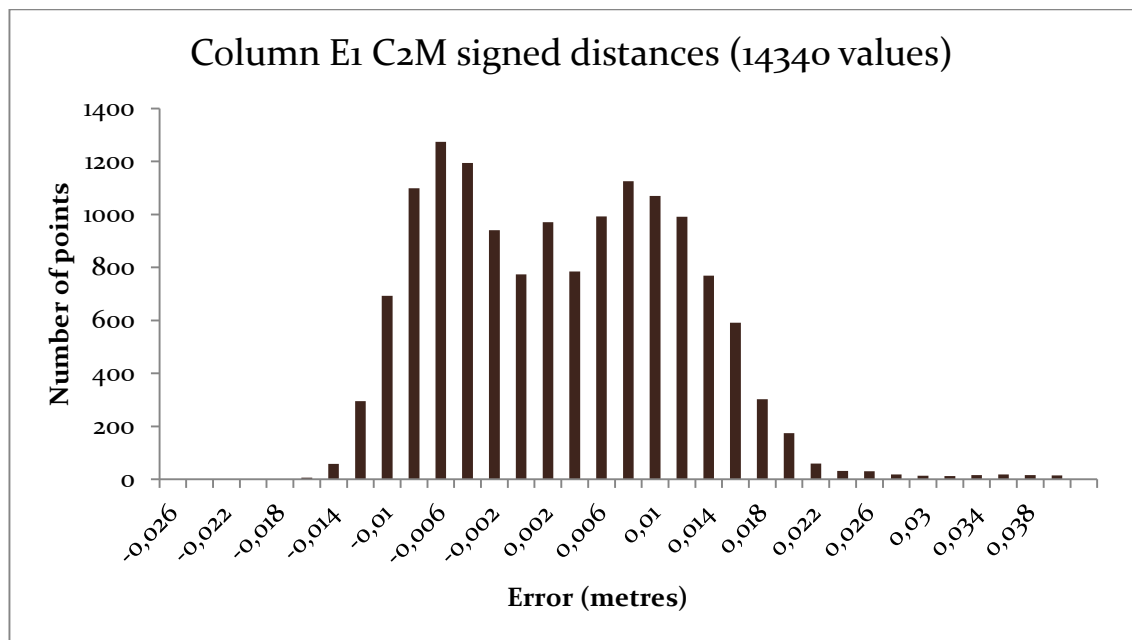
Dynamo© (Autodesk, 2016) es una herramienta de programación visual con el cual, a través de una secuencia de comandos, podemos definir lógicas personalizadas mediante diversos idiomas de programación textual. (fuente: *The Dynamo© Primer Project*, iniciado por Matt Jekyz y el equipo de desarrollo de Autodesk)

Es una herramienta open source la cual tiene multitud de posibilidades de aplicación dentro de Revit© y otros programas de modelado. En nuestro caso, además de usarse en algún proceso de creación de vistas, también lo hemos usado para el análisis del modelo ideal con respecto a la nube de puntos a través de esta serie de comandos:



XXVIII. Algoritmo nodal desarrollado en Dynamo©, utilizado para adquirir los datos de las distancias de los puntos de la nube al modelo 3D (ver Anexo I)

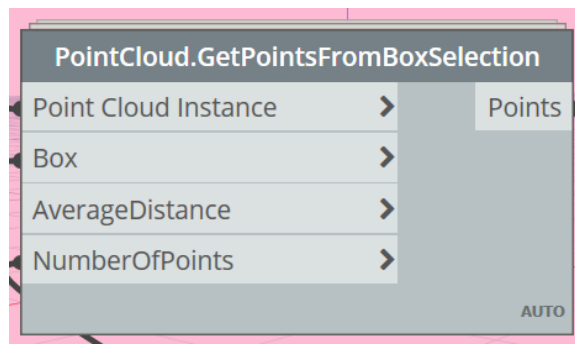
A través de esta secuencia de comandos, hemos exportado los datos de las distancias mínimas entre los puntos de la nube y el fuste de la columna al programa Excel©, donde se ha tratado la información para crear un histograma que represente la desviación de estos puntos.



XXIX. Histograma de la columna E1

El proceso de la secuencia de comandos consiste en estudiar cada columna por separado, segmentando la nube de puntos que se encuentra a su alrededor. Con esto conseguimos que, con un ordenador con unas características estándar, podamos realizar este estudio.

Para ello, nos hemos valido de los nodos que vienen por defecto en la aplicación Dynamo© y el nodo “PointCloud.GetPointsFromBoxSelection”, perteneciente al paquete externo “SteamNodes” versión 1.2.4.



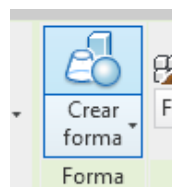
XXX. Nodo de Dynamo©. Paquete SteamNodes.

Este nodo precisa de un “box” que segmente la nube de puntos, que consiste básicamente en una masa de forma cúbica que contenga los puntos de la nube que vamos a considerar para el proceso. Además de esto, podemos determinar cuántos puntos totales va a considerar dentro del segmento (“NumberOfPoints”), teniendo en cuenta una distancia media (“AverageDistance”, valor por defecto: 1 mm).

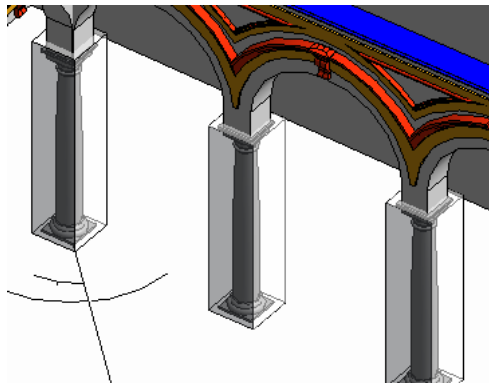
Por lo tanto, además del modelado anterior, vamos a tener que modelar estas masas contenedoras de los puntos a estudiar.

Nuevamente nos dirigimos a la opción “modelar in situ”, y en la categoría elegimos “masa”.

En una vista de planta dibujamos un rectángulo, y seguidamente pulsamos sobre la opción “crear forma”.



Cambiamos a una vista de sección, o de perfil, y determinamos la altura precisada para que el prisma contenga los puntos de la nube que queremos, y finalizamos la masa. Todo este proceso se puede hacer en una vista 3D.



XXXI. Emplazamiento de las masas en las columnas

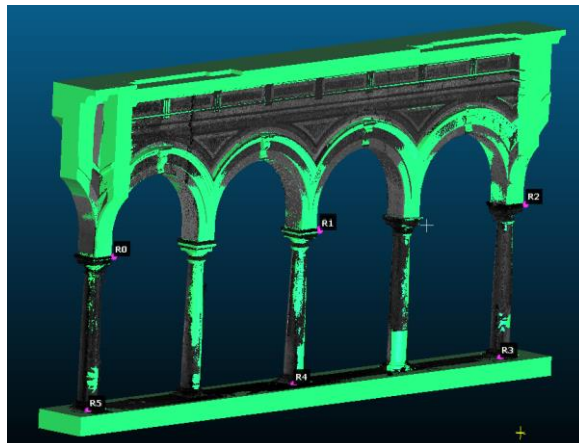
El proceso de la secuencia de comandos se explica dentro del Anexo I.

2. CloudCompare© (C2C©)

Una vez realizado el modelo se realizó una segmentación manual para posteriormente calcular la desviación geométrica entre el modelo HBIM y la nube de puntos del TLS. El mallado poligonal del software CloudCompare© v. 2.10-alpha (Girardeau-Montaut, 2019) permite eliminar el ruido, los puntos fuera de contexto y los elementos no deseados como son los asientos y lámparas adosadas a las columnas, así como las macetas que están colgadas en el capitel de las columnas.

La segmentación se ha realizado entre partes.

- En primer lugar, se trató solo la columna del pórtico norte con el fin de analizar las desviaciones que pueden tener entre una geometría y la que representa la nube de puntos.
- En segundo lugar, la misma columna y un trozo de arco. Su comparación puede determinar si la calidad del modelo construido se ajusta a la realidad y determinar cuáles son las variaciones fundamentales.
- En tercer lugar, el pórtico norte de columnas completo con sus respectivos arcos.



XXXII. Alineación de la nube y del modelo 3D en C2C©.

Una vez que se obtuvieron los datos de la nube de puntos TLS segmentada, se alinearon el modelo de construcción HBIM con cada una de las partes (figura x) mediante pares de puntos seleccionados comunes entre el modelo en formato *.stl y la nube de puntos en formato .e57. Los seis pares de punto (en el caso del p3rtico) (R0-A0, R1-A1, R2-A2, R3-A3, R4-A4, R5-A5) se ubicaron en los capiteles y basa respectivamente de las columnas intermedias, con errores de 0.015; 0.017; 0.016; 0.015; 0.011; 0.014 respectivamente y un RMS de 0.01542 m. Posteriormente se aplic3 el algoritmo Iterative Closest Point (ICP) para intentar optimizar autom3ticamente la alineaci3n.

RMSE de la alineaci3n entre el modelo param3trico y la nube de puntos en C2C3			
	Columna C1	Conjunto Arco-Columna	P3rtico
RMS	0,0076	0,0061	0,0154

De esta forma se calcul3 la distancia entre el modelo y el subconjunto de puntos parciales del p3rtico segmentado. Los par3metros estudiados fueron el Root Mean Square Error (RMSE), las distancias m3nimas y m3ximas entre el modelo y la nube de puntos, la distancia promedio, la desviaci3n est3ndar y el error estimado en metros. La desviaci3n entre el modelo gemelo digital y la verdadera geometr3a presenta dos caracter3sticas: La alta presencia de puntos en el valor cero con respecto al resto de los intervalos de distancia y la alta desviaci3n est3ndar que se puede calcular a trav3s de la ecuaci3n:

Ecuaci3n 1. Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2}{n - 1}}$$

Donde:

- o ΔX ; ΔY ; ΔZ son las diferencias entre las coordenadas de la nube de puntos y las coordenadas de los puntos m3s cercanos a 3stos pertenecientes al modelo 3D.
- o "n" es la cantidad de puntos de control.

(Arias, Ord3ñez, Lorenzo, & Herrauez, 2006)

Resultados obtenidos en las distintas metodologías.

Interpretación de las desviaciones a través de los resultados obtenidos por el software Dynamo©.

Los parámetros estudiados fueron las distancias mínimas y máximas entre el modelo y la nube de puntos, la distancia promedio y la desviación estándar, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Distancia media y desviación estándar

Survey A (Dynamo©)	Standart deviation	Min. Distance	Max. Distance	Average distance
Columna C1	0,0074	0,0000	0,0396	-0,0033
Conjunto Arco-Columna	0,0407	0,0000	0,1906	0,0265
Pórtico	0,0446	0,0000	0,5520	0,0109

1. Análisis de la columna C1

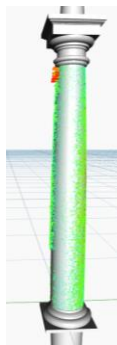


Figura 1. Modelado paramétrico de la columna central del pórtico norte.

Tabla 2. Histograma de la columna C1 (Dynamo©)
Column C1 C2M signed distances (13745 values)

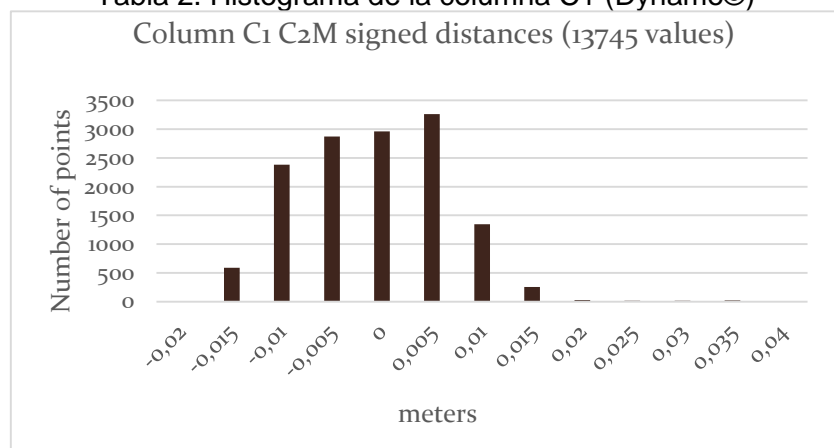
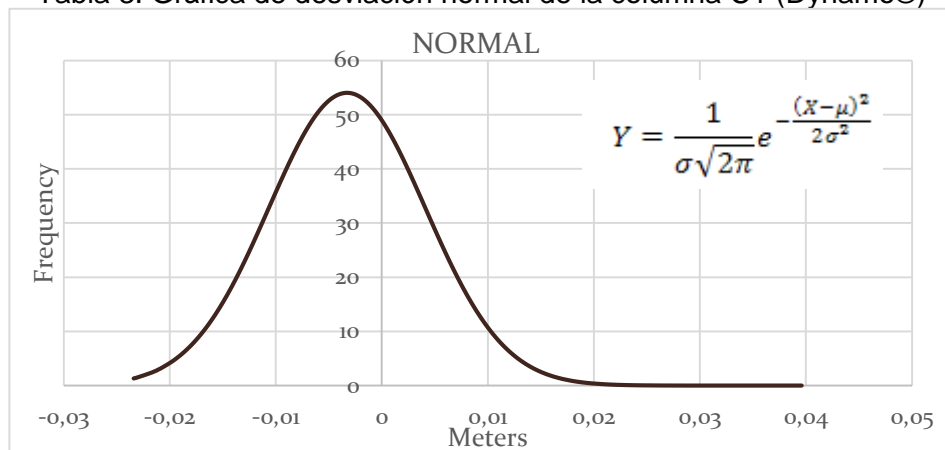


Tabla 3. Gráfica de desviación normal de la columna C1 (Dynamo©)



Observamos en la imagen de la columna que existen ciertos valores atípicos correspondientes a los puntos de la nube que componen las macetas, y en el gráfico de la tabla 2 vemos que, aproximadamente, el 80% de los puntos de la muestra se encuentran entre los valores -0.01 y 0.01 m.

En la tabla 3, podemos observar cómo existe una tendencia de desviación de -0.004 m de los puntos de la nube con respecto al modelo 3D. La fórmula usada para esta gráfica es la siguiente:

Ecuación 2. Fórmula de la distribución normal.

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde:

- σ = desviación estándar
- σ^2 = varianza
- μ = media
- π = número Pi
- e = número Euler
- Y = altura de la curva para cualquier valor de x
- x = valor en el eje horizontal

En el análisis, los valores negativos corresponden a aquellos puntos que se encuentran dentro del modelo, y los positivos se encuentran fuera de éste.

(Microsoft, 2016; Suárez Ibujes, 2013)

2. Análisis del conjunto columna y arco.

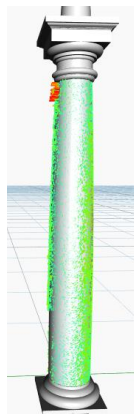


Figura II. Modelado paramétrico de la columna central del pórtico norte.

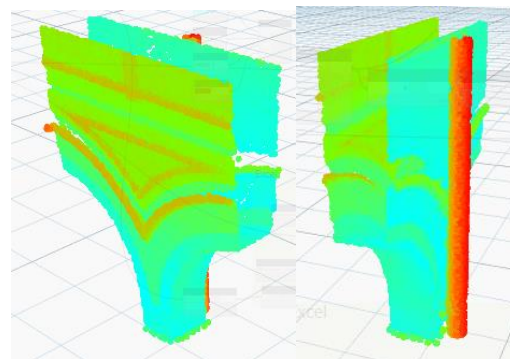
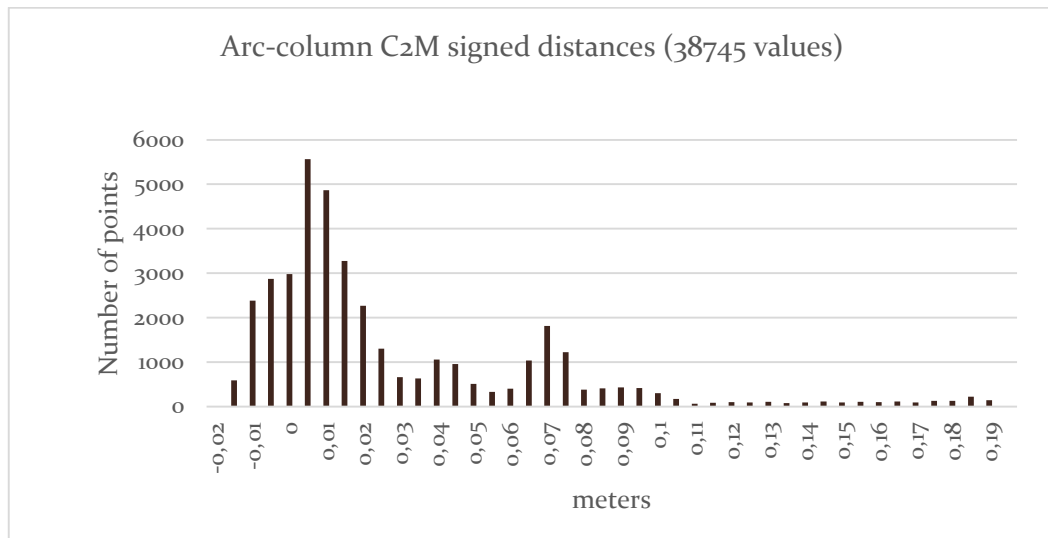


Figura III. Arranque arco columna C1

Tabla 4. Histograma del conjunto arco-columna (Dynamo©)

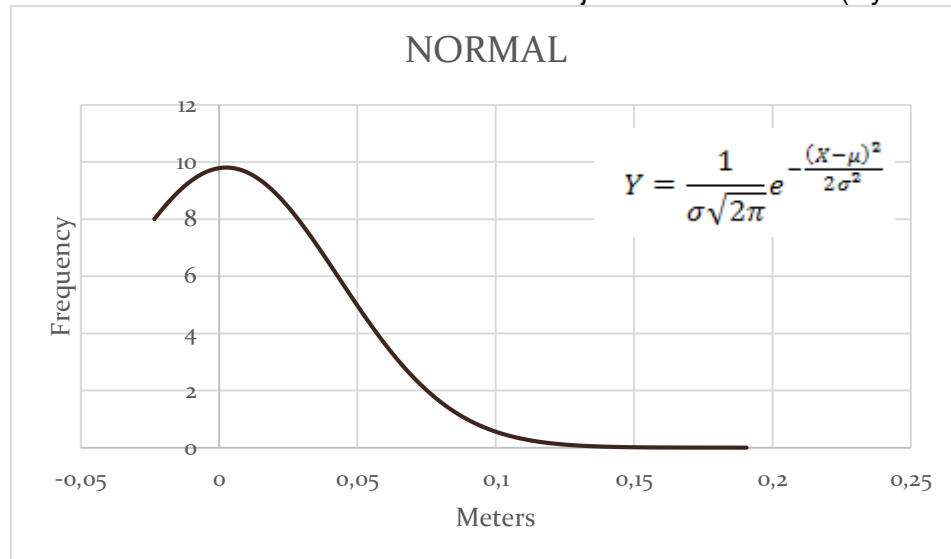


Sin embargo, a diferencia del caso anterior, podemos ver en la Tabla 4 que los valores considerados atípicos son significativos, resultando que el 80% de los puntos se encuentran en un rango de distancias mayor, entre -0.01 y 0.065 m.

Tal y como vemos en la imagen, donde los puntos correspondientes al bajante se encuentran en rojo, la proporcionalidad de estos valores atípicos con respecto a los valores que corresponden al modelo estudiado es mayor que en el caso anterior. Eso explica lo que exponíamos en el párrafo anterior.

Además, esta tendencia de subida a partir del valor 0.055m se deben a que, en el análisis, no se han considerado las ornamentaciones del muro en el modelo 3D, sino las caras planas del muro. Si vemos el resultado grafico de la desviación normal (Tabla 5) la media de la desviación se sitúa prácticamente en 0.

Tabla 5. Gráfica de desviación normal del conjunto arco-columna (Dynamo©)



3. Pórtico de columnas

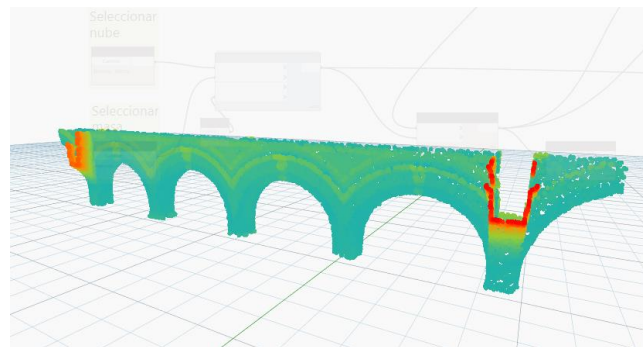


Figura IV. Pórtico fila 1

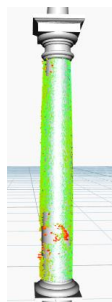


Figura V.
Columna A1

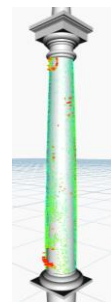


Figura VI.
Columna B1

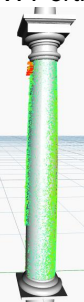


Figura VII.
Columna C1

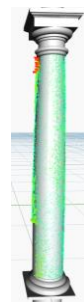


Figura VIII.
Columna D1

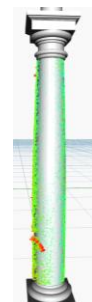
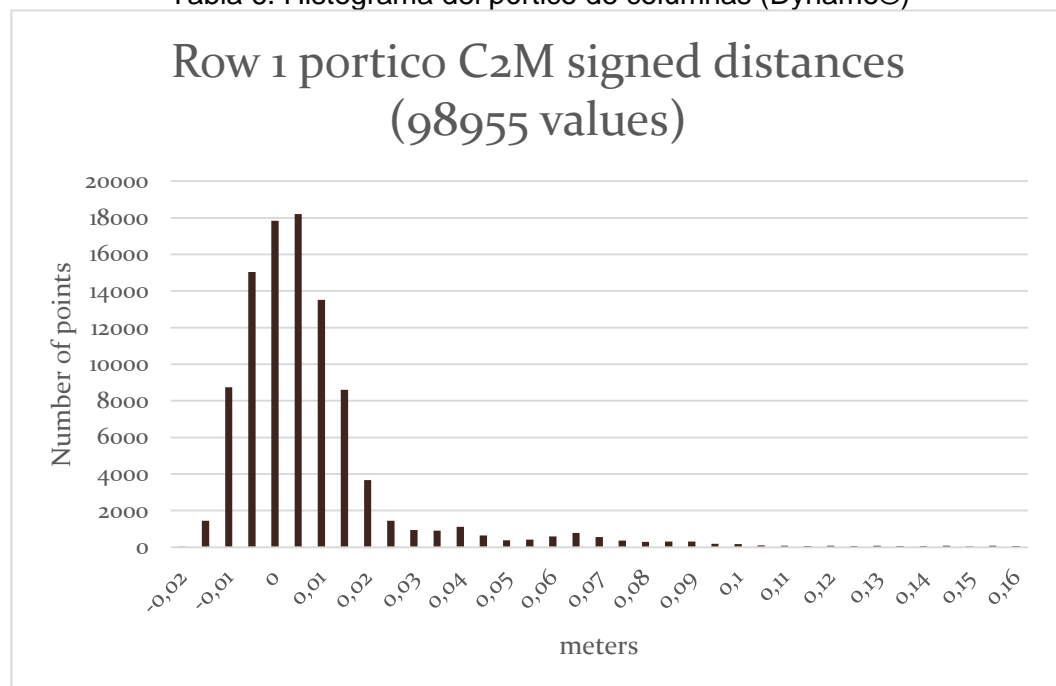


Figura IX.
Columna E1

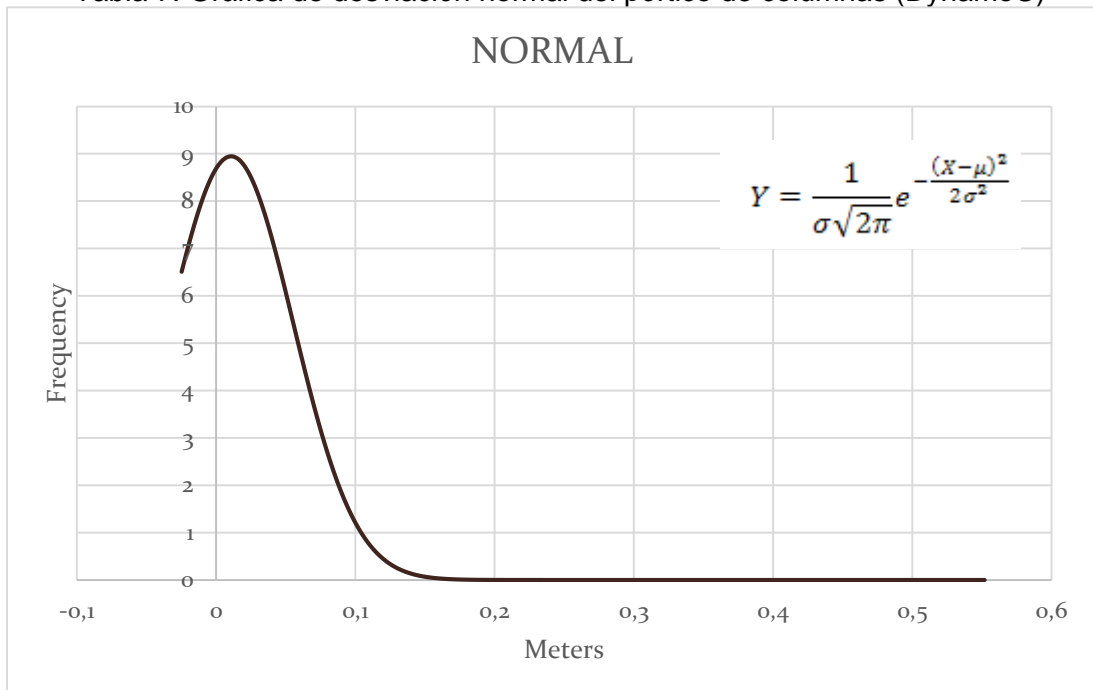
Tal y como se esperaba, en este caso también encontramos valores atípicos, pero al ser una segmentación mayor, la proporcionalidad de estos valores ya no es tan significativa como en el caso anterior.

Tabla 6. Histograma del pórtico de columnas (Dynamo©)



Sigue existiendo una tendencia de subida a partir del valor 0.055 m, pero no es tan pronunciada como en el caso de la Tabla 4. Además, vemos cómo prácticamente la totalidad de los puntos se encuentran entre -0.01 y 0.02 m.

Tabla 7. Gráfica de desviación normal del pórtico de columnas (Dynamo©)



Interpretación de las desviaciones a través de los resultados obtenidos por el software C2C©

Los parámetros estudiados fueron el Root Mean Square (RMS), las distancias mínimas y máximas entre el modelo y la nube de puntos, la distancia promedio, la desviación estándar y el error estimado en metros, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8

Mean distances and standard deviations of al single-view range scans compared against the constructions modelling pointcloud (in meters)						
Survey B (C2C©)	Standart deviation	Min. Distance	Max. Distance	Average distance	RMS	Estimated standard error
Column C1	0,0092	0,0000	0,0668	0,0087	0,007	0,0092
Arc-Column combination	0,0185	0,0000	0,1146	0,0115	0,006	0,0204
Portico	0,0201	0,0000	0,1608	0,0540	1	0,0402
					0,015	
					4	

En esta metodología se pudo realizar dentro de C2C© una segmentación más precisa de la nube de puntos, por lo que se han conseguido eliminar los valores atípicos que veíamos anteriormente.

1. Análisis de la columna C1

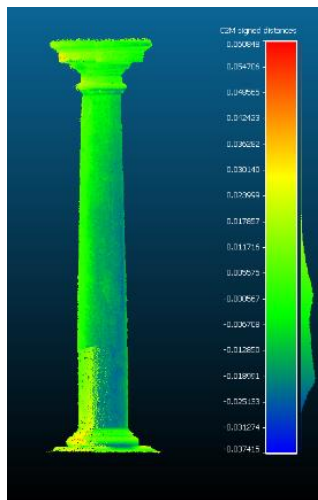
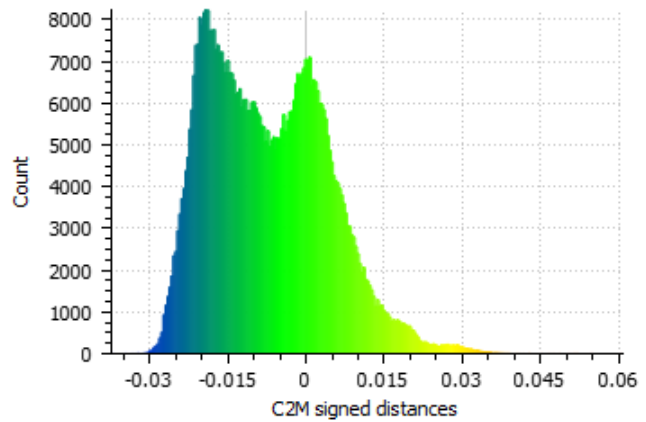


Figura X. Columna C1

Tabla 9. Histograma de la columna C1
C2M signed distances (571554 values) [256 classes]



En la Tabla 9 podemos ver que existe una gran cantidad de puntos de la nube a una distancia entre -0.015 y -0.02 m del modelo 3D, aunque también encontramos otra importante suma de puntos a una distancia aproximada de 0.00 m.

Al igual que en la anterior metodología, observamos que el grueso de los puntos de la nube se encuentran aproximadamente entre -0.01 y 0.01 m, solo que en este caso, la cantidad de muestras utilizada para el análisis es bastante mayor, 571554 muestras frente a 13745 muestras del caso estudiado en Dynamo®.

2. Análisis del conjunto columna y arco

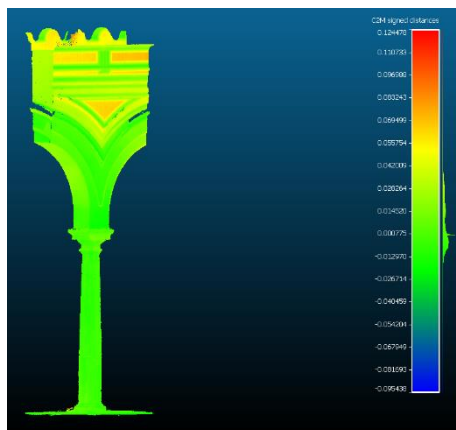
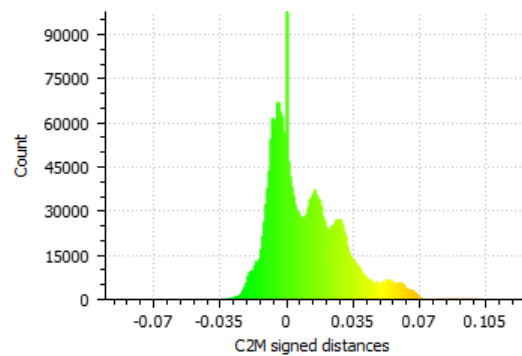


Figura XI. Conjunto arco-columna

Tabla 10
C2M signed distances (2333383 values) [256 classes]



A diferencia de los resultados en la metodología anterior, en este caso no encontramos esa cantidad de valores atípicos. Podemos ver en la Tabla 10 que existe una tendencia pronunciada en la distancia 0.00 m, lo que se puede interpretar con una alineación precisa y una desviación mínima de los elementos estructurales en esta segmentación.

3. Pórtico de columnas

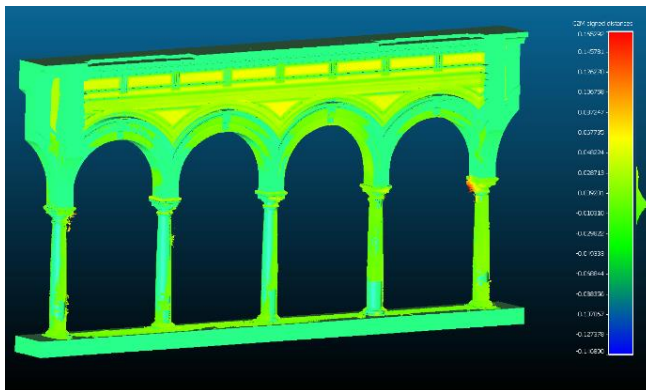
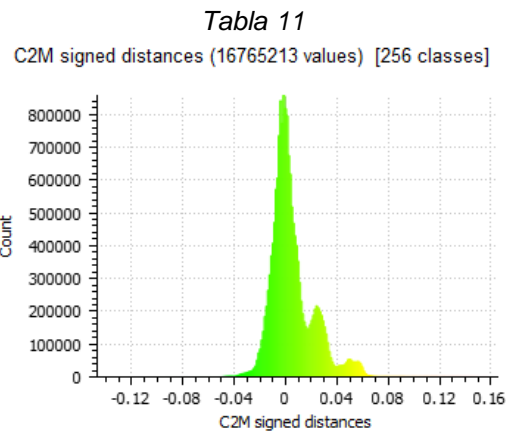


Figura XII. Pórtico de columnas



Ya en esta segmentación podemos confirmar lo que hemos dicho en el caso anterior, la desviación en los elementos estructurales es mínima. En la Tabla 11 seguimos viendo esta tendencia pronunciada en los valores próximos a 0.00 m. Se observan valores atípicos pertenecientes a las macetas en la columna derecha (correspondiente a la columna E1).

En las ornamentaciones de los muros de la Figura 12, observamos un patrón de colores que se ha repetido en los anteriores casos de ambas metodologías. En esta sección, estamos viendo cómo existe una desviación, no muy pronunciada, en aquellas zonas que corresponden con la cara expuesta del muro, dándonos a entender que el muro se ensancha en la parte superior de los arcos. Esta desviación de los puntos debido al ensanche del muro podría explicar la meseta que se produce en la Tabla 10 y 11 a partir del valor 0.035 m, una meseta menos pronunciada en la Tabla 6 (probablemente debido a la cantidad de muestras usadas), y menos uniforme en la Tabla 4, aunque existente.

Fiabilidad de las distintas metodologías

Hay que entender que ambos programas tienen una metodología de trabajo diferente.

1. Dynamo©

- Dynamo© es una aplicación de programación visual, no es un programa específico de análisis de deformaciones.
- Dynamo© trabaja con el modelo y la nube existentes dentro de Revit©, en un mismo espacio de trabajo. Con lo cual, no es necesario realizar ningún preajuste o acoplamiento antes del análisis entre el modelo 3D y la nube de puntos.
- Debido a las características de hardware del ordenador usado en esta metodología, decidimos decimar la nube de puntos, con objeto de reducir la cantidad de información. ya que existen nodos de Dynamo© que nos lo permiten.
- Por razones desconocidas, el código ejecutado dentro de Dynamo© no interpretaba la geometría de los capiteles y las bases de las columnas a la hora de hallar unas intersecciones necesarias para el cálculo de distancias, por lo que nos basamos en la desviación del fuste de éstas para su análisis.
- En el caso de los muros, no pudimos tener en cuenta los modelos 3D de las ornamentaciones, provocando desviaciones irreales en el análisis.
- En los arcos, no se han podido determinar qué puntos se encuentran dentro o fuera del modelo (distancias positivas y negativas), por lo que se ha trabajado con distancias absolutas.
- En el caso de Dynamo© no se segmenta de una manera precisa la nube de puntos como en C2C©, se hace una selección del elemento a comparar y se limitan la cantidad de puntos mediante una masa cubica. Implicando en los casos generales valores atípicos, que no se hayan filtrado anteriormente.

2. CloudCompare© (C2C©)

- A diferencia de Dynamo©, CloudCompare© es un programa específico para comparación de nubes con un modelo 3D, entre otras aplicaciones.
- CloudCompare© trabaja fuera del entorno de Revit©. Dentro del programa se debe importar la nube de puntos y el modelo 3D, y tras lo cual, eligiendo 3 o más puntos coincidentes, se ajustan ambos elementos para su análisis. Cabe decir que para el modelo 3D se ha tomado en formato *.stl. Para versiones anteriores a Revit© 2021 se precisará un plugin adicional para realizar la exportación del modelo en formato *.stl, en nuestro caso hemos usado STLExporter.
- El hardware del ordenador usado en esta metodología era más potente que el hardware usado en la anterior. (ver comparativa)

Características del hardware usado en ambas metodologías	
Dynamo©	CloudCompare© (C2C©)
SO Windows 10 64 bits	SO Windows 10 Pro 64 bits
RAM 8 Gb	RAM 32 Gb
Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 920M	Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti
Procesador Intel Core i7-4712MQ 2.30 GHz	Procesador Intel Core i9-10900K 3.70 GHz
4 núcleos	10 núcleos

Teniendo en cuenta lo anterior, pudimos hacer una comparativa exhaustiva de ambas metodologías a través del siguiente diagrama (Zaiontz, 2018):

Tabla 12. Diagrama de caja y bigotes

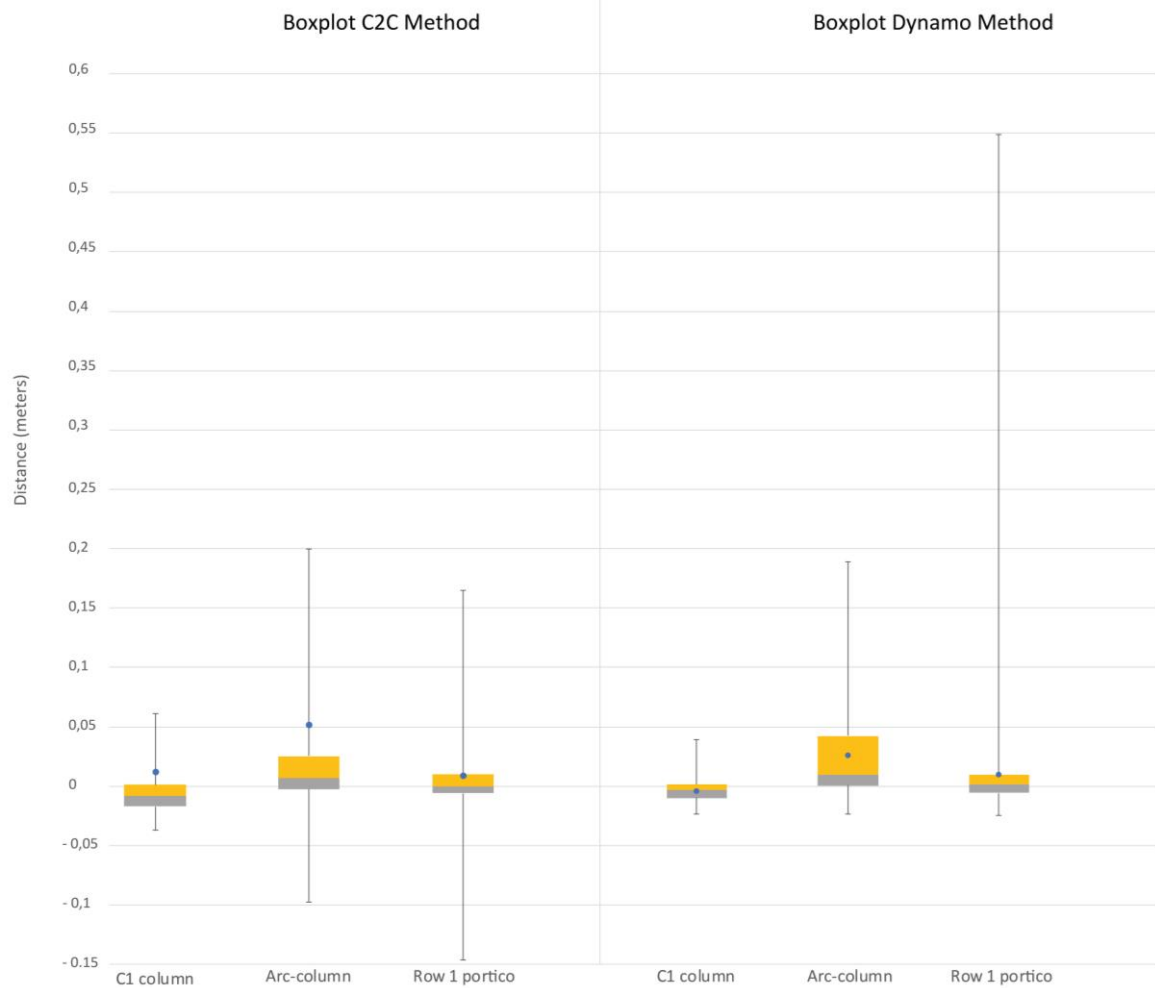


Tabla 13. Datos estadísticos de C2C©

C2C© data			
	C1 column	Arc-column	Row 1 portico
MIN	-0,037415434	-0,097015187	-0,14688988
Q1	-0,017455767	-0,002934112	-0,006651728
Median (Q2)	-0,008627452	0,006357846	-0,000554417
Q3	0,000584702	0,024941762	0,009201281
MAX	0,060463703	0,199165976	0,16407298
Mean	0,011907975	0,051075394	0,00859155

Tabla 14. Datos estadísticos de Dynamo©

Dynamo© data			
	C1 column	Arc-column	Row 1 portico
MIN	-0,0234	-0,0234	-0,0247
Q1	-0,0092	0,0008	-0,0051
Median (Q2)	-0,0031	0,0102	0,0016
Q3	0,0021	0,043	0,0098
MAX	0,0396	0,1906	0,552
Mean	-0,003275198	0,026542511	0,010867552

En la Tabla 12, podemos ver que ambas metodologías siguen un mismo comportamiento, excluyendo sus barras de error, donde se alojan mayoritariamente los valores atípicos. Ambas metodologías comparten una proporcionalidad similar entre sus cuartiles.

La diferencia más significativa la encontramos en el conjunto arco-columna de la metodología Dynamo©, donde la barra de rango Q2-Q3 es mayor en proporción comparándolo con los demás casos. Esto puede deberse a que hayan entrado puntos del bajante (véase Figura 3) dentro del cuartil Q3.

Entendemos que el software C2C© es específico para esta tarea, por lo tanto, los datos que adquirimos a través de esa metodología son fidedignos. Comparando esos datos con los obtenidos a través de Dynamo©, y analizados con el programa Excel©, vemos semejanzas suficientes para considerar fidedigna la metodología que usa Dynamo©.

Discusión de los resultados

En la Tabla 12, vemos como el valor de la media (representado con un punto azul), no constata un valor real de análisis, debido a la existencia de datos atípicos. Los datos entre el cuartil 25 (Q1) y el cuartil 75 (Q3), también llamado “rango intercuartílico”, representan los valores que consideramos “típicos”, y atendiendo a estos valores:

- Las desviaciones en la columna C1, según los datos de la *Tabla 13. Datos estadísticos de C2C©*, se mueven en un rango entre -0.0175 m y 0.0005 m, situándose la mediana (también denominada Q2) a -0.0086 m. Esto nos está diciendo que la dispersión de la nube con respecto al modelo 3D está equilibrada, es decir, partiendo de la mediana tenemos la misma concentración de puntos a una distancia aproximada de ± 0.009 m. Según los datos de la *Tabla 14. Datos estadísticos de Dynamo©*, el rango intercuartílico se encuentra entre -0.009 m y 0.0021 m, situándose la mediana en -0.0031 m. Esto significa que, partiendo de la mediana y a una distancia aproximada de ± 0.0055 m tenemos la misma concentración de puntos.
- En el caso del conjunto arco-columna, el rango intercuartílico en la *Tabla 13. Datos estadísticos de C2C©*, se encuentra entre -0.003 y 0.025 m, situándose la mediana en el valor 0.006 m. Esto implica que la concentración de datos entre Q1 y Q2 (con una longitud de 0.009 m) es mayor que en el rango Q2 y Q3 (con una longitud de 0.019 m), en otras palabras, los datos del rango Q2-Q3 presentan menor solidez que los datos del rango Q1-Q2 o, dicho de otra manera, en el rango Q2-Q3 encontramos valores de desviación reales entre el modelo ideal y la realidad. Esta situación se vuelve a repetir en la *Tabla 14. Datos estadísticos de Dynamo©*, aunque con una dispersión mayor en el rango Q2-Q3, con una longitud de 0.033 m frente al rango Q1-Q2, el cual tiene una dispersión de longitud 0.009 m.
- En el análisis del pórtico, volvemos a ver en la *Tabla 13. Datos estadísticos de C2C©*, una diferencia de dispersión entre Q1-Q2 y Q2-Q3, donde en el primer rango, existe una dispersión de 0.006 m y en el segundo rango una dispersión de 0.0098 m. La diferencia de dispersión entre rangos es bastante menor que en el caso anterior, pero nos da un dato fundamental, y es la solidez de las desviaciones generales entre el modelo y la realidad, situada la mediana en un valor muy próximo a 0.000 m, las desviaciones generales reales comprenden valores de 0.01 m. Esta tendencia en las diferencias entre rangos vuelve a repetirse en la *Tabla 14. Datos estadísticos de Dynamo©*.

Tabla 15. Dispersión de datos entre la mediana y los cuartiles.

	Data scattering between median and quartiles					
	C2C			Dynamo		
	C1 column	Arc-column	Row 1 portico	C1 column	Arc-column	Row 1 portico
Q1-Q2 =	0,0088	0,0093	0,0061	0,0061	0,0094	0,0067
Q2-Q3 =	0,0092	0,0186	0,0098	0,0052	0,0328	0,0082
	Mean scattering in regard to median (meters)		0,010	Mean scattering in regard to median (meters)		0,011

Con este análisis podemos determinar lo que se conoce como *error sistemático*, el cual tiende al valor de 0.01 m, con lo cual podemos considerarlo un error sistemático admisible, es decir, la calidad del modelo 3D con respecto a la realidad es aceptable.

Resulta evidente que se precisa del apoyo de los mapas de calor generados para interpretar correctamente las desviaciones de los elementos constructivos. Sin estos mapas de calor, sería imposible interpretar los resultados.

- Si comparamos los mapas de calor generados con Dynamo®, concluimos que arrojan mejores resultados cuanto menor sea la segmentación usada para el análisis, ya que, al decimar la nube a 25.000 puntos en una sección menor, tenemos una concentración de puntos mayor que en el caso del pórtico (véase Figura 3 y 4)
- En el caso de los mapas generados en C2C®, observamos que comparten ese rango de calor en el histograma, por lo que facilita la interpretación de los resultados.

Como dijimos anteriormente, en los mapas de calor que estudian los arcos (ya sea parcial o totalmente) vemos una desviación de los puntos a medida que sube en altura el muro, esto nos indica que el muro se ensancha en la parte superior, y atendiendo al gradiente de color de la Figura 12. *Pórtico de columnas*, esta desviación va de los 3'5 cm a los 7 cm de desviación.

Conclusiones

1. Técnicas de adquisición de datos para el estudio del patrimonio arquitectónico.
Con este trabajo, he podido personalmente experimentar varias técnicas enfocadas a la conservación de patrimonio, desde los más novedosos a las técnicas más convencionales. El TLS y la fotogrametría está marcando un antes y un después en la conservación de patrimonio, al tratarse de técnicas no invasivas de recopilación de información. Cabe mencionar que, aunque sin duda son técnicas innovadoras, están enfocadas al levantamiento arquitectónico, por lo tanto, los datos adquiridos están enfocados al estudio de volumetrías y deformaciones.
2. Conocimiento de las técnicas de adquisición de datos masivos (MDC). Obtención de nubes de puntos a través de la fotogrametría y el TLS para la adquisición de datos precisos del patio del Hotel Arizón de 1765.
Dentro de este trabajo se han estudiado los distintos métodos de adquisición de datos masivos que son aplicables al sector de la construcción
3. Se ha profundizado en el uso de las plataformas digitales BIM aplicado específicamente al patrimonio arquitectónico.
4. A partir de un conocimiento extra de un Máster de Postgrado sobre tecnologías BIM, trabajamos dentro de la plataforma Dynamo® para el análisis de elementos paramétricos. Viendo el potencial de análisis que tiene este software, y ayudado por mi tutor, nos marcamos la siguiente conclusión.
Entra un factor fundamental, y es el rendimiento necesario del equipo para trabajar con las distintas metodologías. Anteriormente comentamos que, en un ordenador con las características de hardware usadas en la metodología de Dynamo®, se nos hacía

imposible abrir el archivo de la nube de puntos, tanto en CloudCompare© como en Metashape, por tanto, también habría sido imposible hacer la comparación entre nube y modelo, algo que sí fue posible en el entorno de Revit© usando Dynamo©.

5. Desarrollo y análisis de las desviaciones estructurales en columnas y arcos del patio objeto de estudio mediante scripts de Dynamo©, y su correspondencia con el análisis en el software CloudCompare©.

En conclusión con este punto de nuestro trabajo, determinamos que no es necesario contar con una nube de puntos masiva para el análisis de las desviaciones, pudiendo decimar la nube y reducir su información. Esta práctica es altamente recomendable, puesto que facilita el tratamiento de los datos obtenidos y reducimos los requerimientos de rendimiento del equipo informático utilizado.

Finalmente, y de forma paralela a este trabajo se está redactando un artículo científico en el cual interviene mi tutor Juan José Moyano Campos, el profesor Enrique Nieto Julian y yo mismo, y se ha demostrado que en la literatura científica no existen documentos que se aproximen a este trabajo. Tan solo Massatra, que hace un análisis estructural de las cerchas de madera mediante el algoritmo de Grasshopper.

Futuras investigaciones

Como anteriormente hemos mencionado, Dynamo© es una aplicación de programación visual, con la cual podemos resolver infinidad de tareas, tanto de análisis, como creando rutinas propias de la maquetación, obtención de datos que podemos migrar a programas como Excel© para su tratamiento, o incluso para el diseño paramétrico. En mi opinión, la investigación futura debe centrarse no solo en la aplicación Dynamo©, sino en la programación informática enfocada a nuestra profesión, ya que nos brinda la posibilidad de agilizar procesos que de otra manera requerirían mucho tiempo y/o recursos.

Glosario de términos

- Abreviaciones:
 - TLS: Terrestrial Laser Scanning
 - SfM: Structure from Motion
 - BIM: Building Information Modelling
 - HBIM: Historic Building Information Modelling
 - MDC: Massive Data Capture
 - RMSE: Root Mean Square Error
 - DSLR: Digital Single Lens Reflex
 - HDR: High Dynamic Range
 - UTM: Universal Transverse Mercator
 - GPS: Global Positioning System

- Definiciones

RAW: Formato de archivos fotográficos que contiene la totalidad de los datos de la imagen captada por el sensor digital de la cámara.

JPEG: Formato de archivos fotográficos que comprime la imagen reduciendo su calidad y eliminando información redundante.

Ruido (fotografía): Defecto de la imagen producido por la alteración del color y la luz en los píxeles de la imagen.

Chunk (Metashape): Se puede traducir como “conjunto”. Los chunks se usan para fraccionar el proyecto con el fin de simplificar el proceso fotogramétrico. Una vez formados los distintos chunks de un mismo proyecto, se alinean para formar la nube de puntos final.

Nodo (Dynamo©): Fragmentos de código de programación encapsulado que permiten realizar ciertas labores y/o interactuar con otros nodos.

- Ecuaciones:

Ecuación 3. Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2 + (\Delta Z_i)^2}{n - 1}}$$

Donde:

- ΔX ; ΔY ; ΔZ son las diferencias entre las coordenadas de la nube de puntos y las coordenadas de los puntos más cercanos a éstos pertenecientes al modelo 3D.
- “n” es la cantidad de puntos de control.

Ecuación 4. Fórmula de la distribución normal.

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde:

- Y = altura de la curva para cualquier valor de x
- σ = desviación estándar
- σ^2 = varianza
- μ = media
- π = número Pi
- e = número Euler
- x = valor en el eje horizontal

Bibliografía

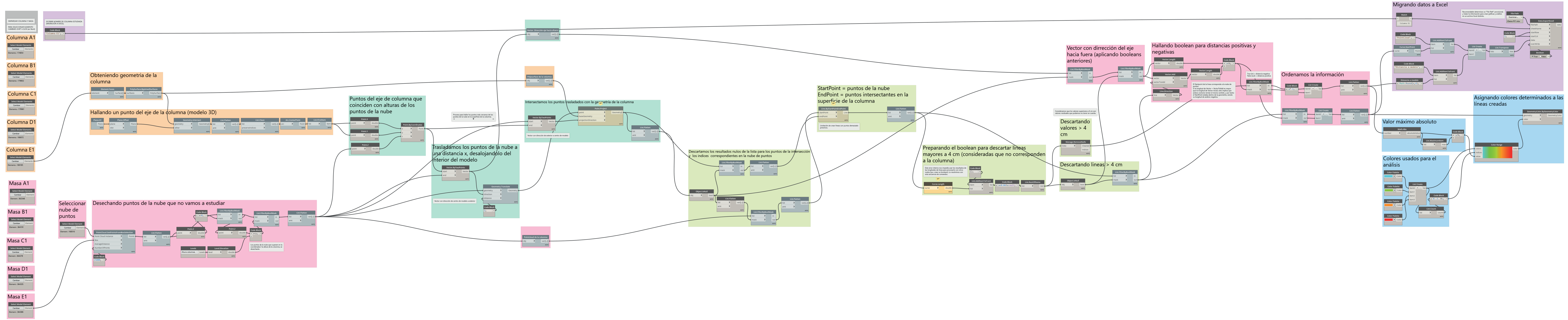
- Agisoft. (2020). Agisoft Metashape. Retrieved January 30, 2021, from <https://www.agisoft.com/>
- Almagro Gorbea, A. (2000). *Fotogrametría para arquitectos. El estado de la cuestión*.
- ArcGIS. (2019). ¿Qué son los datos LIDAR? Retrieved January 28, 2021, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>
- Arias, P., Ordóñez, C., Lorenzo, H., & Herraiz, J. (2006). Methods for documenting historical agro-industrial buildings: a comparative study and a simple photogrammetric method. *Journal of Cultural Heritage*, 7(4), 350–354. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.09.002>
- Autodesk. (n.d.). Autodesk ReCap Reality Capture & 3D Scanning Software. Retrieved January 30, 2021, from <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?plc=RECAP&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- Autodesk. (2016). Dynamo BIM. Retrieved January 30, 2021, from <https://dynamobim.org/>
- Autodesk. (2020). Autodesk Revit BIM Software. Retrieved January 30, 2020, from Autodesk 2020 website: <https://www.autodesk.es/products/revit/overview?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- Battista Montano, G. (1562). *Regla de las cinco ordenes de arquitectura*.
- Bejarano, J. A. (2020). *Apuntes AECO RF Master BIM Oficial Autodesk – Módulo 10. Renderizado [Material del aula]. Texto creativo. AECO RF Master BIM Oficial Autodesk*.
- Carrero Santamaría, E. (2008). Teoría y método en la Historia de la Arquitectura Medieval. Algunas reflexiones. *Arqueología de l'arquitectura*, 5–28.
- España. Ley 16/1985, 2 de octubre. (1985). Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español.
- Girardeau-Montaut, D. (2019). *CloudCompare Point Cloud Processing Workshop*. Retrieved from www.cloudcompare.org@CloudCompareGPL
- Ippoliti, E., Meschini, A., & Sicuranza, F. (2015). Structure from motion systems for architectural heritage. A survey of the internal loggia courtyard of Palazzo dei Capitani. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W4), 53–60. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-53-2015>
- Izquierdo Toscano, A. (2017). *Documentación gráfica y dinamización del patrimonio histórico mediante nuevas tecnologías*.
- Jacobs, G. (2020). The Early Days of 3D Scanning, Part 2: Cyra Technologies - xyHt. Retrieved January 28, 2021, from <https://www.xyht.com/constructionbim/the-early-days-of-3d-scanning-part-2/>
- Kurtz, G. F. (2001). Origen de un medio gráfico y un arte. Antecedentes, inicio y desarrollo de la fotografía en España. *Summa Artis. Historia General Del Arte*, XLVII.
- Leica, & Wild Heerbrugg. (2019). *Milestones in the Development of Precision Instruments*. 779612.
- Microsoft. (2016). Microsoft Excel, software de hojas de cálculo. Retrieved January 30, 2021,

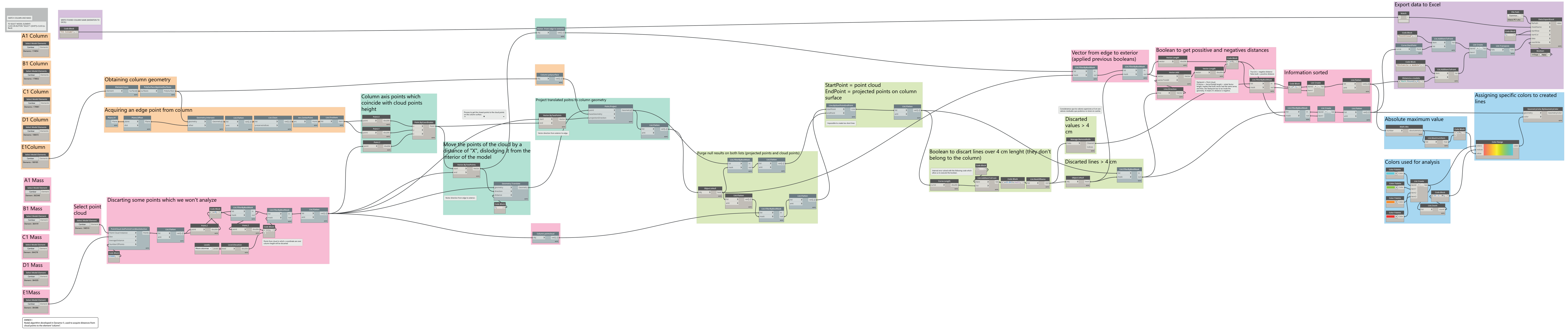
from <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel>

- Molero Alonso, B. (2017). *Documentación Geométrica y difusión digital de elementos arquitectónicos patrimoniales: Capiteles del Real Alcázar de Sevilla*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11441/75099>
- Morales, A. J. (1996). *Patrimonio histórico-artístico : conservación de bienes culturales*. Historia 16.
- Olaciregui Arrieta, F. J. (2015). *Rehabilitación del conjunto arquitectónico del Marqués de Casa Arizón (s. XVII-XVIII) en Sanlúcar de Barrameda, Cádiz*.
- Ornia Nuñez, F. J. (2019). *Modelado de información y digitalización de las linternas de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla*. Retrieved from <https://idus.us.es/xmlui/handle//11441/83464>
- Sánchez Gordo, N., Nieto Julián, J. E., Antón García, D., Bienvenido-Huertas, D., & Moyano Campos, J. J. (2019). *Análisis sobre el diseño orientalista del tercer trasatlántico Alfonso XIII y su relación con el patio principal de La Casa de Pilatos*.
- Suárez Ibujes, M. O. (2013). Distribución Normal con Excel. Retrieved January 30, 2021, from <https://www.monografias.com/trabajos89/distribucion-normal-excel/distribucion-normal-excel.shtml>
- Zaiontz, C. (2018). Creating Box Plot with Outliers | Real Statistics Using Excel. Retrieved January 28, 2021, from <https://www.real-statistics.com/excel-capabilities/creating-box-plot-outliers-manually/>



Anexos





- A1 Column** (Element: 174854)
- B1 Column** (Element: 179852)
- C1 Column** (Element: 179961)
- D1 Column** (Element: 180072)
- E1 Column** (Element: 180145)
- A1 Mass** (Element: 362548)
- B1 Mass** (Element: 364191)
- C1 Mass** (Element: 364278)
- D1 Mass** (Element: 364335)
- E1 Mass** (Element: 364386)

Obtaining column geometry

Element Faces → Surfaces → PolySurface.ByJoinedSurfaces

Plane_XY → Plane_Offset → Plane

Geometry.Intersect → Geometry → List.Flatten → List.Clean → Arc.CenterPoint → List.FirstItem

Acquiring an edge point from column

Plane_XY → Plane_Offset → Plane → Geometry.Intersect → Geometry → List.Flatten → List.Clean → Arc.CenterPoint → List.FirstItem

Select point cloud

Point Cloud GetPointsFromBoxSelection → Points → List.Flatten → Point.Z → List.FilterByBoolMask → List.Flatten

Code Block: `if (x > 0) { } else { }`

Code Block: `if (y > 0) { } else { }`

Code Block: `if (z > 0) { } else { }`

Code Block: `if (x > 0 && y > 0 && z > 0) { } else { }`

Code Block: `if (x > 0 && y > 0 && z > 0) { } else { }`

Code Block: `if (x > 0 && y > 0 && z > 0) { } else { }`

Code Block: `if (x > 0 && y > 0 && z > 0) { } else { }`

Column axis points which coincide with cloud points

Point.X → Point.Y → Point.Z → Point.ByCoordinates

Move the points of the cloud by a distance of "X", dislodging it from the interior of the model

Vector.ByTwoPoints → Geometry.Translate

Project translated points to column geometry

Point.Project → Geometry → List.Flatten

Purge null results on both lists (projected points and cloud points)

List.FilterByBoolMask → List.Flatten → Object.Null → List.Flatten

StartPoint = point cloud

EndPoint = projected points on column surface

Line.ByStartPointEndPoint → List.Flatten

Boolean to discard lines over 4 cm length (they don't belong to the column)

Curve.Length → List.AddItemToFront → Code Block: `if (l.Length > 4) { } else { }` → List.RemoveFromList

Discarded lines > 4 cm

Object.Null → List.FilterByBoolMask

Discarded values > 4 cm

Math.Abs → List.MaximumItem → Code Block: `if (v > 4) { } else { }`

Vector from edge to exterior (applied previous booleans)

List.FilterByBoolMask → List.FilterByBoolMask → Vector.Length → Vector.Add → Vector.Length → True (if) = negative distance, False (if) = positive distance → List.FilterByBoolMask

Boolean to get positive and negatives distances

Vector.Length → Vector.Add → Vector.Length → True (if) = negative distance, False (if) = positive distance → List.FilterByBoolMask

Information sorted

List.SortBy → List.Create → List.Flatten

Absolute maximum value

Math.Abs → List.MaximumItem → Code Block: `if (v > 4) { } else { }`

Colors used for analysis

Color Palette → List.Create → List.Count

Assigning specific colors to created lines

Geometry.Color.ByGeometryColor → GeometryColor

Export data to Excel

File Path → Data.ExportExcel → File Path

ANNEXI
Nodal algorithm developed in Dynamo 0, used to acquire distances from cloud points to the element 'column'.

Seleccionar arcos

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 184576

Obteniendo geometría de los arcos

Springs.Element.MeshGeometry
element meshes
LOD
asToolkitMesh
Code Block
1;

Springs.Mesh.ToPolySurface
mesh PolySurface
mergeAll
Boolean
True False

Seleccionar nube

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 168510

Nube de puntos segmentada y decimada

PointCloud.GetPointsFromBoxSelection
Point Cloud Instance Points
Box
AverageDistance
NumberOfPoints
Code Block
25000;

Seleccionar masa

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 366220

Distancias

Geometry.DistanceTo
geometry double
other xxx

Asignando colores especificados a la nube de puntos

Code Block
a a/b; >
b

List.MaximumItem
list max
AUTO

Color Palette
Color

List.Create
item0 + - list
item1
item2
item3

List.Count
list count
AUTO

Code Block
a 0..1..#a; >

Color Range
colors
indices
value

List.Flatten
list var[]-[]
amt
AUTO

GeometryColor.ByGeometryColor
geometry GeometryColor
color
AUTO

Exportando datos a Excel

Code Block
"PointCloud"; >

List.AddItemToFront
item list
list
AUTO

Code Block
"Distancia a modelo"; >

List.AddItemToFront
item list
list
AUTO

List.Create
item0 + - list
item1

List.Transpose
lists lists
AUTO

Code Block
1; >

File Path
Examinar...
\\Datos PC1.xlsx

Code Block
"conjunto"; >

Data.ExportExcel
filePath data
sheetName
startRow
startCol
data
overWrite
AUTO

Boolean
True False

ANEXO II
Algoritmo nodal desarrollado en Dynamo®, utilizado para adquirir los datos de las distancias de los puntos de la nube al elemento "arcos".

Select arcs

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 184576

Obtaining arc geometry

Springs.Element.MeshGeometry
element meshes
LOD
asToolkitMesh
Code Block
1;

Springs.Mesh.ToPolySurface
mesh PolySurface
mergeAll
Boolean
True False

Distance

Geometry.DistanceTo
geometry double
other

Assigning specific colors to point cloud

Code Block
a a/b; >
b

List.MaximumItem
list max

Color Range
colors indices value
color

List.Flatten
list var[]-[]
amt

Color Palette
Color

List Create
item0 + - list
item1
item2
item3

List.Count
list count
a 0..1..#a; >

Code Block
0..1..#a; >

GeometryColor.ByGeometryColor
geometry GeometryColor
color

Select point cloud

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 168510

Segmented and decimated point cloud

PointCloud.GetPointsFromBoxSelection
Point Cloud Instance Points
Box
AverageDistance
NumberOfPoints
Code Block
25000; >

Select mass

Select Model Element
Cambiar Element
Element : 366220

Export data to Excel

Code Block
"PointCloud"; >

List.AddItemToFront
item list

Code Block
"Distance to modelo"; >

List.AddItemToFront
item list

List Create
item0 + - list
item1

List.Transpose
lists lists

Code Block
1; >

File Path
Examinar...
Datos PC1.xlsx

Code Block
"Arc-column"; >

Data.ExportExcel
filePath data
sheetName
startRow
startCol
data
overWrite

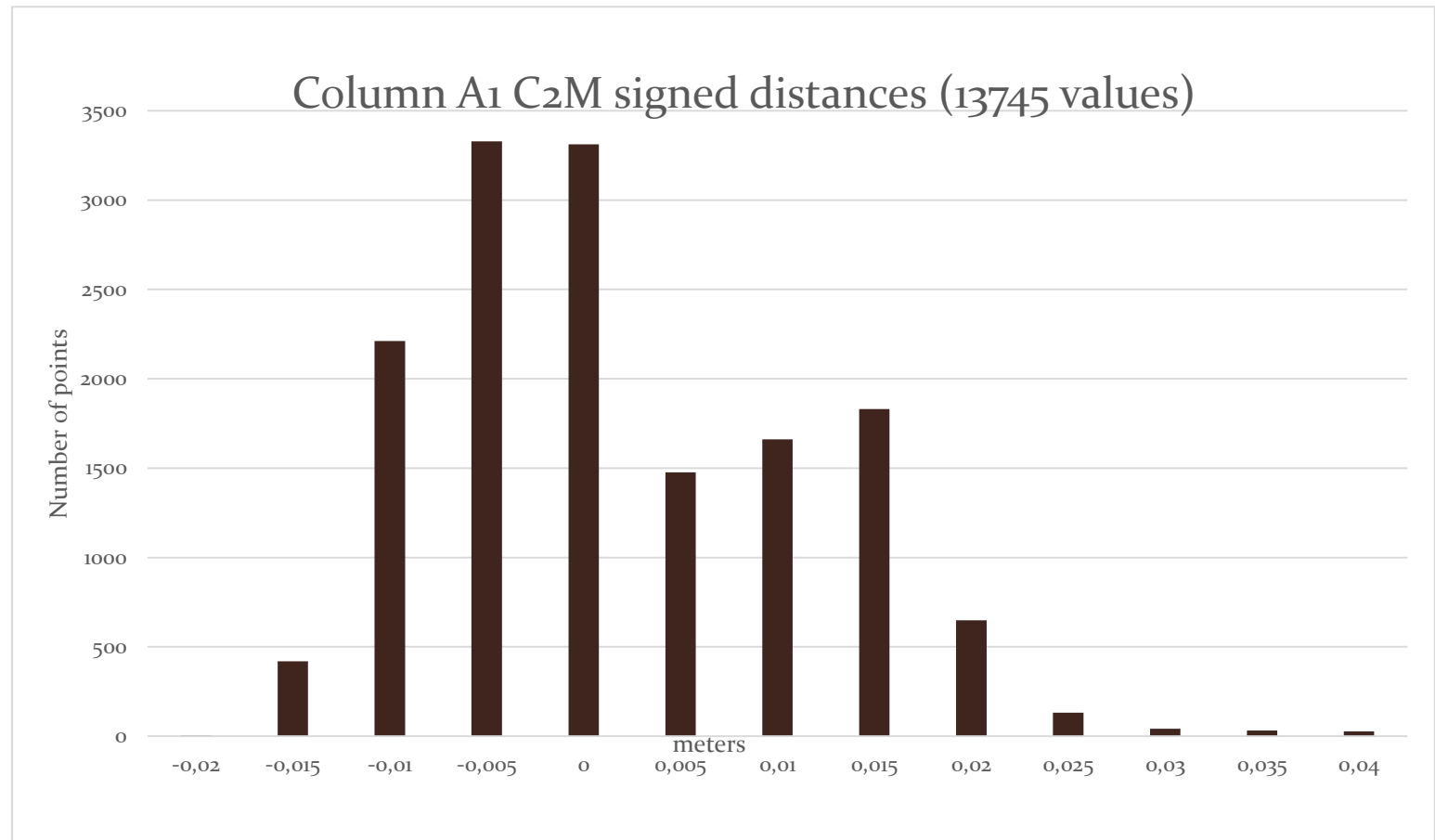
Boolean
True False

ANNEX II
Nodal algorithm developed in Dynamo ©, used to acquire distances from cloud points to the element "arcs".

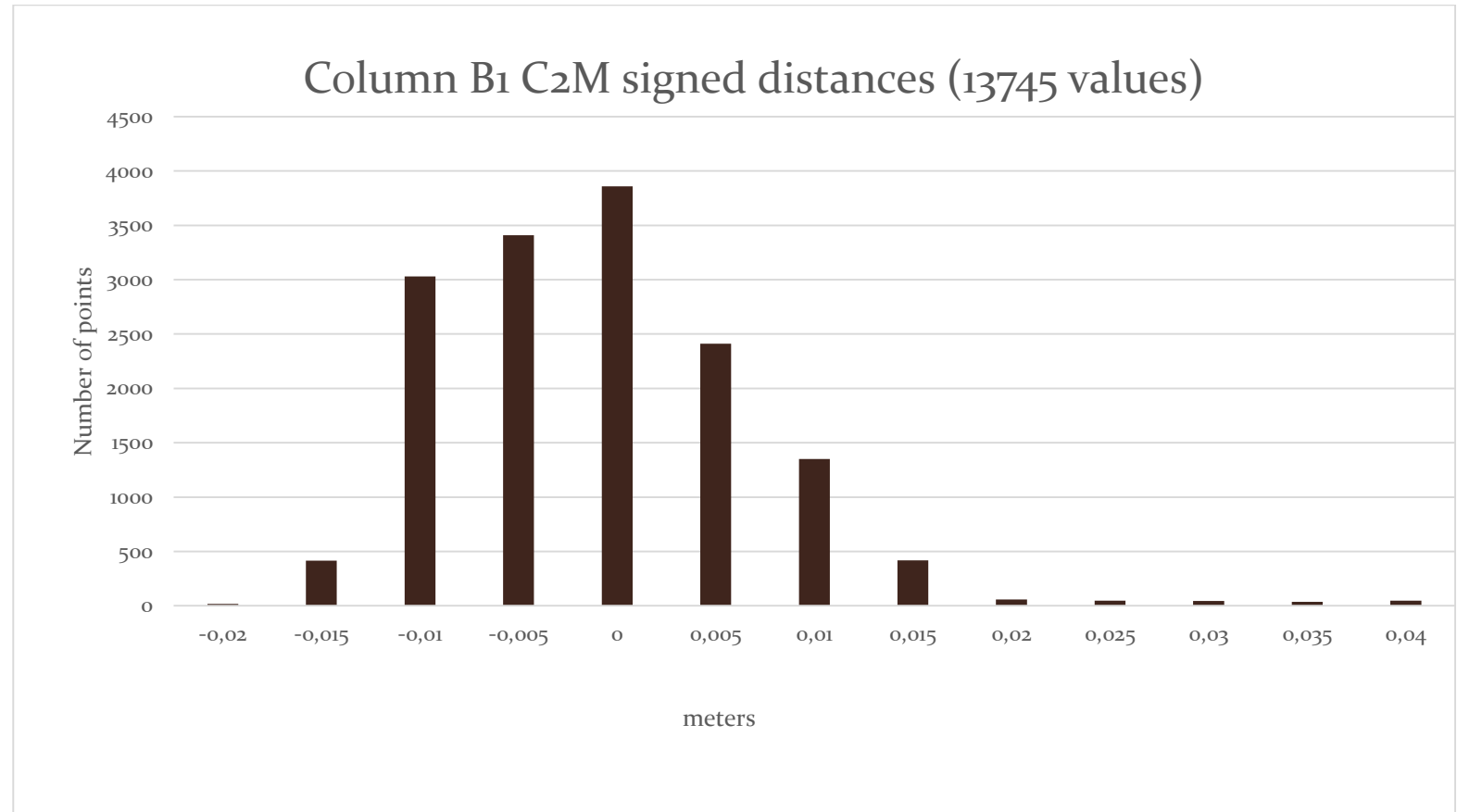
HISTOGRAMAS

Anexo III

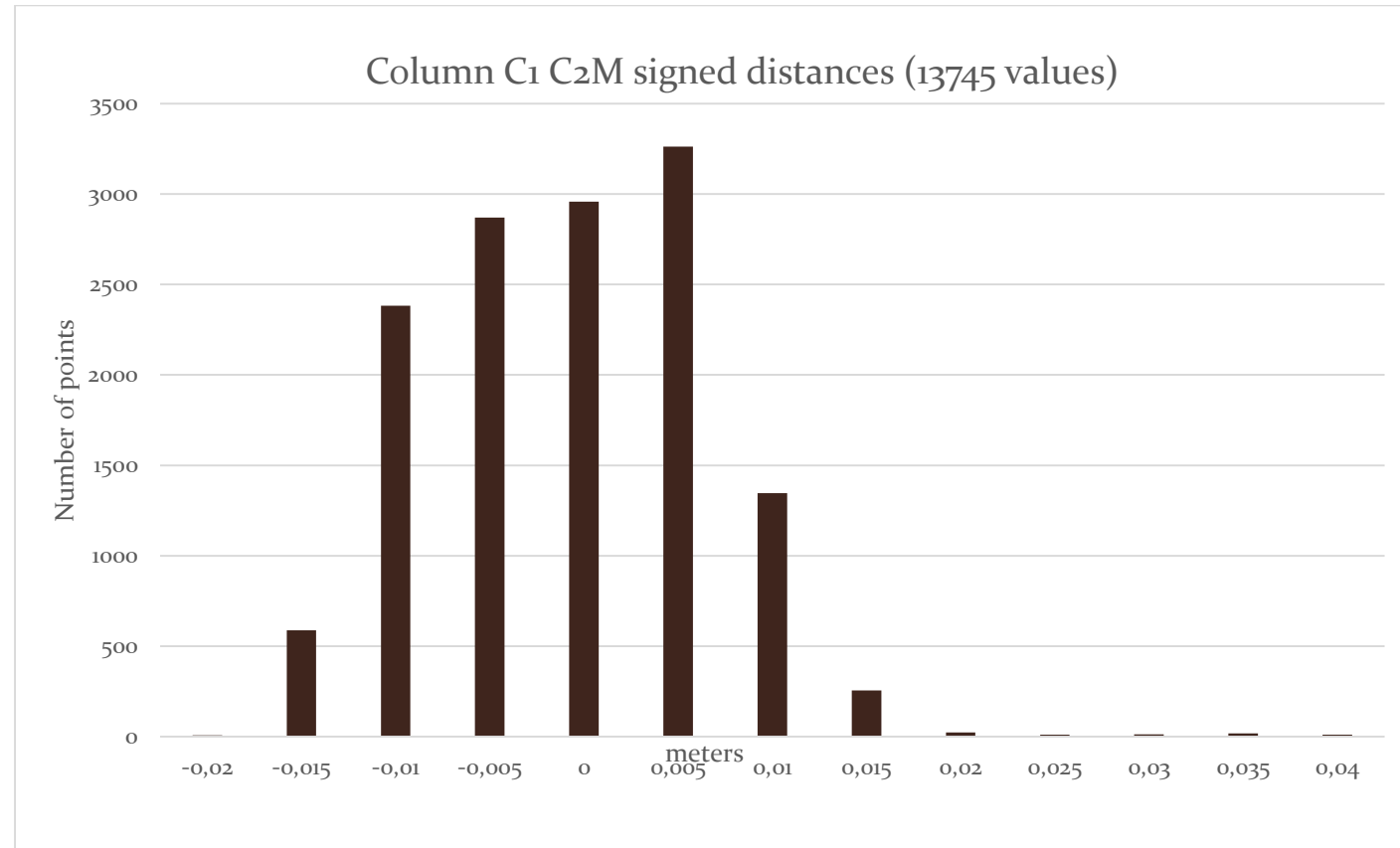
Column A1	
<i>Classes</i>	<i>Number of points</i>
-0,02	3
-0,015	419
-0,01	2211
-0,005	3328
0	3312
0,005	1476
0,01	1661
0,015	1831
0,02	649
0,025	131
0,03	42
0,035	31
0,04	26



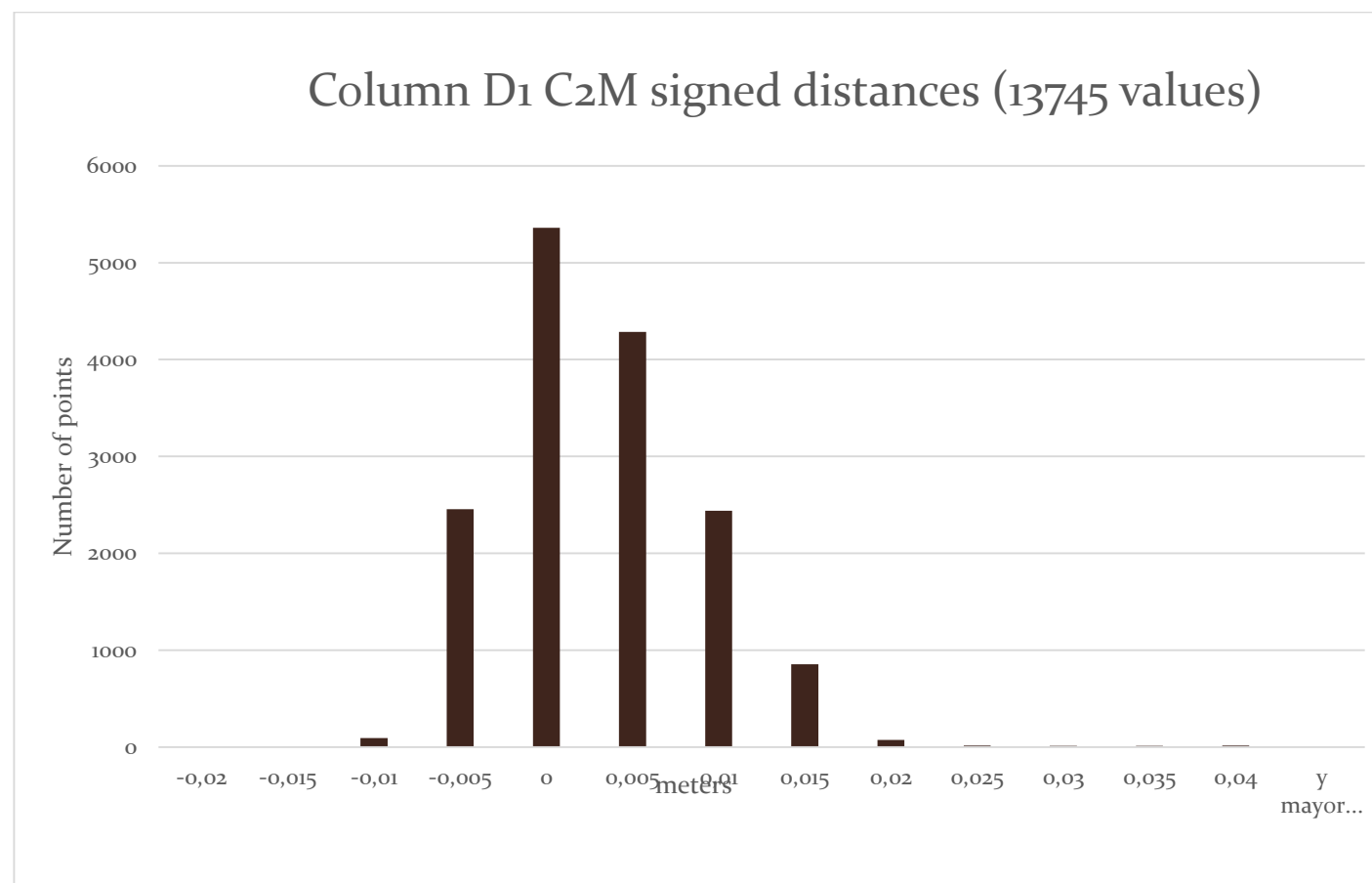
Column B1	
Classes	Number of points
-0,02	18
-0,015	414
-0,01	3030
-0,005	3408
0	3860
0,005	2410
0,01	1350
0,015	417
0,02	59
0,025	46
0,03	45
0,035	36
0,04	47



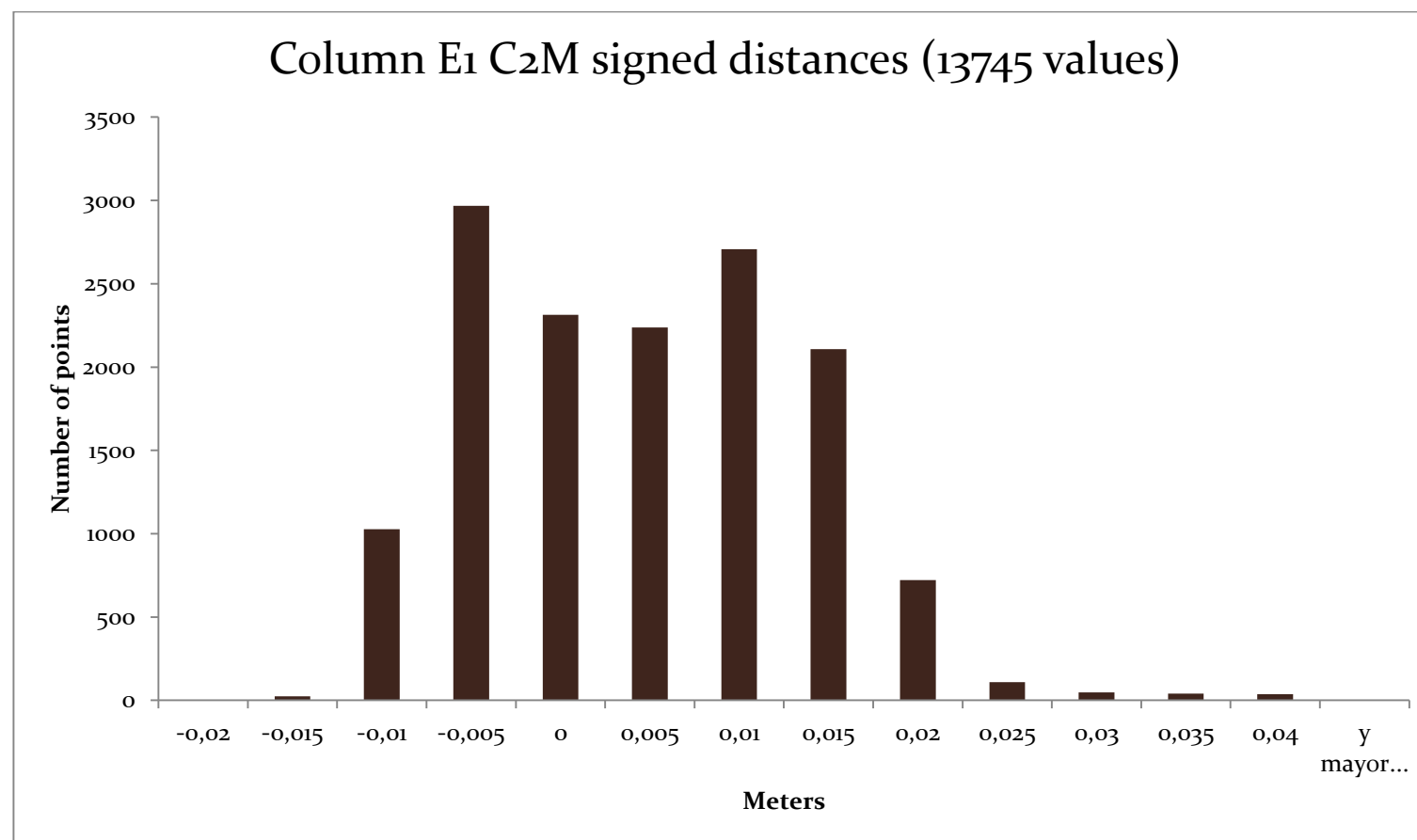
Column C1	
<i>Classes</i>	<i>Number of points</i>
-0,02	7
-0,015	588
-0,01	2383
-0,005	2869
0	2958
0,005	3262
0,01	1346
0,015	255
0,02	23
0,025	12
0,03	13
0,035	18
0,04	11



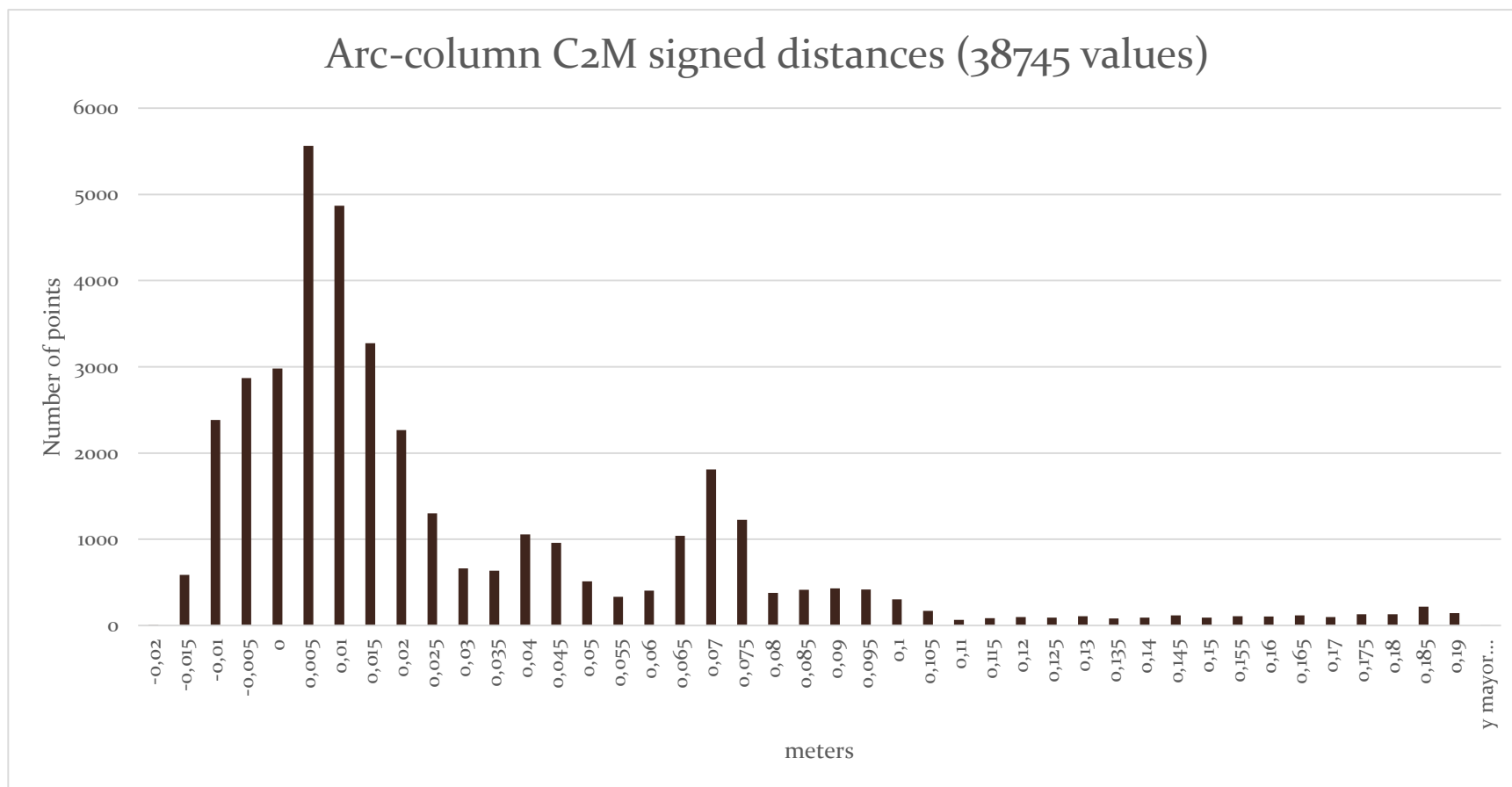
Column D1	
<i>Classes</i>	<i>Number of points</i>
-0,02	0
-0,015	1
-0,01	91
-0,005	2456
0	5361
0,005	4284
0,01	2440
0,015	854
0,02	73
0,025	14
0,03	11
0,035	11
0,04	15
y mayor...	0



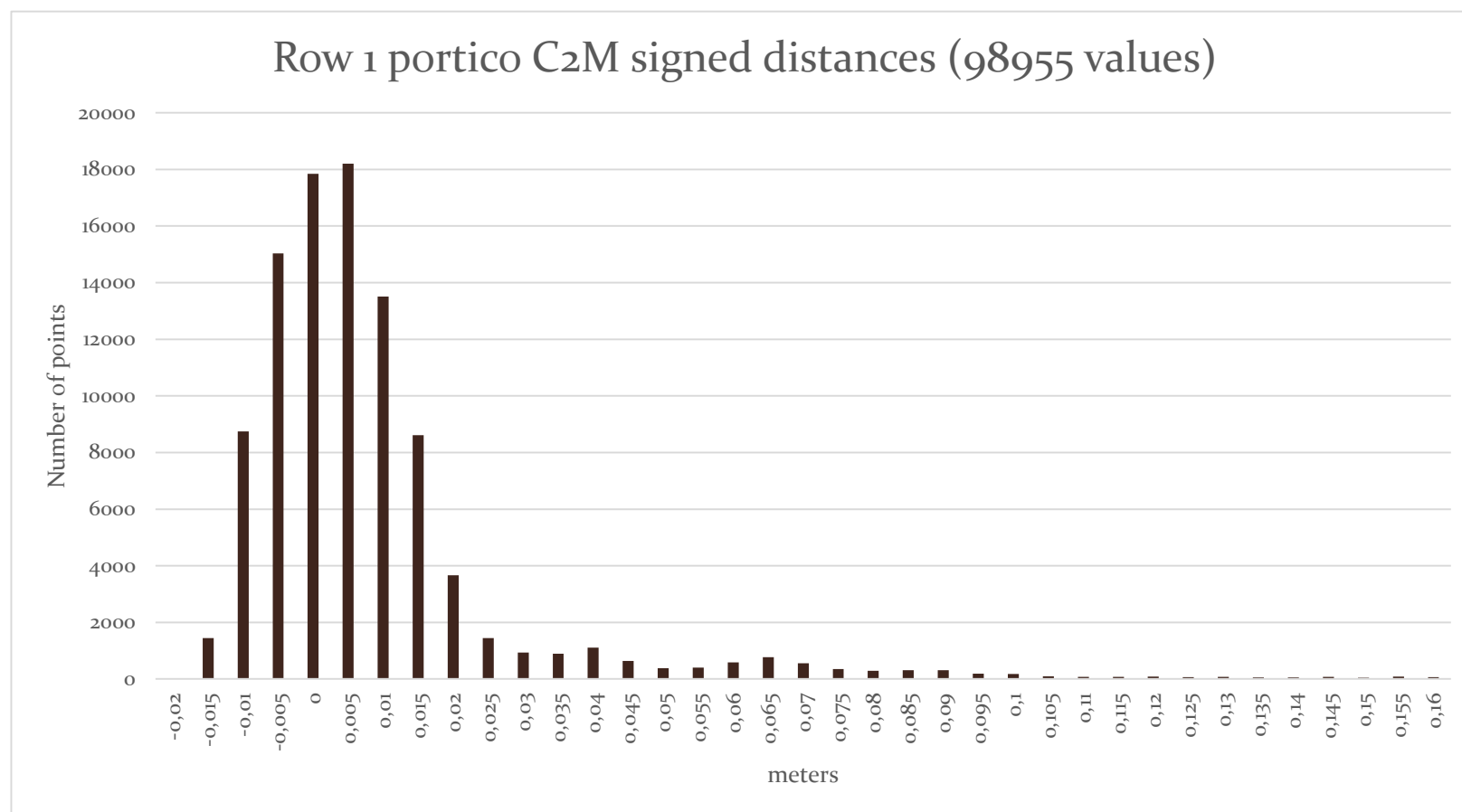
Column E1	
Classes	Number of points
-0,02	0
-0,015	24
-0,01	1028
-0,005	2968
0	2314
0,005	2237
0,01	2707
0,015	2107
0,02	721
0,025	109
0,03	47
0,035	41
0,04	37



Arc-Column	
Classes	Number of points
-0,02	7
-0,015	588
-0,01	2383
-0,005	2869
0	2980
0,005	5563
0,01	4868
0,015	3274
0,02	2267
0,025	1300
0,03	661
0,035	636
0,04	1057
0,045	960
0,05	511
0,055	332
0,06	406
0,065	1039
0,07	1811
0,075	1226
0,08	380
0,085	413
0,09	431
0,095	418
0,1	305
0,105	171
0,11	67
0,115	84
0,12	99
0,125	93
0,13	108
0,135	82
0,14	92
0,145	118
0,15	92
0,155	108
0,16	103
0,165	118
0,17	97
0,175	132
0,18	131
0,185	220
0,19	144



Row 1 portico	
Classes	Number of points
-0,02	28
-0,015	1446
-0,01	8743
-0,005	15029
0	17844
0,005	18203
0,01	13509
0,015	8608
0,02	3663
0,025	1446
0,03	932
0,035	898
0,04	1108
0,045	640
0,05	384
0,055	407
0,06	584
0,065	774
0,07	556
0,075	356
0,08	291
0,085	315
0,09	313
0,095	192
0,1	174
0,105	99
0,11	79
0,115	73
0,12	86
0,125	70
0,13	74
0,135	58
0,14	60
0,145	76
0,15	47
0,155	81
0,16	65
Valores residuales	1644





Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación