

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería Industrial

Digitalización 3D y análisis geométrico del arco marinero del Puente de Isabel II (o de Triana) de Sevilla

Autor: Gloria Liébana Garrido

Tutores: Jose Lázaro Amaro Mellado

Daniel Antón García

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Digitalización 3D y análisis geométrico del arco marino del Puente de Isabel II (o de Triana) de Sevilla

Autora:

Gloria Liébana Garrido

Tutores:

José Lázaro Amaro Mellado

Daniel Antón García

Dpto. de Ingeniería Gráfica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Digitalización 3D y análisis geométrico del arco mariner del Puente de Isabel II
(o de Triana) de Sevilla

Autor: Gloria Liébana Garrido
Tutor: José Lázaro Amaro Mellado
Daniel Antón García

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

RESUMEN

La conservación de información del patrimonio arquitectónico es crucial para su mantenimiento y divulgación y la forma de llevarla a cabo ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas, partiendo de descripciones escritas, a planimetrías 2D a tecnologías avanzadas de captura y procesado de datos 3D.

En este Trabajo Fin de Máster se ha escaneado el Puente de Isabel II, comúnmente conocido como el Puente de Triana, de Sevilla usando un escáner 3D para obtener información con gran detalle del estado actual del arco mariner situado en el estribo del puente y realizar un análisis geométrico, teniendo así una nueva forma de información patrimonial sobre este elemento arquitectónico de gran importancia para la ciudad de Sevilla.

El análisis geométrico consiste en estudiar las deformaciones o desplomes que ha sufrido el puente, tanto el arco como su pared de la cara norte con respecto a arcos y planos ideales.

Además, usando como base la nube de puntos escaneada, se ha modelado el resto del puente hasta la siguiente pila, con el objetivo de continuar en futuros estudios con un análisis estructural.

Como resultado, se ha obtenido el modelo del estribo que representa la realidad fielmente y que tras analizarlo muestra unas grietas de más de 20 cm y estando la mayor parte de la bóveda a una distancia menor a 10 cm de un arco ideal.

En cuanto al paramento de la cara norte del estribo se ha analizado tanto su planitud como su verticalidad. Para el primer análisis se ha observado que la mayoría de los puntos se encuentran a menos de 12 cm de un plano ideal y que sólo un 0,056% de los puntos del paramento tienen deformaciones de alrededor de los 30 cm. Por último, se ha conseguido conocer el desplome aproximado del puente, siendo este de $0,31^\circ$ en la cara norte y de $0,149^\circ$ en la cara sur.

ABSTRACT

The preservation of architectural heritage information is crucial for its maintenance and dissemination and the way to carry it out has evolved considerably in recent decades, going from written descriptions, 2D plans to the latest technologies for obtaining and processing 3D data.

In this Master Thesis the Triana Bridge in Seville has been scanned using a 3D scanner to obtain information with great detail of the current state of the marine arch located in the abutment of the bridge and perform a geometric analysis, thus having a new form of heritage information on this architectural element of great importance for the city of Seville.

The geometric analysis consists of studying the deformations or collapses that the bridge has suffered, both the arch and its north face wall with respect to ideal arches and planes.

In addition, using the scanned point cloud as a basis, the rest of the bridge up to the next pier has been modelled, with the aim of continuing with a structural analysis in future studies.

As a result, a model of the abutment has been obtained that faithfully represents reality and that after analysis shows cracks of more than 20 cm and most of the vault being at a distance of less than 10 cm from an ideal arch.

As for the facing of the north face of the abutment, both its flatness and verticality have been analyzed. For the first analysis it has been observed that most of the points are less than 12 cm from an ideal plane and that only 0.056% of the points of the facing have deformations of about 30 cm. Finally, the approximate collapse of the bridge was found to be 0.31°.

ÍNDICE

Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice	X
Índice de tablas	XII
Índice de figuras	XIII
1. Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	1
1.2. <i>Estructura del trabajo</i>	2
1.3. <i>Ámbito geográfico del trabajo</i>	2
2. Caso de estudio: el puente de Triana	4
2.1. <i>Descripción del Puente</i>	4
2.2. <i>Datos históricos</i>	5
3. Estado del arte	7
3.1. <i>Escaneado 3D</i>	7
3.2. <i>Escaneado 3D en el patrimonio histórico</i>	10
4. Materiales y programas para la elaboración de este trabajo	12
4.1. <i>Escáner BLK360 G1</i>	12
4.2. <i>Cyclone Field 360</i>	13
4.3. <i>Cyclone Register 360</i>	13
4.4. <i>CloudCompare</i>	14
4.5. <i>Rhinoceros 7</i>	15
5. Proceso	17
5.1. <i>Escaneado 3D</i>	17
5.2. <i>Procesamiento de datos: nubes de puntos</i>	19
5.2.1. <i>Estribo</i>	23
5.3. <i>Modelado de la parte de hierro</i>	30
5.3.1. <i>Arcos de hierro</i>	30
5.3.2. <i>Estructura tablero</i>	31
5.3.3. <i>Barandilla</i>	32
5.3.4. <i>Calzada</i>	33
5.4. <i>Análisis de deformaciones</i>	34
5.4.1. <i>Deformaciones en el arco</i>	34
5.4.2. <i>Verticalidad de la pared</i>	36
5.4.3. <i>Planitud del paramento frente de la bóveda</i>	38
6. Resultados y discusión	40
6.1. <i>Modelado del puente</i>	40
6.2. <i>Análisis geométrico</i>	42
6.2.1. <i>Deformaciones del arco</i>	42
6.2.2. <i>Verticalidad</i>	45
6.2.3. <i>Planitud</i>	45
7. Conclusiones	47
8. Referencias	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis cuantitativo de la exactitud de la malla del arco	29
Tabla 2: Análisis cuantitativo de la exactitud de la malla del extremo del estribo	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Emplazamiento del Puente de Triana. Coordenadas en km. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OpenStreetMap (openstreetmap.org).....	3
Figura 2: Alzado del puente. Fuente: (Ríos Pérez, 2017).....	4
Figura 3: Puente de Barcas de Triana trasladado a la Maestranza durante la construcción del actual. Fuente: (Salas, 2016).....	5
Figura 4: Fotografía del puente de Triana en la actualidad. Fuente: Google Maps https://www.google.es/maps/@37.3866765,-6.0015323,3a,75y,274.34h,93.62t/data=!3m6!1e1!3m4!1sfvomR-TTcLUpm02EC7p6sg!2e0!7i16384!8i8192?entry=ttu	6
Figura 5: Esquema del funcionamiento del escaneado por proyección de patrones. Fuente: (García Menéndez, Domínguez-Somonte, & Espinosa-Escudero, 2021).....	7
Figura 6: Esquema del funcionamiento de la fotogrametría. Fuente: (Santos Maestre, 2014).....	8
Figura 7: Esquema del funcionamiento de un escáner TLS. Fuente: (Falip & Del Cogliano, 2019).....	9
Figura 8: Coordenadas polares de un punto obtenido con TLS. Fuente: (Rodríguez Juárez, 2016).....	10
Figura 9: Modelo digital del edificio del Banco Santander en Bilbao. Fuente: (Entrenas Villegas, 2019).....	11
Figura 10: Escáner BLK360 G1 marca Leica. Fuente: (Leica Geosystems, 2018).....	12
Figura 11: Interfaz aplicación Cyclone Field 360. Fuente: (Leica Geosystems, 2018).....	13
Figura 12: Interfaz Cyclone Register 360. Fuente (Leica Geosystems, 2018).....	14
Figura 13: Interfaz CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	15
Figura 14: Interfaz de Rhino. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	16
Figura 15: Escáner en el trípode con pértiga a alrededor de 4 m de altura. Fuente: elaboración propia....	17
Figura 16: Escáner en estacionamientos E12 y E2. Fuente: elaboración propia con cámara fotográfica ..	18
Figura 17: Croquis de la planta del puente con las posiciones de los estacionamientos. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 18: Conjunto de estacionamientos unido y optimizado. Fuente: elaboración propia en Cyclone Register 360.....	20
Figura 19: Planta del estacionamiento 2 en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	20
Figura 20: Estacionamiento 2 sin recortar. Fuente: Elaboración propia en CloudCompare.....	21
Figura 21: Estacionamiento 1 sin recortar. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	21
Figura 22: Polígono de segmentación en el Estacionamiento 1. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	22
Figura 23: Estacionamiento 1 tras hacer ‘Segment Out’ del polígono de la Figura 22. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	22
Figura 24: Nube de puntos del estacionamiento 1 recortada. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	23
Figura 25: Nube de puntos del arco mariner recortada. Fuente: elaboración propia en CloudCompare..	24
Figura 26: Nube de puntos recortada del extremo del estribo. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	24
Figura 27: Oclusiones en el estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	25
Figura 28: Superficies creadas para tapar los huecos. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	26
Figura 29: Parches y cimientos creados para el estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	26
Figura 30: Superficies creadas en Rhino para el extremo del estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	27

Figura 31: Listado de coordenadas de puntos de la nube del arco. Fuente: elaboración propia en CloudCompare	28
Figura 32: Arco mariner mallado. Octree Depth 9. Fuente: elaboración propia en CloudCompare	29
Figura 33: Extremo con cimient mallado en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare	30
Figura 34: Nube de puntos escaneada de la parte de hierro. Fuente: elaboración propia en Rhino	31
Figura 35: Modelado arcos de hierro. Fuente: elaboración propia en Rhino	31
Figura 36: Parte inferior del tablero. Fuente: elaboración propia en Rhino	32
Figura 37: Panel zigzag portante del tablero y vigas cajón. Fuente: elaboración propia en Rhino	32
Figura 38: Barandilla. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	33
Figura 39: Corte de la calzada y estructura del tablero. Fuente: elaboración propia en Rhino	33
Figura 40: Nube de puntos del arco recortado. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	34
Figura 41: Vista en alzado del arco y curva ideal. Fuente: elaboración propia en Rhino	35
Figura 42: Curva extruida. Fuente: elaboración propia en Rhino	35
Figura 43: Nube de puntos del arco ideal. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	36
Figura 44: Ventana de CloudCompare para elegir nube de referencia. Fuente: elaboración propia en CloudCompare	36
Figura 45: Cara norte recortada. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	37
Figura 46: Perspectiva del modelado de la recta de máxima pendiente del paramento de la cara sur del estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	38
Figura 47: Nube de puntos ajustada al plano del paramento y nube de puntos del paramento en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	38
Figura 48: Nube de puntos ajustada al paramento recortada con la forma del arco. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	39
Figura 49: Malla del estribo del puente unido. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	40
Figura 50: Modelado del tablero y parte de hierro unido. Fuente: elaboración propia en Rhino.....	40
Figura 51: Zoom del modelo del tablero y parte de hierro unido. Fuente: elaboración propia en Rhino...	41
Figura 52: Alzado del puente. Fuente: elaboración propia en Rhino	41
Figura 53: Puente en perspectiva. Fuente: elaboración propia en Rhino	42
Figura 54: Histograma de las distancias entre la nube de puntos del arco ideal y la real. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	43
Figura 55: Mapa de colores del arco en perspectiva. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	43
Figura 56: Mapa de colores en vista inferior. Fuente: elaboración propia en CloudCompare	44
Figura 57: Fotografía de grieta en la bóveda real. Fuente: Google maps https://www.google.es/maps/@37.386894,-6.0019378,3a,75y,295.94h,142.5t/data=!3m6!1e1!3m4!1sRJhBteb-R8fmPYmf2sZciQ!2e0!7i16384!8i8192?entry=ttu	44
Figura 58: Histograma de la distancia entre la nube de puntos ideal del paramento y la real. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	45
Figura 59: Mapa de colores de distancias entre nubes del paramento en vista alzado. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.....	46

1. INTRODUCCIÓN

Según Azkarate, Ael, & Santana (2003), el patrimonio arquitectónico puede definirse como ‘el conjunto de bienes edificados, de cualquier naturaleza, a los que cada sociedad atribuye o en los que cada sociedad reconoce un valor cultural’.

La conservación de información del patrimonio arquitectónico ha sido una inquietud desde hace mucho tiempo. Para encontrar los primeros registros de la conservación del patrimonio arquitectónico es necesario remontarse a la antigüedad, donde civilizaciones como los egipcios, griegos y romanos ya se interesaban por guardar y documentar sus estructuras y monumentos (Crocì, 1998). La importancia de la conservación de esta documentación se debe, entre otros, a que esta es clave para su gestión, difusión, valorización y protección.

En España se comenzaron a escribir las primeras disposiciones para tener catálogos de monumentos a finales del siglo XVIII, pero con el único fin de tener recogida la existencia de estos documentos. No fue hasta 1900 cuando se establece en el Real decreto del 1 de junio la necesidad de una catalogación completa donde se describan y dibujen los monumentos. (Quintilla Castan & Agustín-Hernández, 2023)

Sin embargo, la forma en que se conserva la información ha evolucionado a lo largo de la historia. Al principio, se usaban técnicas como dibujos, pinturas y descripciones escritas para documentar los edificios y monumentos arquitectónicos. Con el avance tecnológico progresivo, se introdujeron métodos más precisos, como la fotografía, el levantamiento topográfico y los registros detallados en planos y dibujos técnicos.

En la actualidad, se utilizan tecnologías digitales avanzadas, como la fotogrametría, el escaneado láser 3D y la realidad virtual, para capturar y conservar información detallada del patrimonio arquitectónico. Estas técnicas permiten documentar estructuras con gran precisión y crear modelos digitales que pueden ser utilizados para realizar análisis de diferentes tipos, conservación y difusión (Remondino, 2011).

Es por eso que en este trabajo se ha llevado a cabo el escaneo de una parte de uno de los puentes más importantes y queridos para la ciudad de Sevilla, el estribo de piedra de la orilla de Sevilla del puente de Triana. Puesto que será de gran ayuda en futuras investigaciones sobre el puente y ampliará de forma significativa la información recogida hasta ahora sobre él, dando la posibilidad y el privilegio a futuras generaciones de poder conocerlo, estudiarlo, visualizarlo e incluso disfrutarlo tal como lo conocemos hoy en día.

1.1. Objetivos

Los objetivos perseguidos con este trabajo son:

- ✓ Obtener información geométrica del estribo del puente de Triana de la orilla de Sevilla, para conservar el estado actual de este puente de gran importancia para la ciudad.
- ✓ Realizar un análisis de sus deformaciones y alteraciones actuales.
- ✓ Servir de base para futuros estudios y análisis estructurales del arco marineró del puente, por lo que también se ha modelado la parte de hierro del puente que influye estructuralmente en dicho arco.

1.2. Estructura del trabajo

- ✓ Apartado 1. Este capítulo introductorio, presenta el trabajo, recoge los objetivos y estructura del mismo, así como define el ámbito del trabajo.
- ✓ Apartado 2. Se presenta y describe el caso de estudio, es decir, el puente de Triana, con una descripción tanto histórica como técnica.
- ✓ Apartado 3. En esta sección, se expone y explica las técnicas usadas en el trabajo, el escaneado 3D y la justificación de su uso. Además, se nombran y describen otras técnicas que también podrían haberse usado.
- ✓ Apartado 4. En él, se hace una descripción de describen los materiales y los programas informáticos usados a lo largo del trabajo.
- ✓ Apartado 5. Se desarrolla el proceso seguido para la toma, procesamiento, modelado y análisis de los datos del puente.
- ✓ Apartado 6. Este apartado recoge los resultados, así como el análisis de los mismos.
- ✓ Apartado 7. Se recogen las conclusiones obtenidas tras la realización de todo el trabajo.
- ✓ Apartado 8. Las referencias bibliográficas empleadas en este trabajo quedan reflejadas en esta sección.
- ✓ Apartado 9. Finalmente, se adjunta el anexo con la demostración de la precisión de los datos obtenidos con el escáner.

1.3. Ámbito geográfico del trabajo

El caso de estudio de este trabajo, el Puente de Triana o Puente de Isabel II, se encuentra en la ciudad de Sevilla, capital de Andalucía, España y une el Paseo de Colón a la altura de la calle Reyes Católicos con la Plaza del Altozano en el barrio de Triana. Específicamente, la mayor parte del trabajo se ha centrado, como se ha comentado anteriormente, en el estribo de piedra de la orilla de Sevilla, marcado con un punto en la Figura 1.

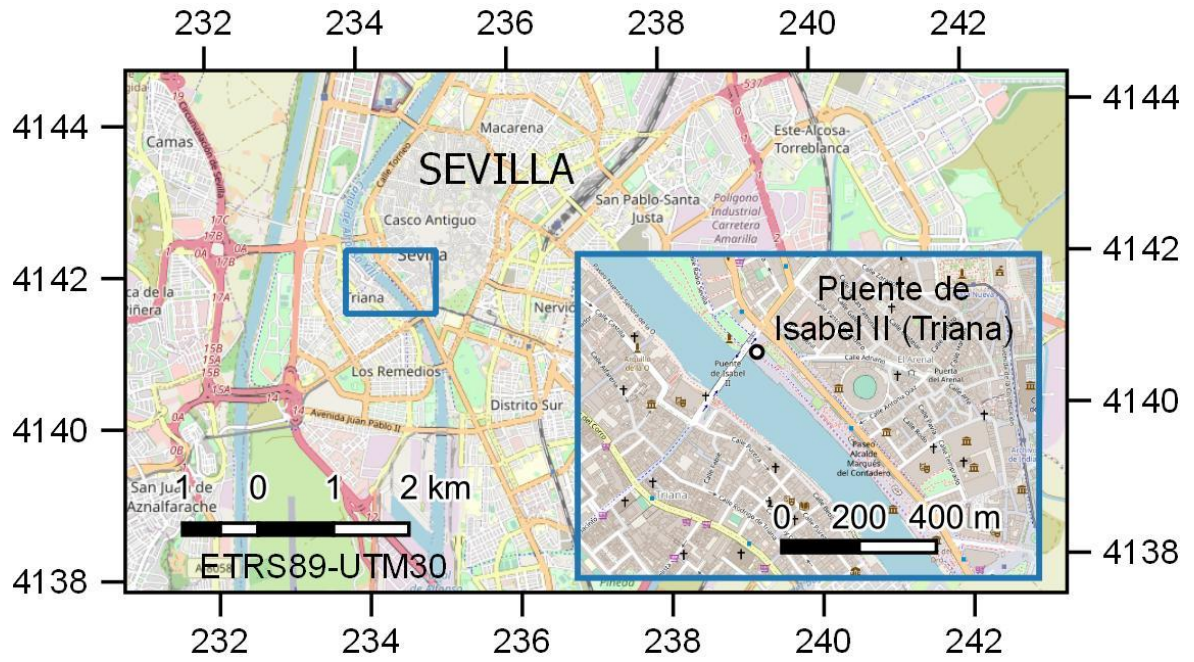


Figura 1: Emplazamiento del Puente de Triana. Coordenadas en km. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OpenStreetMap (openstreetmap.org).

2. CASO DE ESTUDIO: EL PUENTE DE TRIANA

Como ya se ha mencionado, este estudio se centra en el arco mariner del Puente de Isabel II (o de Triana), en Sevilla. A continuación, se describen algunos aspectos del puente.

2.1. Descripción del Puente

La luz del puente, incluyendo los estribos, es de ciento treinta y seis metros y medio, la anchura entre barandas es de trece metros y cuarenta centímetros y la luz de los arcos de sus tres vanos de cuarenta y tres metros y cuarenta y seis centímetros (Graciani García, 1996).

La estructura se compone de cuatro bases de piedra, dos pilas centrales y dos estribos laterales (como se observa en la Figura 2), entre las que se abren tres vanos iguales, contando además con un arco mariner también de sillería. Cada vano está constituido por cinco arcos gemelos de hierro colado unidos por cruces interiores, sujetos por tornillos y cada arco está formado por piezas de fundición de sección elíptica rellenas por tablas de madera de pino del norte pegadas con un betún especial. El arco mariner, en el cual se centrará este trabajo, está compuesto de piedra (Lefler Pino, Herencia Ruiz, & Vázquez Orellana, 1999).

Las piezas de hierro se fabricaron en la fundición sevillana de Narciso Bonaplata, con hierro procedente de las minas vizcaínas de Guerezo en su mayor parte (Movellán, 1978).

Inicialmente, entre tablero y arcos se situaban cinco arcos resistentes de hierro colado unidos también por tornillería. El pavimento previsto para la calzada era de hormigón y el de los andenes de piedra. El soporte descansaba sobre un entramado de hierro conectado a las estructuras principales, formando un tercio de su base. Sobre este entramado se ubicaba una capa de relleno compuesta por ladrillos y pequeñas bóvedas, estando sobre estas el hormigón. Por otra parte, los cimientos de los estribos eran de hormigón y argamasa y los de los pilares de argamasa, cal hidráulica y guijarros, protegido con encofrado de hierro y madera.

Esta estructura presentó diversos problemas debido al creciente tráfico para el que no había sido diseñado, por lo que se consideró demolerlo o cerrarlo. Sin embargo, finalmente, se modificó el tablero para que, en lugar de estar apoyado en las pilas, estribos y arcos, sólo estuviera apoyado en pilas y estribos, siendo los arcos únicamente decorativos.

Es así como el actual tablero está constituido por una viga continua formada por dos vigas cajón, con un canto constante de un metro y cuarenta y tres centímetros y una anchura de dos metros y medio, separadas nueve metros y veinte centímetros entre sí, pero arriostradas por una losa ortótropa de chapa rigidizada y longitudinalmente con nervios, siendo una única estructura.

La cimentación también se reforzó inyectando lechadas de cemento a baja presión en las pilas y estribos y micropilotando los apoyos hasta la capa de margas.

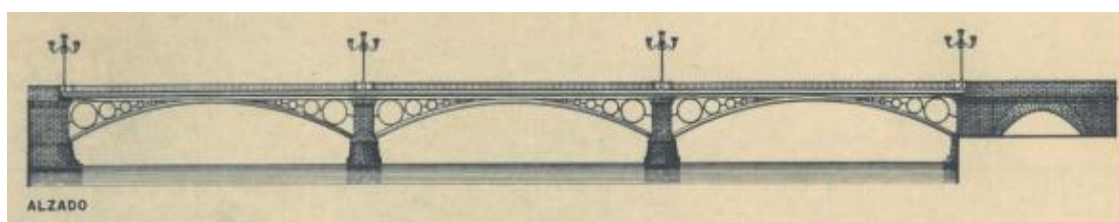


Figura 2: Alzado del puente. Fuente: (Ríos Pérez, 2017)

2.2. Datos históricos

Este puente se comenzó a construir en 1848 y se inauguró en febrero de 1852 (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2023).

Previo a este puente existía un puente de barcas (Figura 3) en la misma localización construido en 1171, en el periodo almohade bajo el reinado del califa Abu Yakub Yusuf, siendo el primer puente construido sobre las aguas del Guadalquivir (Pacheco Morales-Padrón, 2018).

Para este puente se usaron once barcas inicialmente, reduciéndose más adelante a diez y aseguradas entre sí por maderos y al lecho del río por anclas y gruesos cables. Las barcas eran de gran altura con el objetivo de evitar que el agua del río entrara en ellas.

El suelo del puente estaba constituido por tableros de madera descansados sobre fuertes vigas que se encontraban sobre los maderos que unían las barcas.

El puente tenía una longitud de 130,4 metros y 12,5 metros de ancho (Domínguez, 2018).

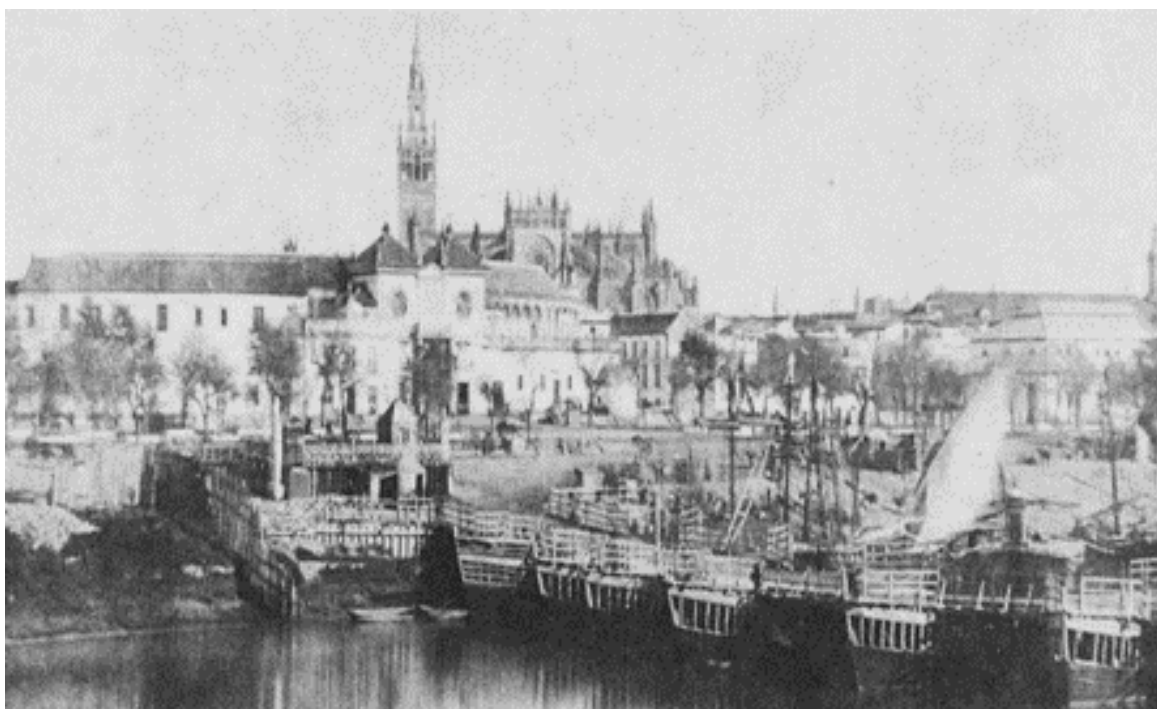


Figura 3: Puente de Barcas de Triana trasladado a la Maestranza durante la construcción del actual.

Fuente: (Salas, 2016)

Debido al uso de madera como material prevaleciente, era necesario llevar a cabo muchas acciones de rehabilitación por la humedad, provocando altos costes de conservación, por lo que se decidió sustituirlo por uno de carácter permanente bajo el reinado de Isabel II, siendo el primero de este tipo en la ciudad. Esta decisión tomó más de 600 años en ser tomada puesto que los avances humanos no eran los suficientes y necesarios para poder construir un gran puente de piedra en esa parte del río (Pacheco Morales-Padrón, 2018).

En marzo de 1844 los ingenieros Fernando Bernardet y Gustavo Steinacher (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2023) presentaron el proyecto para la construcción del puente, de hierro colado con dos pilastras centrales, basado en el puente de Carrousel de París, entre otras soluciones que fueron descartadas. Fue este el elegido debido a su belleza y a la experiencia en el diseño similar del Carrousel. El

proyecto fue presupuestado en doce millones de reales (por aquel entonces 18000 €) y en diciembre de 1848 se comenzó la obra, siendo gestionada por los mismos Bernadet y Steinacher. Inicialmente estaba planificada para llevarse a cabo en tres años, sin embargo, hasta 1852 no fue inaugurada debido a la aparición de diversos problemas como el abandono de Bernardet o la retirada de Steinacher del proyecto por problemas de financiación para dar paso al ingeniero Canuto Corroza (Movellán, 1978).

Como se ha especificado en el anterior apartado, el puente sufrió varias modificaciones. Desde su inauguración hasta 1881 tuvo lugar la consolidación de las pilas y estribos. Tras esto, se sustituyó el tablero, proceso que duró hasta 1918. Y, por último, desde 1958 hasta 1977 se produce el cierre del puente a camiones y autobuses y se realiza la construcción del tablero autoportante descrito en el apartado anterior. Este último proyecto fue encargado por el Ministerio de Obras Públicas a Juan Batanero García Geraldo, siendo el director de las obras el ingeniero Manuel Ríos Pérez y en la actualidad se encuentra como se muestra fotografiado en la Figura 4.



Figura 4: Fotografía del puente de Triana en la actualidad. Fuente: Google Maps

<https://www.google.es/maps/@37.3866765,-6.0015323,3a,75y,274.34h,93.62t/data=!3m6!1e1!3m4!1sfvomR-TTcLUpm02EC7p6sg!2e0!7i16384!8i8192?entry=ttu>

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Escaneado 3D

Con el escaneado 3D es posible obtener la descripción geométrica de un objeto, incluyendo además otro tipo de información como su color, o la variable incidencia del láser en distintos materiales y texturas, incluyendo las patologías (Antón, Carretero Ayuso, Moyano Campos, & Nieto Julián, 2022).

Existen diferentes tipos de escaneado 3D, y por lo tanto diferentes tipos de escáneres, algunos más apropiados para objetos pequeños (por ejemplo, el escaneado de luz estructurada) y otros con mayor rango (basados en tecnología LiDAR, del inglés *Light Detection and Ranging*) y adecuados para elementos más grandes, como elementos arquitectónicos (Douillard, y otros, 2011).

Los tipos de escaneados 3D más usados según Díaz Gómez, y otros (2015) son:

- Proyección de patrones o escáner de luz estructurada: se proyectan patrones de luces y sombras sobre el objeto a escanear mientras una cámara captura las deformaciones de las franjas de luz al proyectarse sobre él. A partir de esa deformación y mediante distintos algoritmos de análisis y reconstrucción de imagen se calcula la geometría del objeto. Es adecuado para piezas pequeñas o medianas. En la Figura 5 se representa su funcionamiento

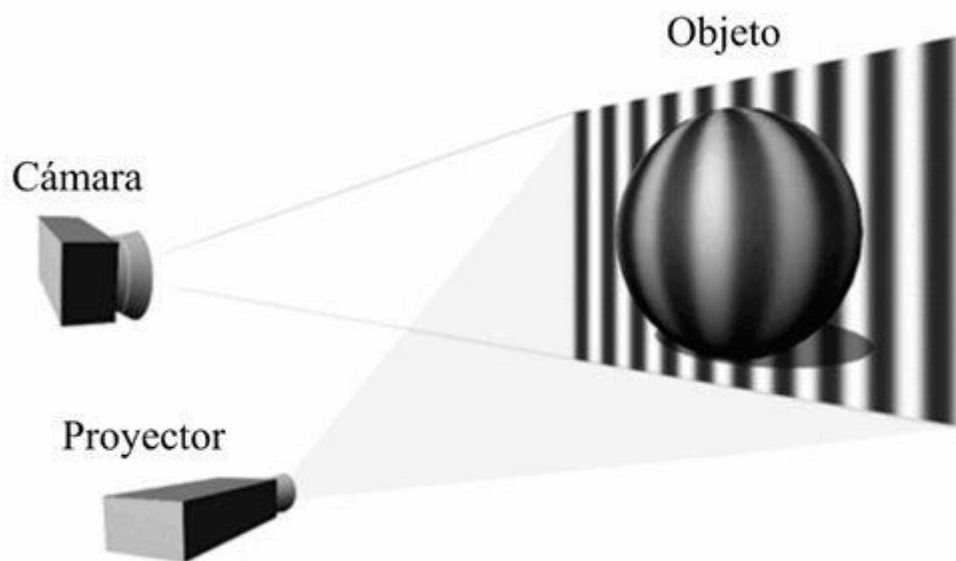


Figura 5: Esquema del funcionamiento del escaneado por proyección de patrones. Fuente: (García Menéndez, Domínguez-Somonte, & Espinosa-Escudero, 2021)

- Proyección láser: el escáner láser. Existen dos tipos:
 - Escáneres que proyectan una línea con un procedimiento similar al de proyección de patrones
 - Escáneres que proyectan un punto, conocidos como escáner láser, en este trabajo se ha usado un escáner de este tipo, en concreto un escáner láser de tiempo de vuelo, los cuales emiten una luz sobre el objeto y miden el tiempo que tarda la luz al regresar. Teniendo en

cuenta la velocidad del haz, calcula la distancia a la que se encuentra el objeto. Para obtener la nube de puntos completa, el escáner gira respecto a la vertical y el haz de luz también gira.

Además, existen otros tipos de tecnologías:

- Fotogrametría: se toman varias fotografías del objeto desde diferentes posiciones. Se revierte el proceso de la fotografía, es decir, con la fotogrametría se obtiene información gráfica y analítica de objetos 3D a partir de fotografías (Santos Maestre, 2014). Se puede entender mejor su funcionamiento de una forma más esquemática con la Figura 6.

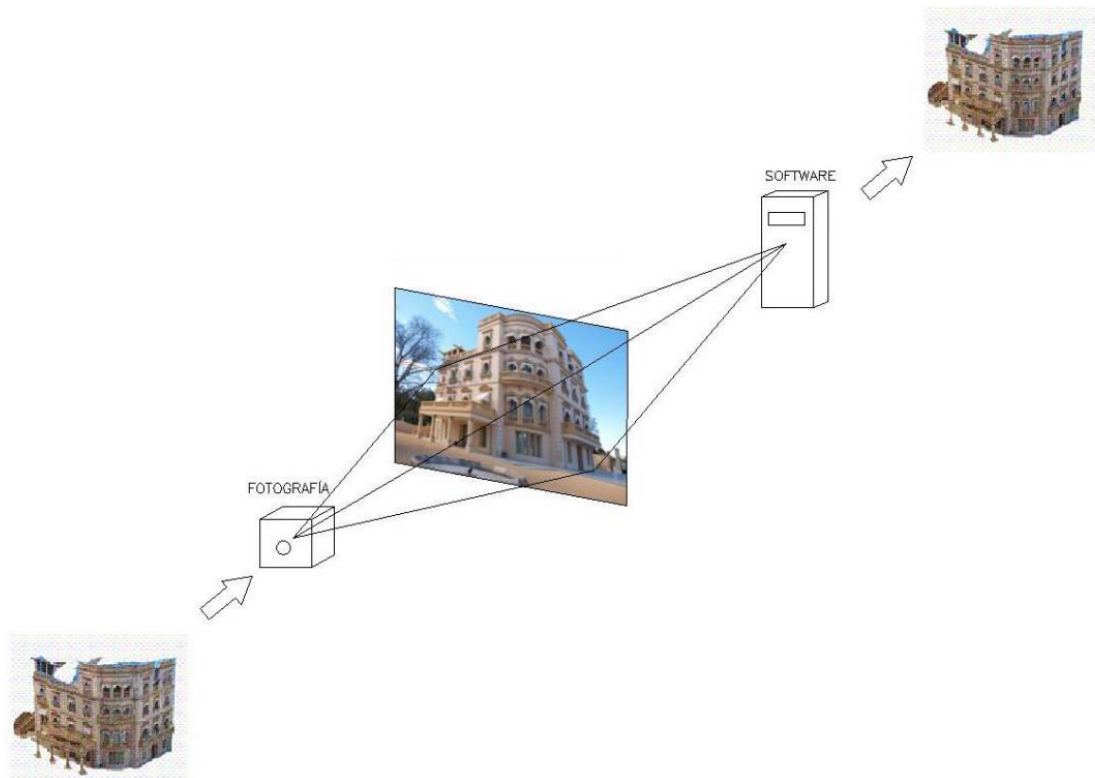


Figura 6: Esquema del funcionamiento de la fotogrametría. Fuente: (Santos Maestre, 2014)

- Ultrasonidos: se usan ondas ultrasónicas de igual forma que los láseres usan el haz de luz para medir la distancia entre el escáner y el objeto. Es muy útil en objetos transparentes o fluidos.
- Escaneado de texturas: no solo capturan la geometría del objeto, sino que también su textura y color.

Cada tipo de tecnología tiene ventajas e inconvenientes y para cada tipo de objeto hay una elección más acertada. En el caso de este trabajo, en el que se ha escaneado una estructura arquitectónica, se ha usado el escaneado láser, para ello se ha usado un escáner de tiempo en vuelo, también llamado Láser Escáner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS).

Se ha usado esta tecnología en primer lugar porque se disponía de ella, pero también por diferentes motivos: se necesitaba un mayor alcance que este escáner permitía y había bastante ruido en la zona como vegetación o transeúntes. Además, si se hubiera usado la fotogrametría, al tener que enfocar al cielo hubiera habido un excesivo contraste en las fotografías. Así, el escaneado 3D, ampliamente validado por la comunidad científica, fue el elegido por hacer el proceso más sencillo.

El láser de escáner terrestre es uno de los escáneres 3D más conocidos, en uso desde las últimas décadas. A pesar de su gran precisión para obtener la geometría del objeto deseado, esta precisión puede verse condicionada por varios factores, como son (Soudarissanane, Lindenbergh, Menenti, & Teunissen, 2011): el mecanismo del escáner, condiciones atmosféricas y ambiente, propiedades del elemento a escanear y posición del escáner respecto del elemento.

El funcionamiento de este tipo de escáneres (esquema mostrado en la Figura 7) es el siguiente: un espejo poligonal desvía el rayo láser verticalmente mientras que la base del escáner gira horizontalmente para conseguir captar la mayor cantidad de puntos posibles desde un único estacionamiento (Molina & Tubío, 2012).

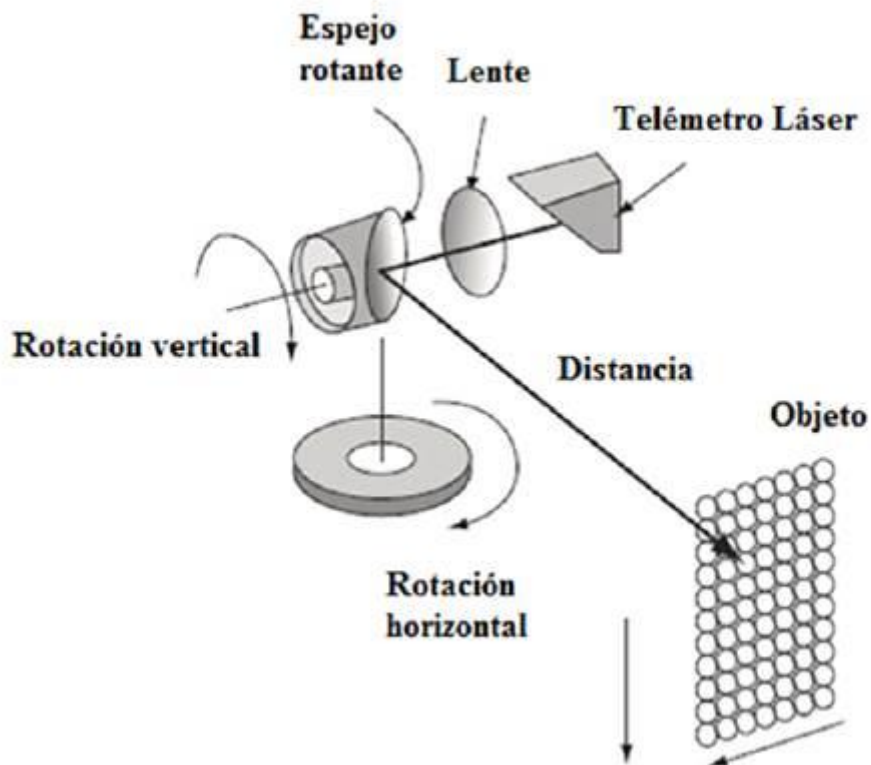


Figura 7: Esquema del funcionamiento de un escáner TLS. Fuente: (Falip & Del Cogliano, 2019)

El sistema de coordenadas que usa este tipo de escáner es el sistema de coordenadas polares (Figura 8), aunque las nubes de puntos generadas tienen coordenadas cartesianas (x,y,z).

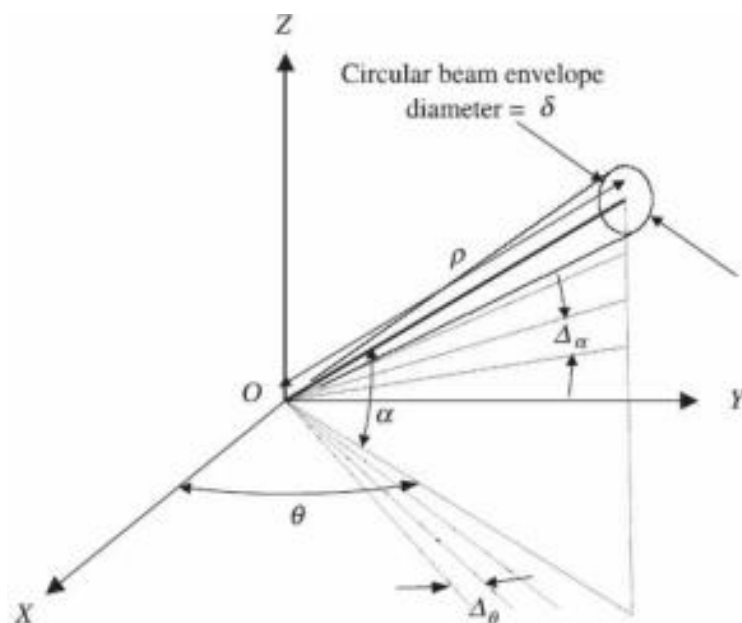


Figura 8: Coordenadas polares de un punto obtenido con TLS. Fuente: (Rodríguez Juárez, 2016)

3.2. Escaneado 3D en el patrimonio histórico

En los trabajos arqueológicos ha sido siempre imprescindible conservar documentación geométrica de los elementos estudiados. En un principio, esta documentación constaba básicamente de planos, pero con el paso del tiempo se han añadido fotografías y, como nos vamos a centrar en este trabajo, información 3D (Mettenleiter, y otros, 2003).

Esta información nos permite tener en detalle el estado del elemento arquitectónico en el momento de su escaneado y una vez que se procesan los datos tomados *in situ*, poder realizar investigaciones sobre el estado de las estructuras, los daños y el deterioro sufridos con el paso del tiempo y lo que pueden implicar en su conservación, al igual que simulaciones de envejecimiento.

Además, en caso de patrimonio cerrado al público, el escaneado 3D permite la divulgación del mismo de una forma más cercana y real, e incluso pudiendo ser interactiva sin necesidad de interferir en su conservación. También, es una forma de asegurar que futuras generaciones puedan seguir disfrutando de estos elementos arquitectónicos en caso de ser destruidos gracias a réplicas a escala o incluso con la ya tan avanzada realidad virtual (Salazar González & Ligorred Perramon, 2022).

Otras aplicaciones posibles gracias al escaneado 3D son (González Muñoz, y otros, 2010):

- Restauración virtual de elementos deteriorados
- Cálculo de secciones
- Realización de análisis de material
- Estudios de proyectos de restauración (caso del edificio de la Figura 9)

Todo esto, de una forma no intrusiva, pues como se ha explicado en el apartado anterior, no es necesario estar en contacto con el objeto. Esto también aporta una gran seguridad al personal que realiza el levantamiento gráfico.

Sin embargo, aunque su uso ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, aún no es un procedimiento que se use por defecto debido a varios problemas y desafíos (Remondino, 2011):

- Escoger la metodología más conveniente
- Desarrollar y llevar a cabo un flujo de trabajo adecuado
- Realizar el procesamiento de datos de la forma más rápida posible sin que ello conlleve la reducción de su calidad
- Ser capaz de enseñar e interactuar de forma fácil con el modelo 3D creado

Todos estos problemas, se resumen en la falta de conocimiento sobre el manejo de información 3D.

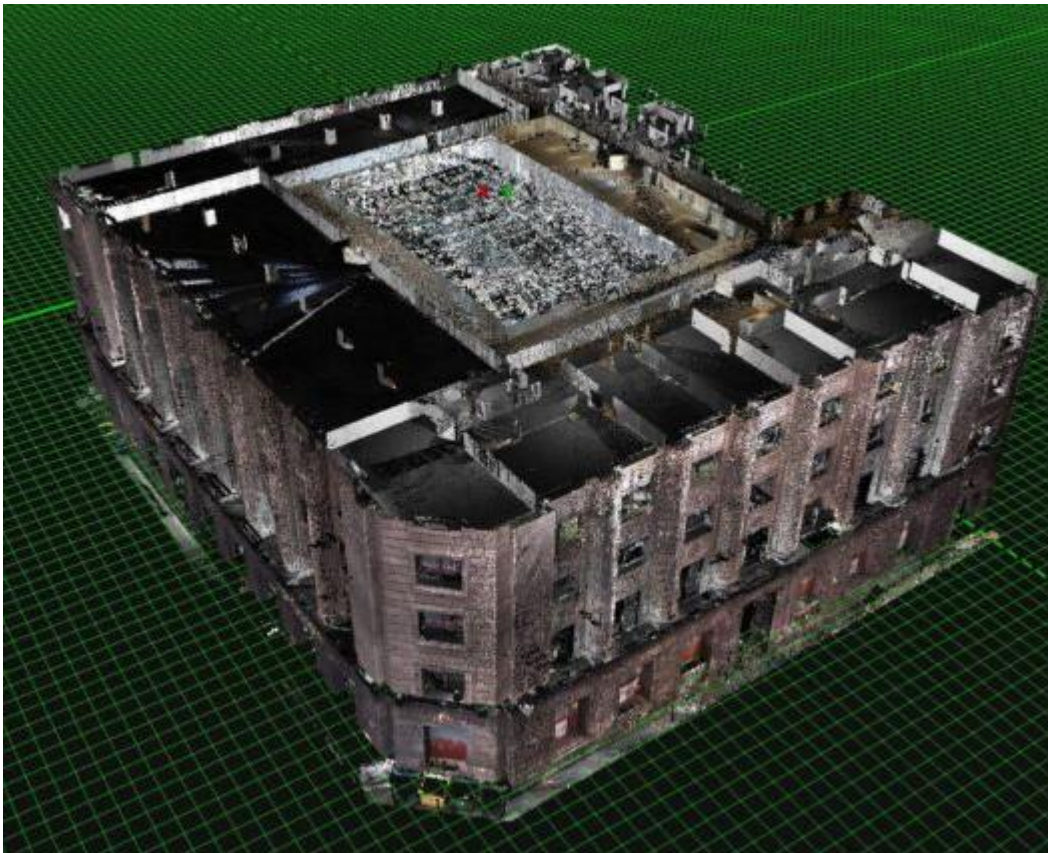


Figura 9: Modelo digital del edificio del Banco Santander en Bilbao. Fuente: (Entrenas Villegas, 2019)

4. MATERIALES Y PROGRAMAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO

4.1. Escáner BLK360 G1

El escáner usado para la obtención de la geometría del Puente de Triana es el denominado BLK360 G1 de la compañía Leica Geosystems (Figura 10). Es un escáner de tipo tiempo de vuelo con las siguientes características (Leica Geosystems, 2018):

- Captura de 360.000 puntos por segundo
- Longitud de onda de 830 nm
- Alcance de entre 0,6 a 60 metros
- Campo de visión de 360 ° en horizontal y 300 ° en vertical.



Figura 10: Escáner BLK360 G1 marca Leica. Fuente: (Leica Geosystems, 2018)

Para poder obtener mediciones fiables se usó un trípode que permitía el posicionamiento del escáner en varias alturas.

4.2. Cyclone Field 360

Cyclone Field 360 es una aplicación para dispositivos móviles a través de la cual se realiza el escaneado. En ella se pueden comprobar las nubes de puntos *in situ* desde la *tablet* con la que se realice la operación. Permite nombrar cada estacionamiento (punto desde el que se escanea) para facilitar el posterior procesamiento de los datos. En la Figura 11 se encuentra su interfaz de usuario.

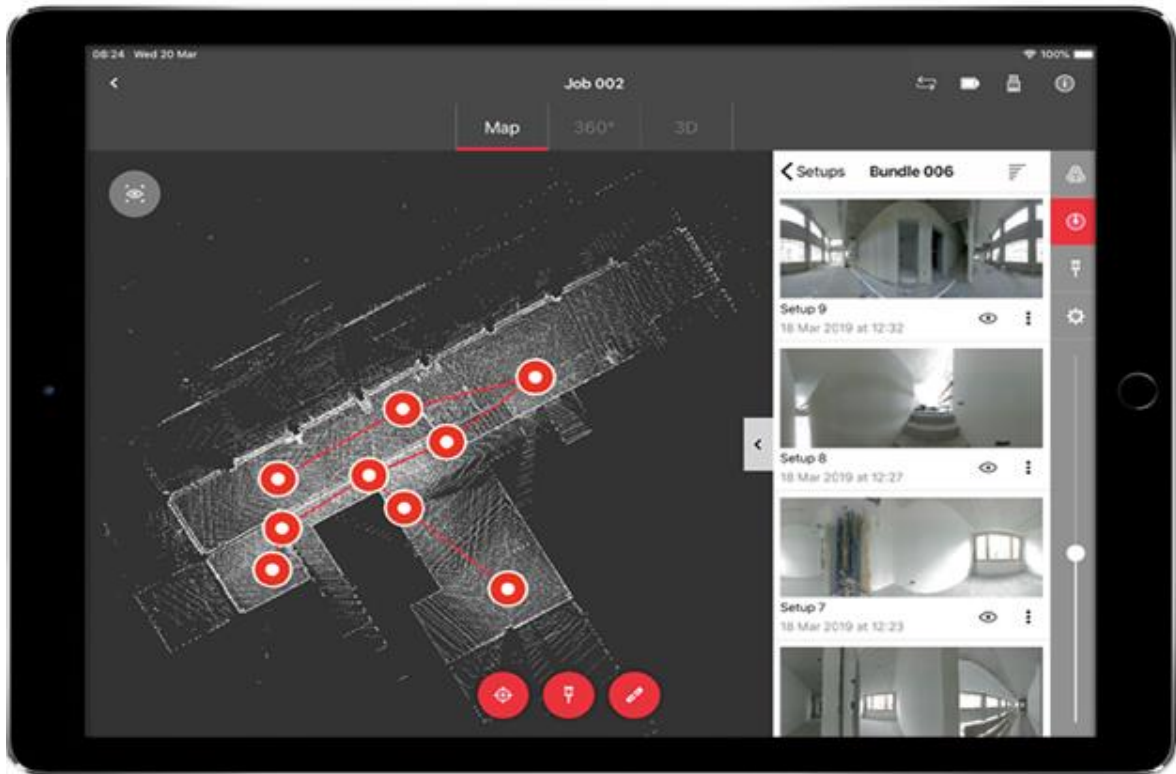


Figura 11: Interfaz aplicación Cyclone Field 360. Fuente: (Leica Geosystems, 2018)

4.3. Cyclone Register 360

Cyclone Register 360, también de la marca Leica, es el software utilizado para trabajar las nubes de puntos escaneadas con el BLK360 G1. Este *software* permite unir los diferentes estacionamientos escaneados para obtener el conjunto de puntos en la posición real respecto a un punto de referencia. Su interfaz se encuentra representada en la Figura 12.

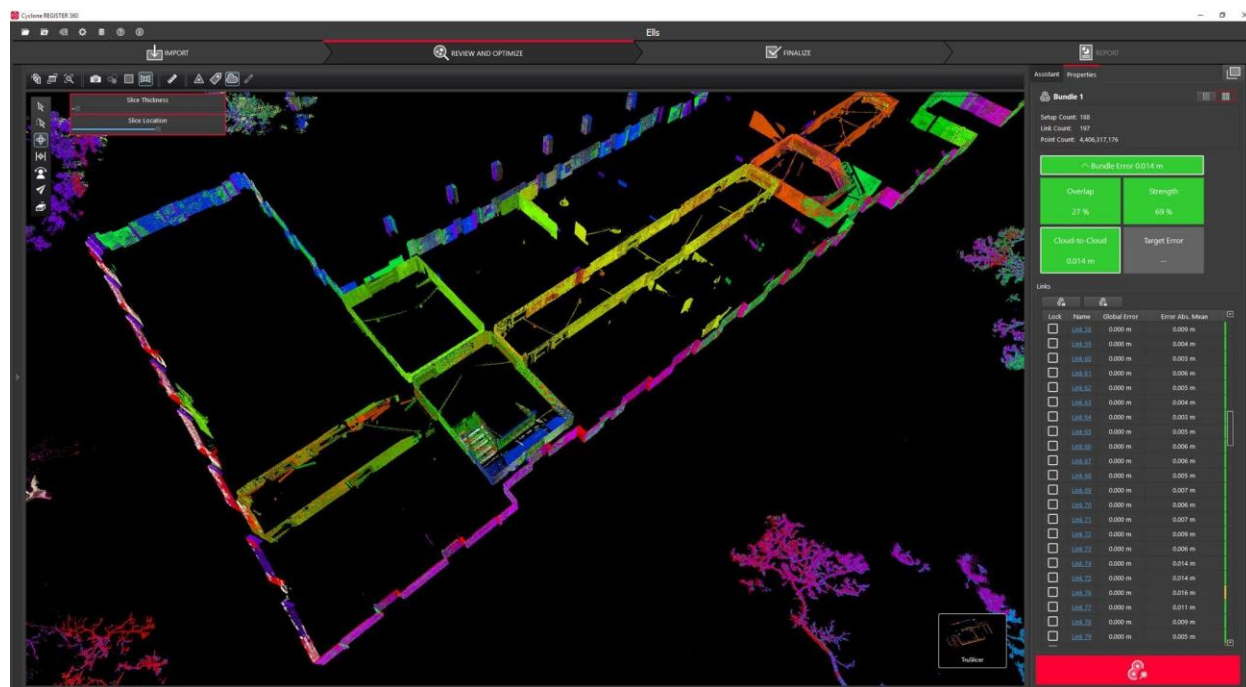


Figura 12: Interfaz Cyclone Register 360. Fuente (Leica Geosystems, 2018)

4.4. CloudCompare

CloudCompare es el *software* de código abierto en el que se ha realizado el procesamiento de las nubes de puntos tras pasar por Cyclone Register 360.

Con él es posible editar las nubes de puntos, como segmentarlas (recortarlas) y limpiar los ruidos obtenidos durante la obtención de la información. Además, se pueden comparar diferentes nubes de puntos y cuantificar las desviaciones entre ellas.

Fue creado en 2003 como resultado de la tesis doctoral de Daniel Girardeau-Montaut (Girardeau-Montaut, 2006) y es un *software* gratuito. Ha sido descargado de su web oficial *CloudCompare – Open source Project* (<https://www.danielgm.net/cc/>) y su interfaz se encuentra representada en la Figura 13.

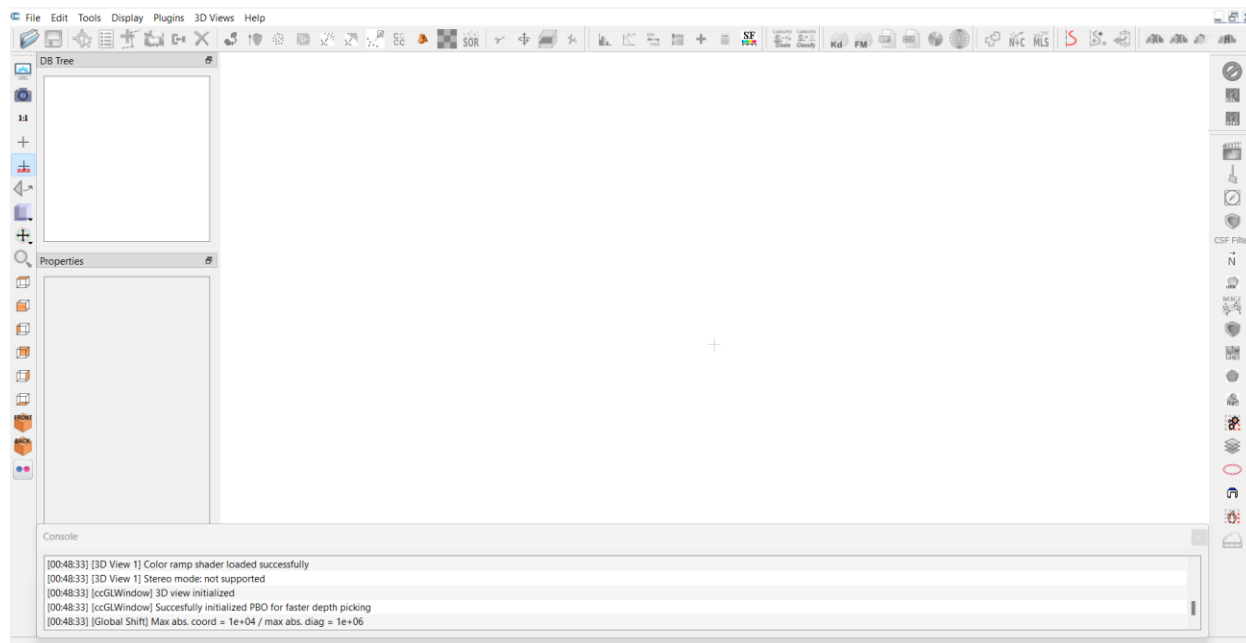


Figura 13: Interfaz CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

4.5. Rhinoceros 7

Rhinoceros 7, comúnmente denominado Rhino, es un modelador 3D usado en diversidad de industrias como arquitectura, ingeniería, fabricación, construcción, joyería, diseño paisajístico e incluso educación (Rhino3D, 2020). En este caso ha sido usado para crear nubes de puntos en los lugares a los que el escáner no pudo llegar de forma correcta, dejando huecos que podían entorpecer el proceso. La ausencia de datos (puntos) en estas áreas sucede por oclusiones en el escaneado 3D, es decir, cuando existe un obstáculo entre el escáner y la superficie cuya geometría ha de capturarse, o debido a la propia fisionomía del objeto a estudiar, cuya complejidad puede implicar que unas partes arrojen “sombras” sobre otras, que actúen como dicho obstáculo para el láser.

Este *software* no es gratuito, pero se ha usado una licencia de prueba de 90 días descargada en <https://www.rhino3d.com/download/rhino-for-windows/evaluation/> y su interfaz se encuentra en la Figura 14

Además, en la página web oficial Rhinoceros (<https://www.rhino3d.com/>) se pueden encontrar noticias y cursos de formación sobre el programa.

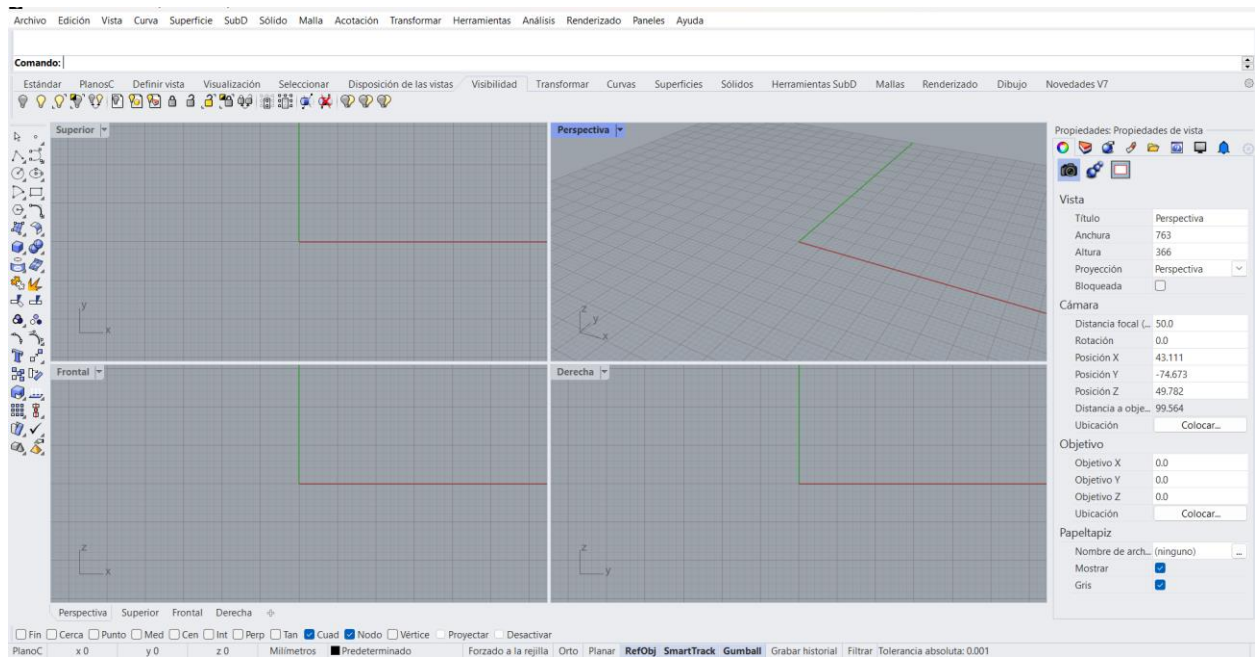


Figura 14: Interfaz de Rhino. Fuente: elaboración propia en Rhino

5. PROCESO

5.1. Escaneado 3D

Previo paso a realizar el escaneado, es necesario planificarlo. Esta planificación comienza por la elección del equipo, en este caso el ya descrito anteriormente escáner BLK360 G1. A continuación, se planifican los distintos puntos que se van a escanear y dónde posicionar el escáner.

En este caso se decidieron hacer diecinueve estacionamientos diferentes distribuidos homogéneamente por el alzado y planta del puente y divididos en dos alturas diferentes para poder obtener la información geométrica completa (o lo más completa posible) del puente. En la Figura 17 se puede observar el emplazamiento elegido para los diecinueve estacionamientos, siendo a partir del número quince a una altura aproximada de 4 metros mediante el uso de un trípode más robusto, con pértiga como se observa en la Figura 15.

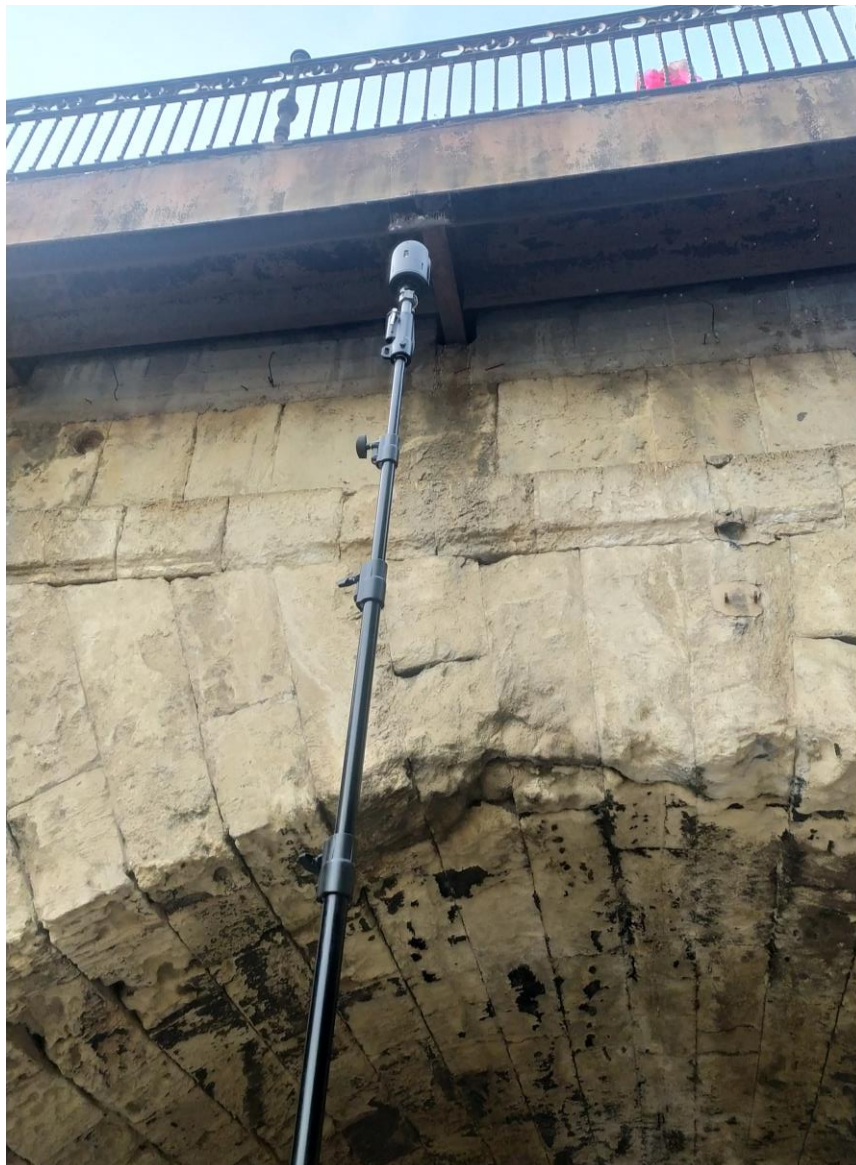


Figura 15: Escáner en el trípode con pértiga a alrededor de 4 m de altura. Fuente: elaboración propia.

El proceso comienza encendiendo el escáner y sincronizándolo con el iPad a través de WiFi con la aplicación Cyclone Field 360. Seguidamente, se configura la resolución del escaneado y la captura de fotografías HDR (alto rango dinámico); en este caso, se seleccionó la resolución media y sin HDR. El escaneado, realizado estacionamiento a estacionamiento, implicó posicionar el escáner en los diferentes puntos elegidos, de acuerdo a la estabilidad del mismo y la máxima visibilidad de la superficie del puente, obteniendo así diecinueve archivos diferentes con las nubes de puntos de cada posición.

En la Figura 16 se encuentran fotografiados dos de los diecinueve estacionamientos seleccionados.



Figura 16: Escáner en estacionamientos E12 y E2. Fuente: elaboración propia con cámara fotográfica

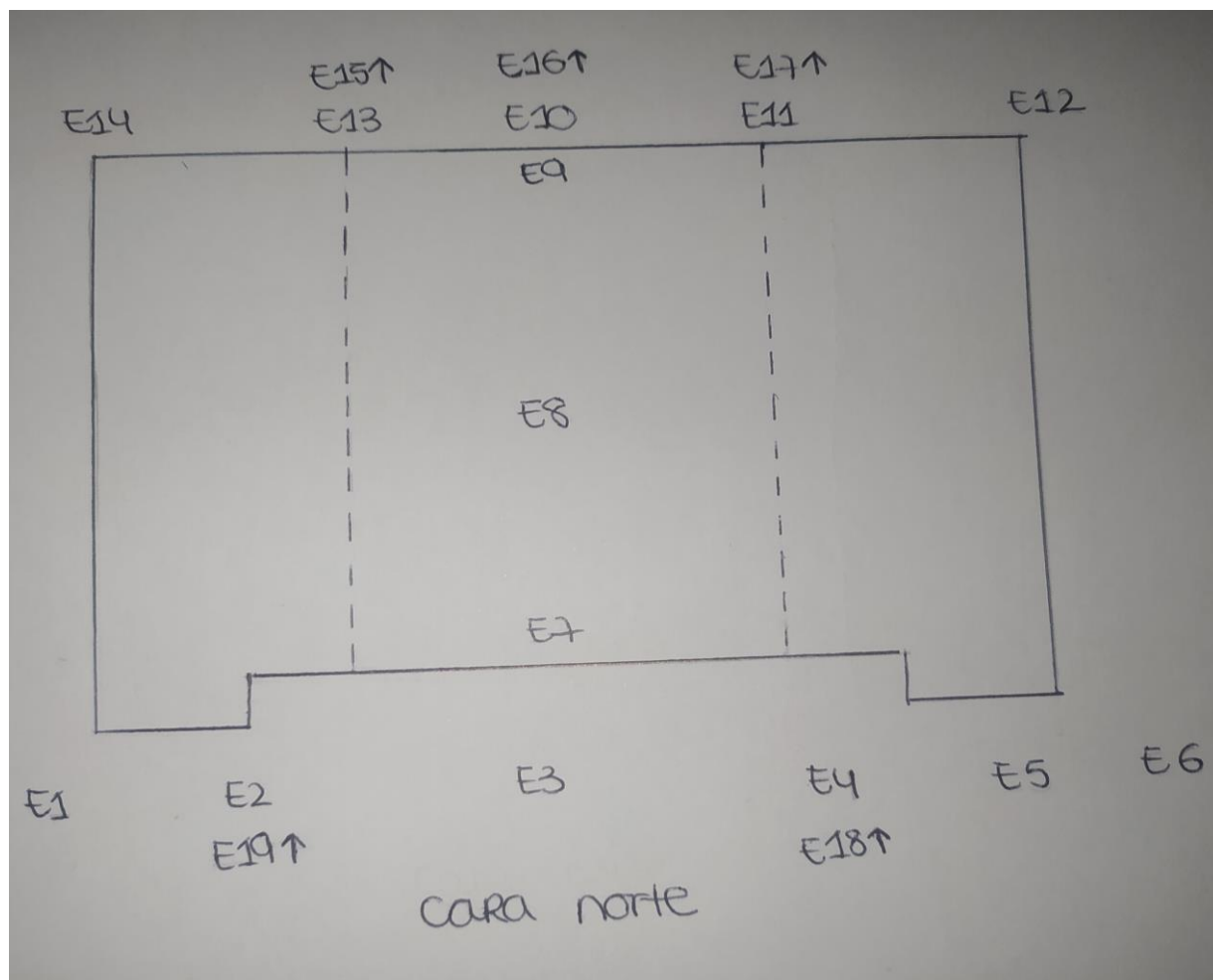


Figura 17: Croquis de la planta del puente con las posiciones de los estacionamientos. Fuente: elaboración propia

5.2. Procesamiento de datos: nubes de puntos

Una vez completados todos los estacionamientos y comprobado su correcto escaneado con la aplicación Cyclone Field 360, se pasó a su procesamiento. Para ello se importaron en el *software* Cyclone Register 360 creando un nuevo proyecto.

En primer lugar, se realizó el registro (alineación en el mismo sistema de coordenadas) de los escaneos (nubes de puntos) de forma manual, uniendo los diferentes estacionamientos por solape y orientándolos de la misma forma basándonos en los croquis realizados previos al escaneado. Para finalizar de una forma más precisa, se realizó una última alineación de todos los estacionamientos de forma automática. Por último, se procedió a optimizar el conjunto (Figura 18), obteniendo un error conjunto de 7 mm.

En el anexo I se puede encontrar el informe obtenido tras realizar estas operaciones, donde se garantiza la precisión de la nube de puntos resultante.

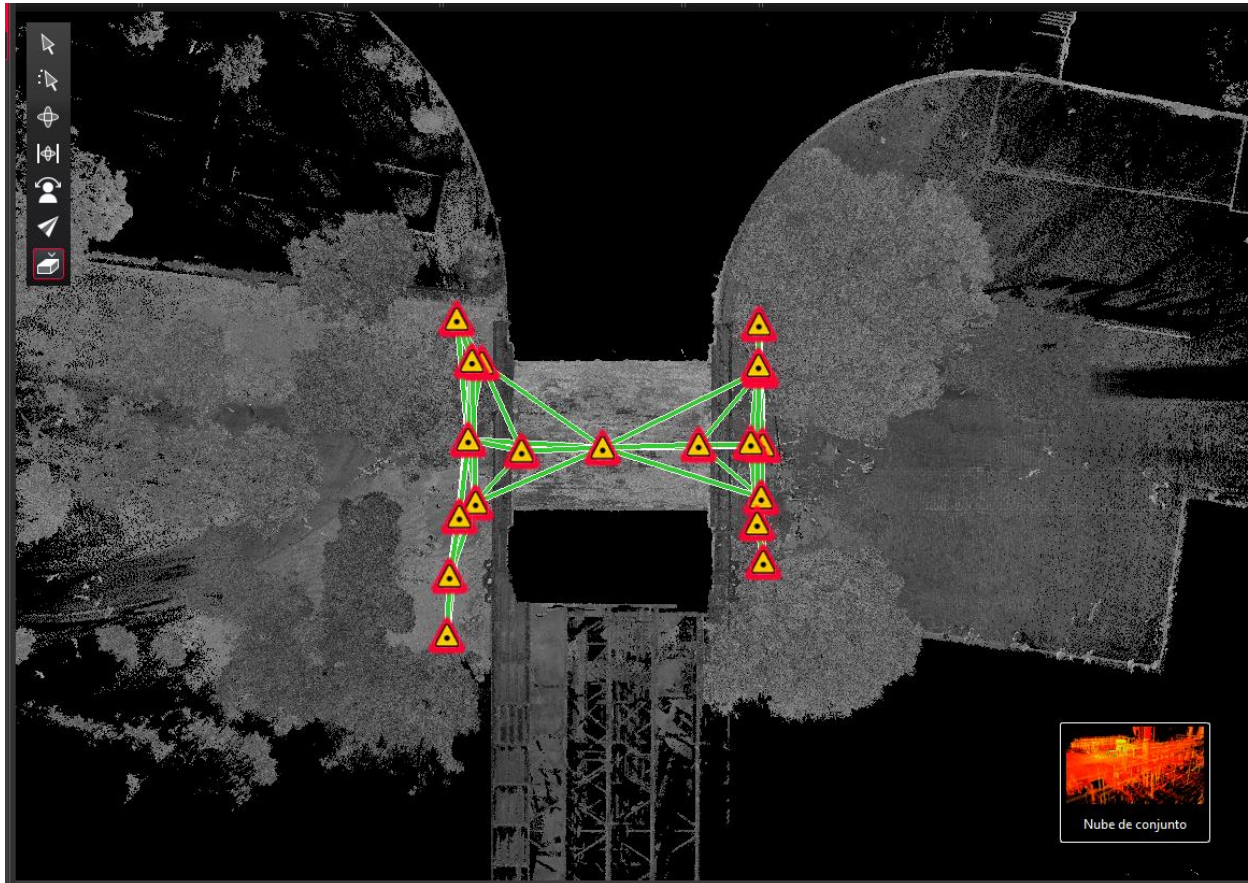


Figura 18: Conjunto de estacionamientos unido y optimizado. Fuente: elaboración propia en Cyclone Register 360

La nube de puntos orientada se exportó en formato .e57 para su tratamiento en el *software* CloudCompare.

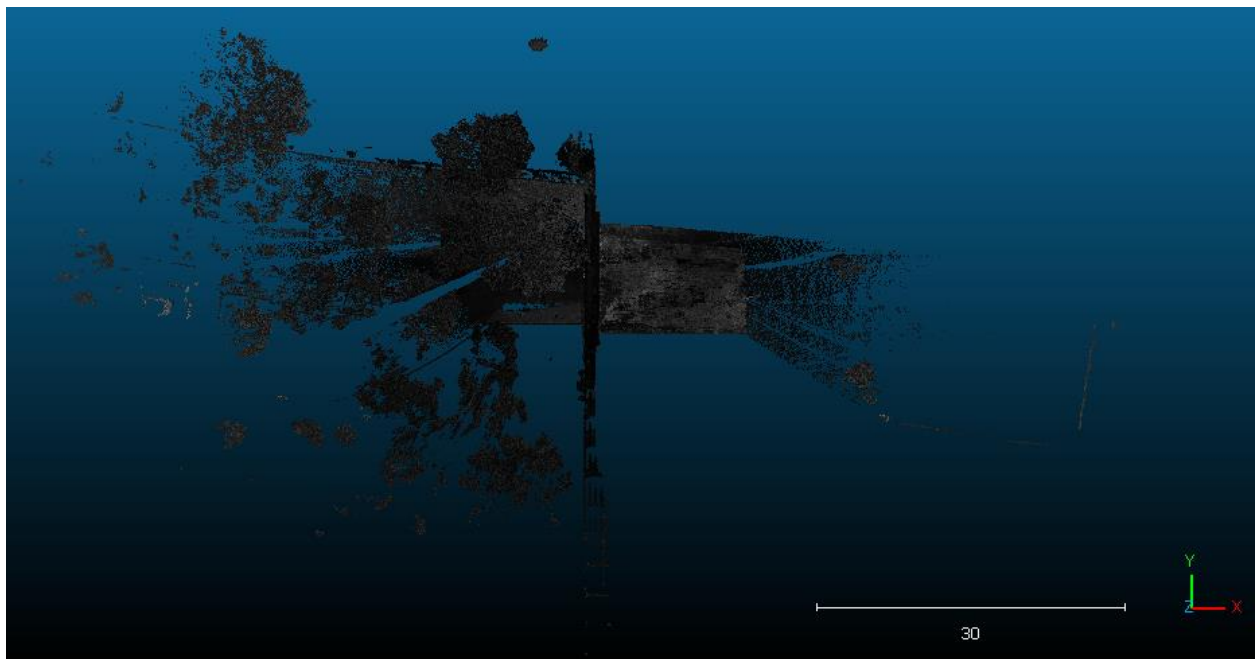


Figura 19: Planta del estacionamiento 2 en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

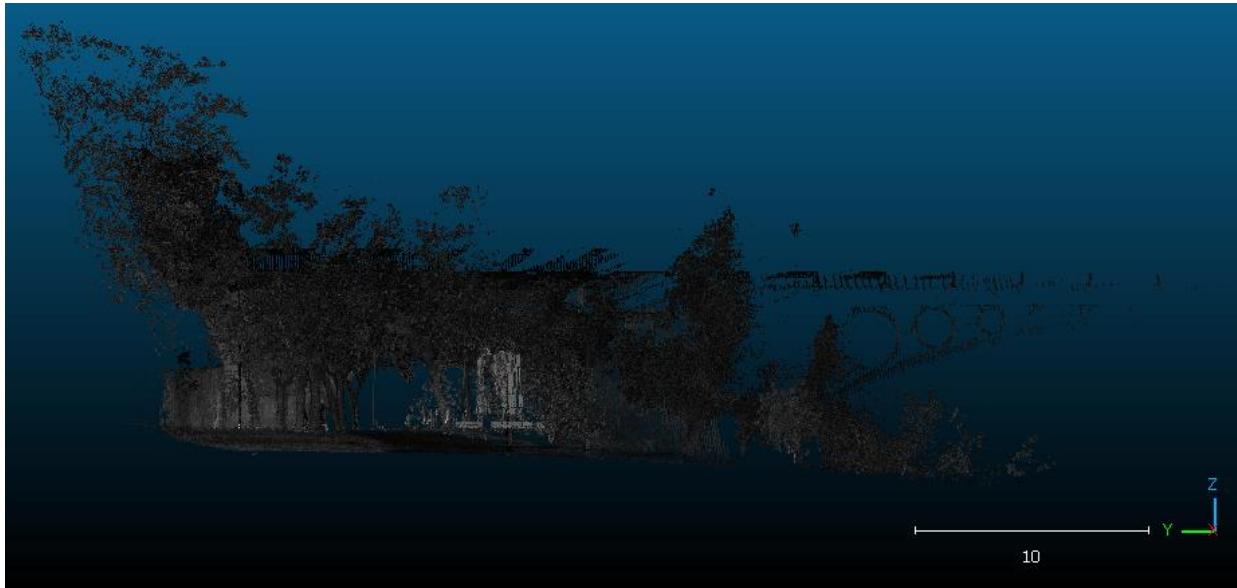


Figura 20: Estacionamiento 2 sin recortar. Fuente: Elaboración propia en CloudCompare

Con todas las nubes importadas, se procede a recortar una a una, para ello es necesario deseleccionarlas todas e ir seleccionando el estacionamiento en el que en cada momento se va a trabajar e ir eliminando las partes recortadas que no son de utilidad, como árboles, suelo y viandantes, entre otros, hasta conseguir que todas las nubes de puntos estén limpias.

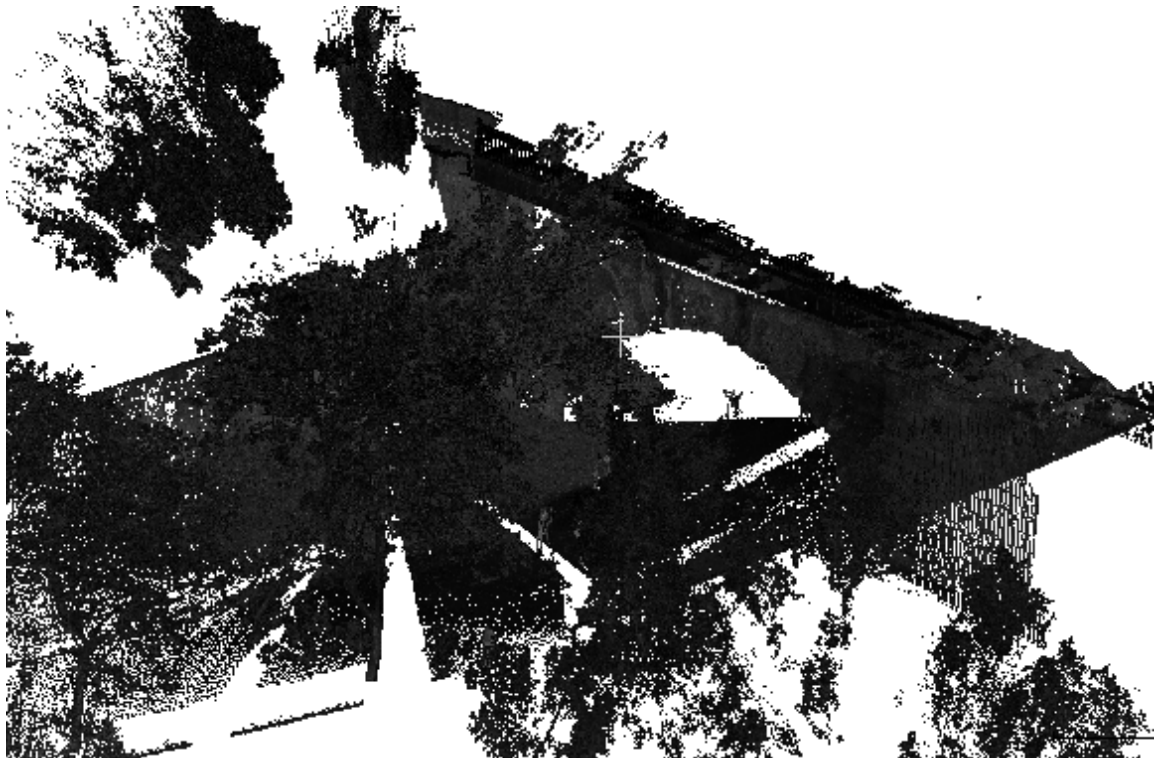


Figura 21: Estacionamiento 1 sin recortar. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Como se puede observar en la Figura 19, la Figura 20 y en la Figura 21 hay gran cantidad de oclusiones e información innecesaria en los escaneados.

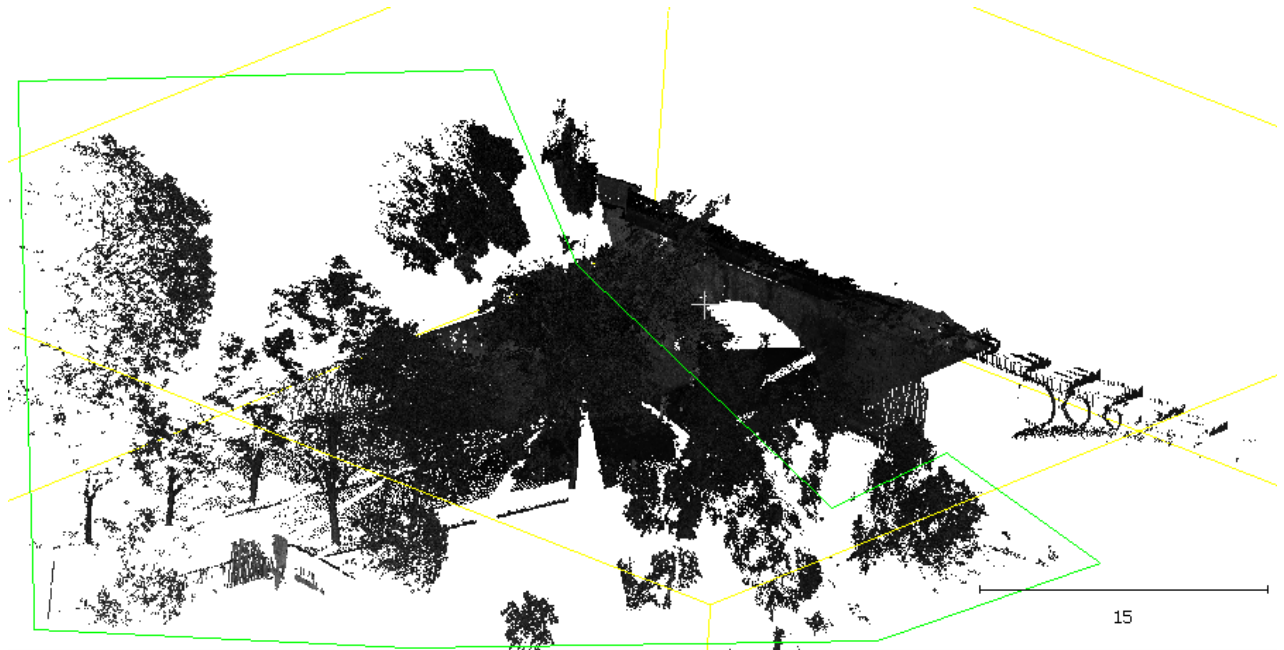


Figura 22: Polígono de segmentación en el Estacionamiento 1. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Para recortar se usa el comando ‘Segment’ con el que se rodea con un polígono verde la zona a cortar como se observa en la Figura 22 y ‘Segment In’ o ‘Segment Out’ para ir separando las partes que se quedan dentro del recorte o las de fuera (Figura 23).

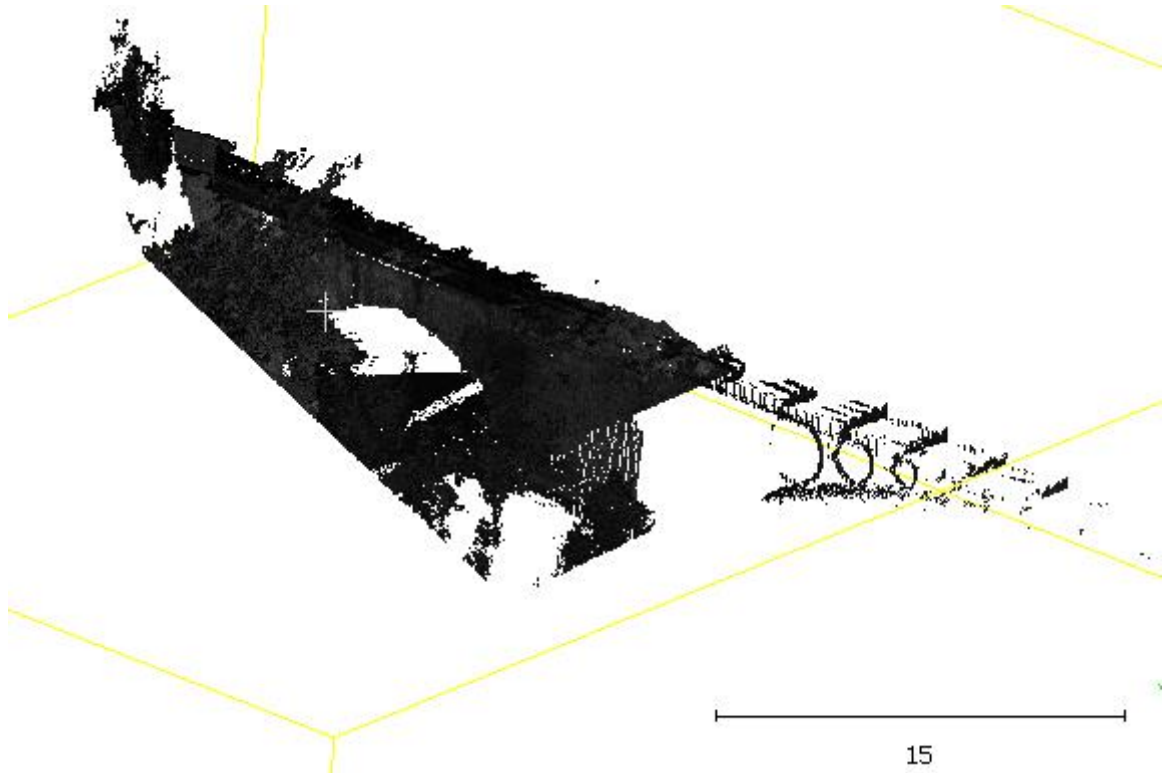


Figura 23: Estacionamiento 1 tras hacer ‘Segment Out’ del polígono de la Figura 22. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Como se ha dicho anteriormente, este proceso se repite hasta que cada estacionamiento queda totalmente limpio como en la Figura 24

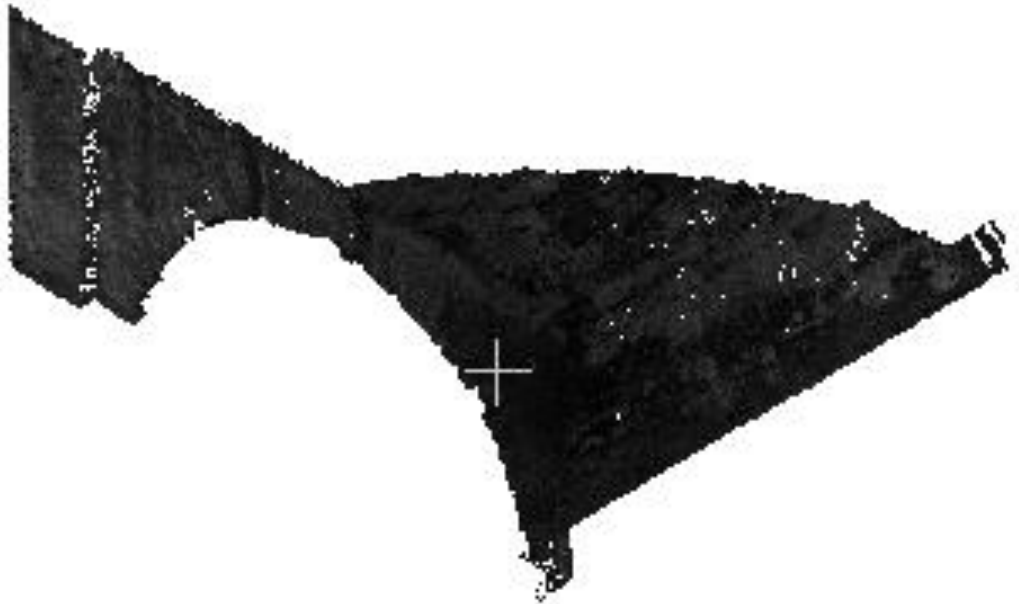


Figura 24: Nube de puntos del estacionamiento 1 recortada. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Una vez que todos los estacionamientos están limpios, se unen todas las nubes con el comando 'Merge multiple clouds' para obtener una única nube de puntos con la que se trabajará de aquí en adelante.

No solo se recortó el arco de piedra, sino que también se aprovecharon las nubes de puntos obtenidas de la parte metálica del puente, así como de la barandilla y tablero y se guardaron en archivos separados para su posterior uso en su modelado 3D con Rhino.

Cada parte del puente se ha procesado de una forma diferente, por lo que se procede a explicar cada una de ellas de manera separada.

5.2.1. Estribo

En CloudCompare se recortó por separado la parte del arco mariner (Figura 25) y el extremo del estribo (Figura 26).



Figura 25: Nube de puntos del arco marineru recortada. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

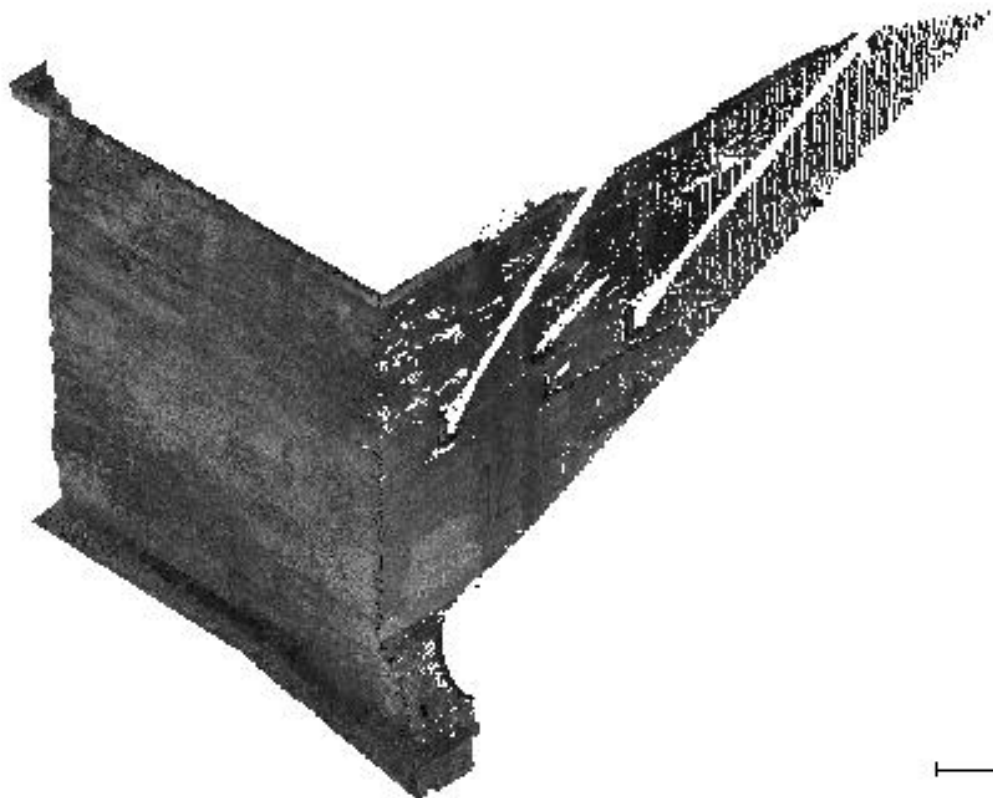


Figura 26: Nube de puntos recortada del extremo del estribo. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Como se comentó anteriormente, algunas zonas de la nube de puntos no habían sido escaneadas correctamente debido a oclusiones ocasionadas por objetos existentes en el emplazamiento, como árboles o arbustos que tapaban parte del puente. Es por eso por lo que fue necesario crear manualmente parches de nubes de puntos para reconstruir esas oclusiones (Figura 27) y que la nube estuviera completa. Para esto se usó el software Rhino 7.



Figura 27: Oclusiones en el estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino

En él se importó la nube de puntos y se comenzó a crear superficies en los lugares incompletos como se puede observar en amarillo en la Figura 28. Tras crear las superficies, estas se reconstruyeron con el comando 'Reconstruir' para poder así extraer los puntos de su estructura con el comando 'Extraer Puntos' y con ellos formar las nubes de puntos que completaban la ya escaneada con el comando 'Nube de Puntos'.

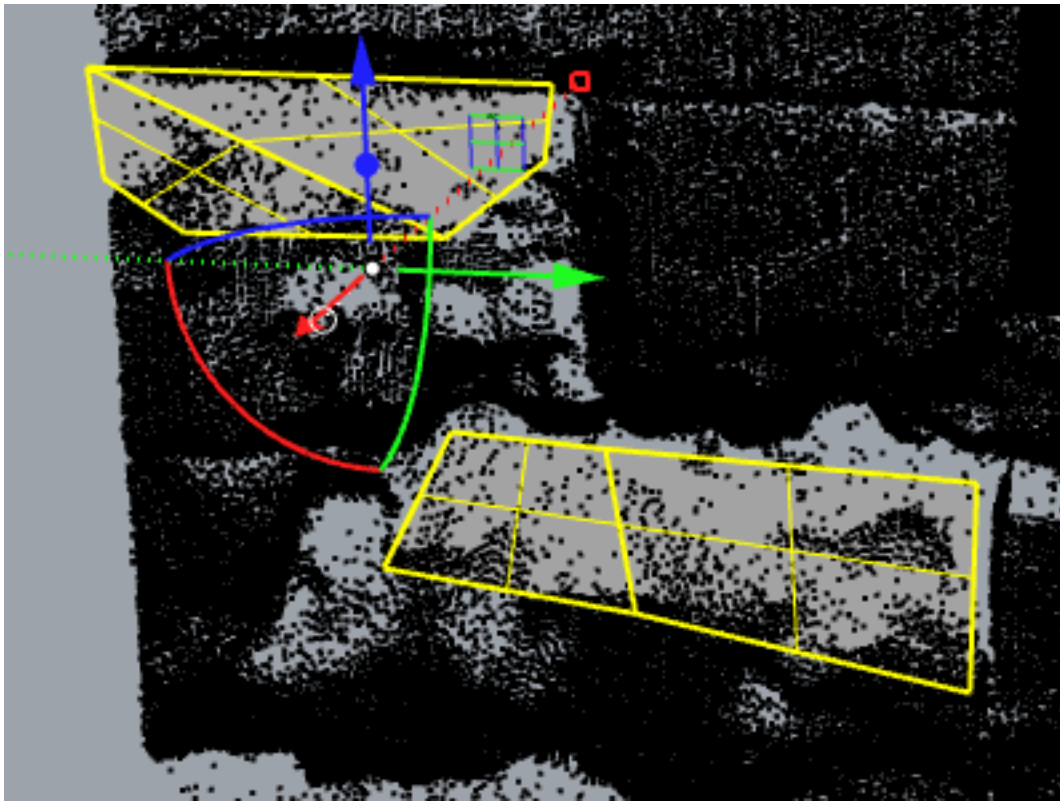


Figura 28: Superficies creadas para tapar los huecos. Fuente: elaboración propia en Rhino

No solo se reconstruyeron los huecos en la nube de puntos, sino que se crearon superficies tanto en los laterales como en el techo y el suelo para dejar el arco como una caja estanca y así poder obtener más adelante una malla hermética.

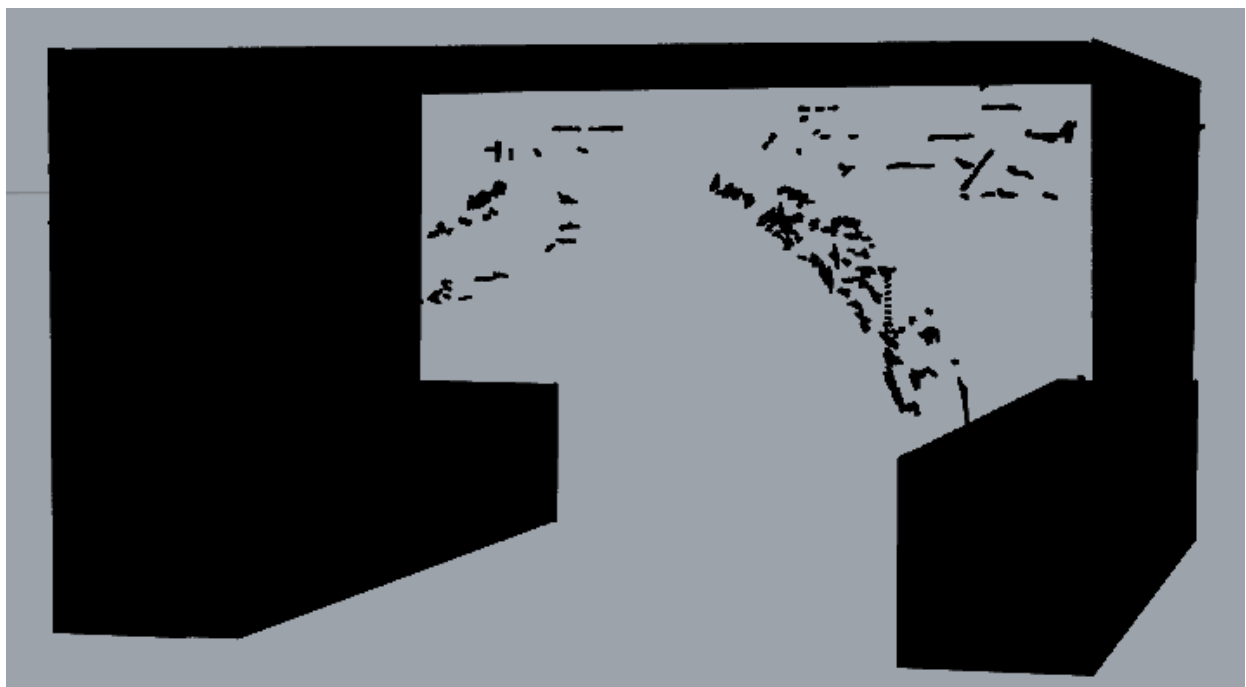


Figura 29: Parches y cimientos creados para el estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino

Además, se realizó una hipótesis en cuanto a la cimentación puesto que no se encontró información de la real y se crearon en Rhino otros parches por debajo de esta estructura para crearla (Figura 29). Esta cimentación es de 2,75 m de profundidad.

De igual forma se procedió para el extremo del estribo, aunque en este caso se tuvo que reconstruir una parte curva donde más tarde se embebería la parte de hierro del puente. También se crearon superficies para hacer del elemento una caja estanca (Figura 30), y se crearon algunos parches y la cimentación.

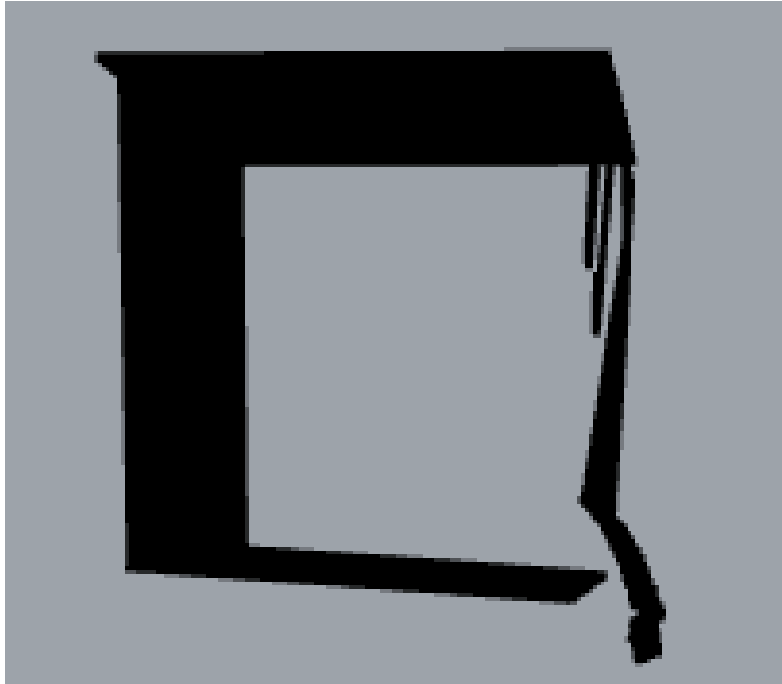


Figura 30: Superficies creadas en Rhino para el extremo del estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino

Una vez que se tienen las nubes de puntos completas, se seleccionan y se exportan en formato Puntos (.txt), teniendo así las coordenadas de todos los puntos que forman esa nube y este fichero se vuelve a importar a CloudCompare para mallar la nube (Figura 31).

1	2	3
X coord. X	Y coord. Y	Z coord. Z
543.1470993975433	418.3422888795262	-1.033631340551708
543.1470655310437	418.3520670416664	-1.033631340551708
543.1469977980462	418.3716233659479	-1.033631340551708
543.1468961985486	418.4009578523692	-1.033631340551708
543.1467945990512	418.4302923387907	-1.033631340551709
543.1466929995539	418.4596268252122	-1.033631340551708
543.1465914000562	418.4889613116338	-1.033631340551708
543.146489800559	418.5182957980554	-1.033631340551708
543.1463882010613	418.5476302844768	-1.033631340551709
543.1462866015643	418.5769647708986	-1.033631340551708
543.1461850020667	418.60629925732	-1.033631340551708
543.1460834025694	418.6356337437414	-1.033631340551709
543.1459818030719	418.6649682301629	-1.033631340551708

Separator (ASCII code: 44)

Skip lines extract scalar field names from first line

Figura 31: Listado de coordenadas de puntos de la nube del arco. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Para poder mallar la nube, es necesario obtener los vectores normales de cada punto de la nube en su superficie con el comando ‘Compute Normals’. Para poder obtener una malla correcta, es necesario que las normales estén dirigidas hacia afuera del objeto; si ese no es el caso será necesario invertir las con ‘Normals-Invert’.

Tras obtener las normales se genera la malla triangulada con el algoritmo de discretización geométrica ‘Poisson Surface Reconstruction’ usando unas condiciones de contorno de tipo Dirichlet. Respecto al ajuste de la malla a los puntos, el parámetro *Ocree Depth* determina la profundidad del árbol octal que se utiliza para subdividir una región de la nube en octantes más pequeños y lo que indica es el ajuste de la malla a la nube, a menor valor, menor ajuste y por lo tanto se obtiene una maya más suave y sencilla. A mayor valor, mayor ajuste, pero también existe mayor ruido, formando una malla más compleja (Kazhdan, Bolitho, & Hoppe, 2006). Este parámetro puede configurarse a distintos niveles. Según se indica arriba, valores inferiores a 8 y superiores a 10 no produjeron resultados correctos, lo cual hace necesario analizar cuantitativamente la exactitud de las mallas generadas según los valores 8, 9 y 10 frente a la nube de puntos original (Tabla 1).

Octree Depth	Vértices	Nº triángulos	Superficie triángulos (m ²)	Superficie total (m ²)	Volumen (m ³)	Desviación Estándar	Distancia Promedio
8	242.869	485.738	0,00224677	1091,34	1205,91	0,0122612	-0,000407988
9	298.450	596.896	0,00182224	1087,69	1206,14	0,0135782	-0,000453036
10	4.045.542	8.090.580	0,000139827	1131,28	1201,59	0,00452849	-0,000130688

Tabla 1: Análisis cuantitativo de la exactitud de la malla del arco

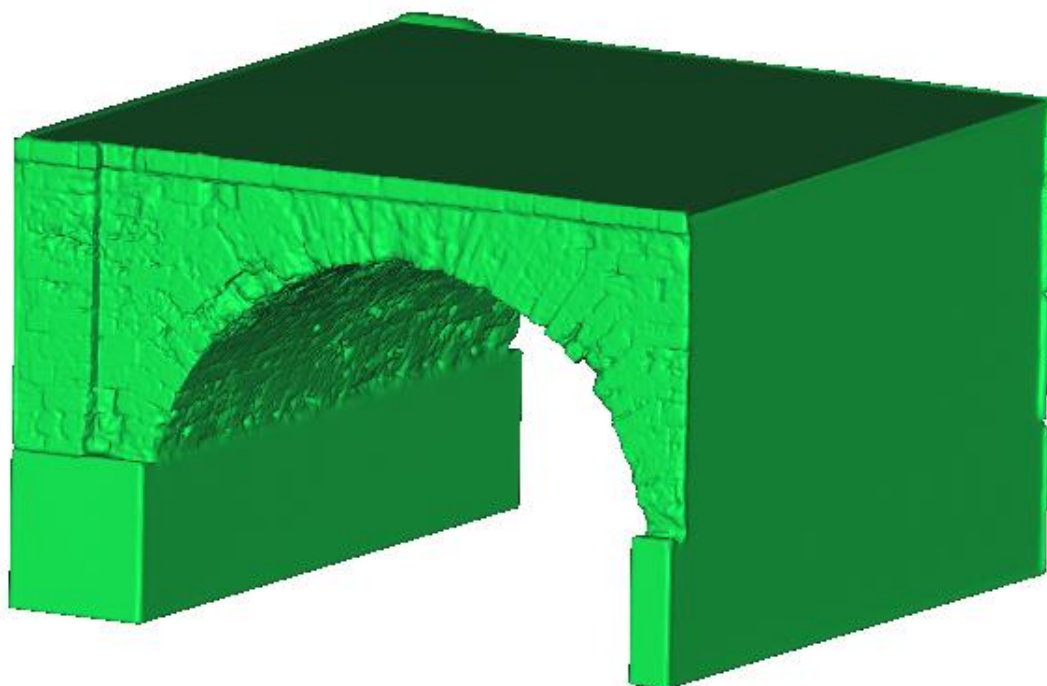


Figura 32: Arco mariner malla. Octree Depth 9. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

En cuanto al extremo del estribo, se realizó el mismo análisis.

Octree Depth	Vértices	Nº triángulos	Superficie triángulos (m ²)	Superficie total (m ²)	Volumen (m ³)	Desviación Estándar	Distancia Promedio
8	159.906	319.808	0,00124887	399,4	433,669	0,00646943	-0,000137306
9	636.781	1.273.550	0,000316119	402,593	433,095	0,00401948	-0,000134121
10	2.499.344	4.998.604	8,14693e-05	407,233	432,962	0,00282553	-6,21892e-05

Tabla 2: Análisis cuantitativo de la exactitud de la malla del extremo del estribo

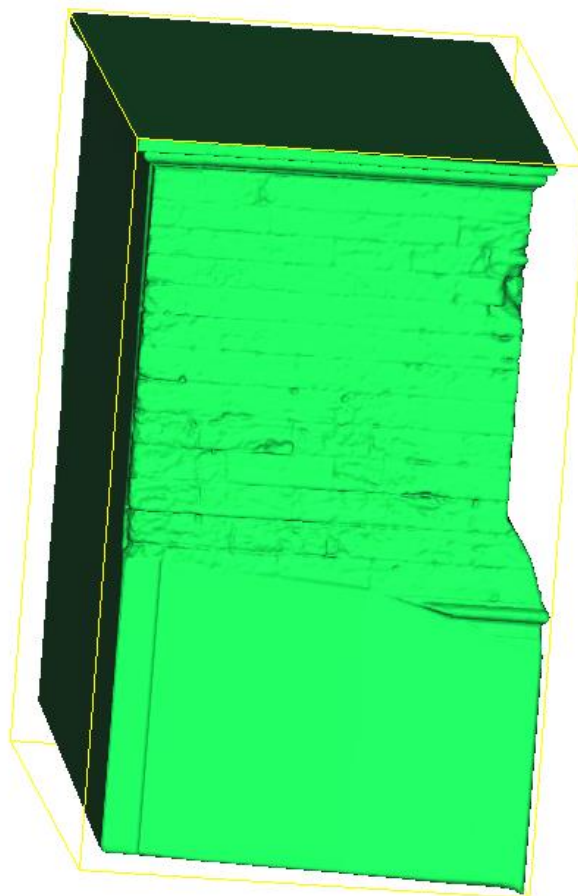


Figura 33: Extremo con cemento mallado en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Como se puede observar, tanto para el arco como para el extremo, la desviación estándar es mucho menor en el caso de la malla con *octree Depth 10*, sin embargo, el número de vértices crece también considerablemente, siendo muy difícil de manejar debido al peso del archivo. Por este motivo, la malla elegida es la *octree Depth 9* y están representadas en la Figura 32 y la Figura 33.

5.3. Modelado de la parte de hierro

En la parte de hierro del puente, aunque se usó como base la nube de puntos (Figura 34), esta estaba demasiado incompleta como para parchearla en su totalidad de la misma forma que se hizo con la parte de piedra, por lo que se usó para modelar sólidos con formas prácticamente iguales a la real. Para ello se usó de nuevo el programa Rhino creando superficies a partir de curvas planas trazadas sobre la nube de puntos, para posteriormente extruirlas como sólidos cerrados (polisuperficies cerradas).

5.3.1. Arcos de hierro

En el caso de los arcos de hierro, se creó la superficie por trozos, cada círculo por separado y también por otra parte el arco inferior para posteriormente unirlos con el comando 'Empalmar superficies'. Una vez que se obtuvo una única superficie se usó el comando 'Extrusión de Superficies' para conseguir el sólido. Este

elemento se encuentra cinco veces, por lo que se copió otras cuatro más para tener todo el conjunto de arcos como se puede observar en la Figura 35.



Figura 34: Nube de puntos escaneada de la parte de hierro. Fuente: elaboración propia en Rhino

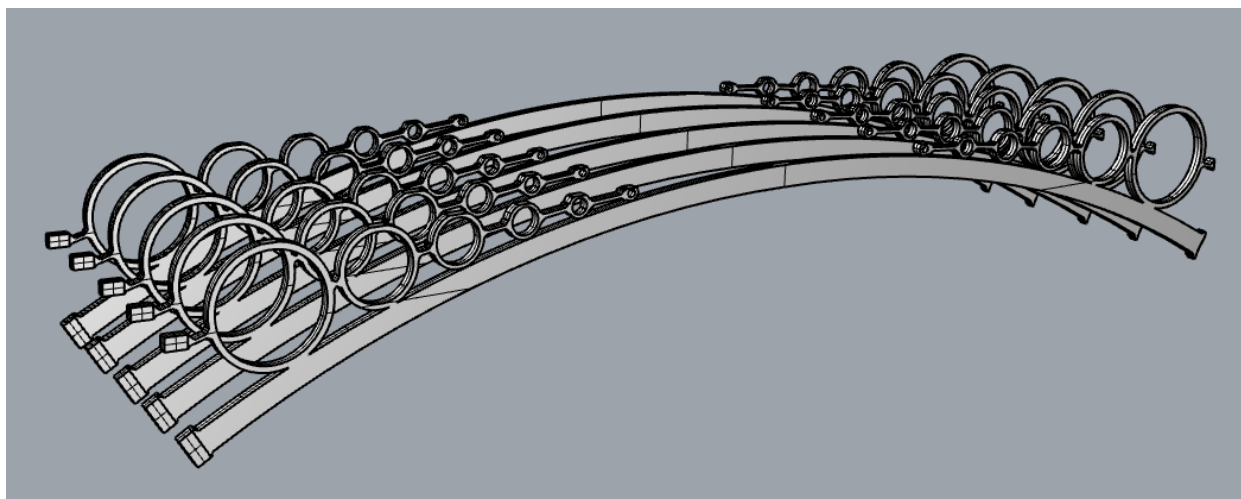


Figura 35: Modelado arcos de hierro. Fuente: elaboración propia en Rhino

Según se pudo observar en el puente real, la sección de los arcos inferiores tiene una forma elíptica, sin embargo, se decidió simplificarla y modelarse ajustándola como una sección rectangular.

5.3.2. Estructura tablero

En cuanto a la estructura del tablero, en la nube de puntos escaneada se pudo observar que la base era un panel rigidizado en zigzag. Además, según se especifica en el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico el tablero está formado por dos vigas cajón de 2,05 m de canto, como las mostradas en la Figura 36 y Figura 37.

Para crear el panel se dibujó una curva con la forma de zigzag y posteriormente se extruyó la curva con el comando 'Extrusión de Curvas' para luego darle espesor con 'Gumball de espesor'.

Para las vigas cajón, se creó una superficie cuadrada de lado 2,05 m y se extruyó con el comando 'Extrusión de superficie', creando un sólido cerrado que a continuación se vació con el comando 'Vaciar'.

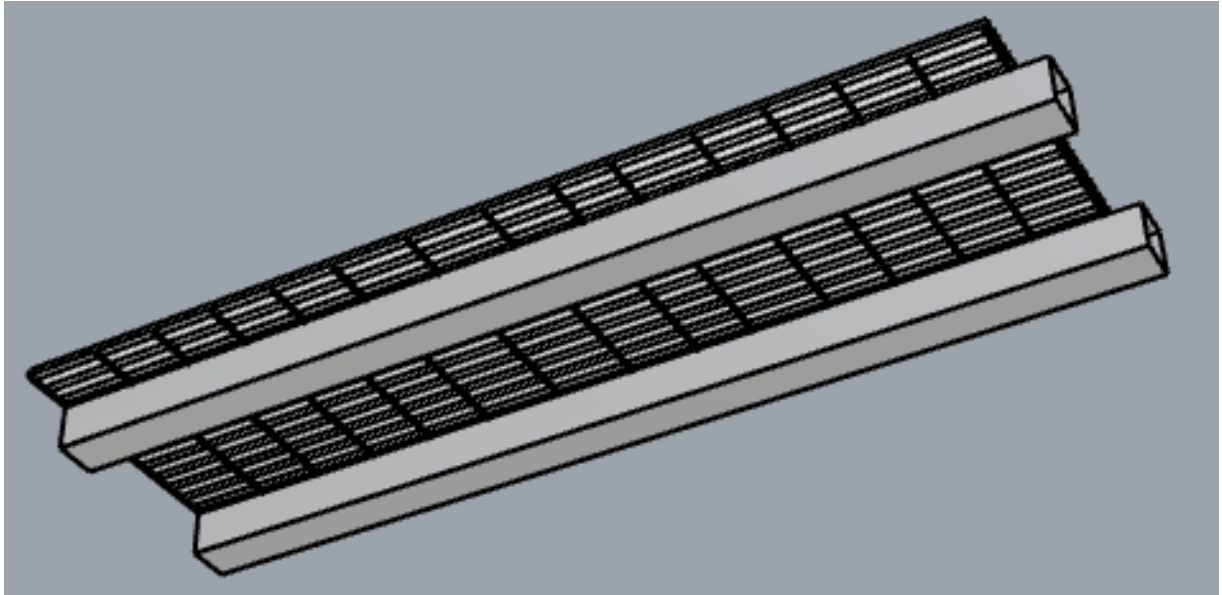


Figura 36: Parte inferior del tablero. Fuente: elaboración propia en Rhino

Además, la estructura del tablero cuenta con unos arriostramientos en la parte inferior que también se crearon extruyendo superficies.

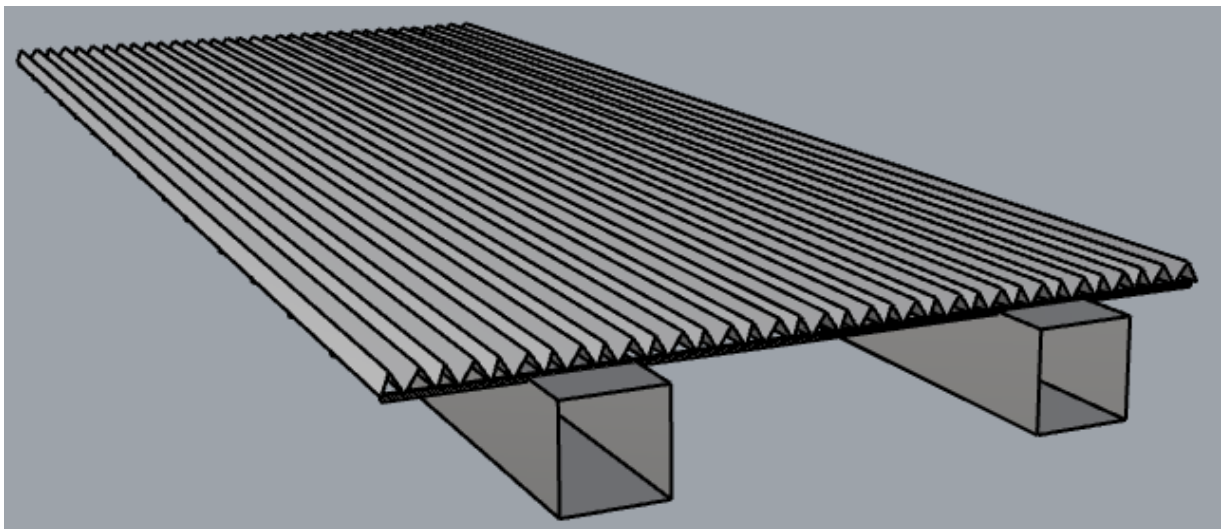


Figura 37: Panel zigzag portante del tablero y vigas cajón. Fuente: elaboración propia en Rhino

5.3.3. Barandilla

Otra parte importante del puente que, aunque no tiene función estructural sí que aporta peso a la estructura es la barandilla. En este caso se ha creado de nuevo extruyendo superficies para todas las formas rectangulares y con el comando 'Crear agujero' para los cilindros huecos del pasamanos.

Se ha realizado de una forma simplificada y no exactamente como la real debido a su complejidad a la hora de ser modelada como se observa en la Figura 38.

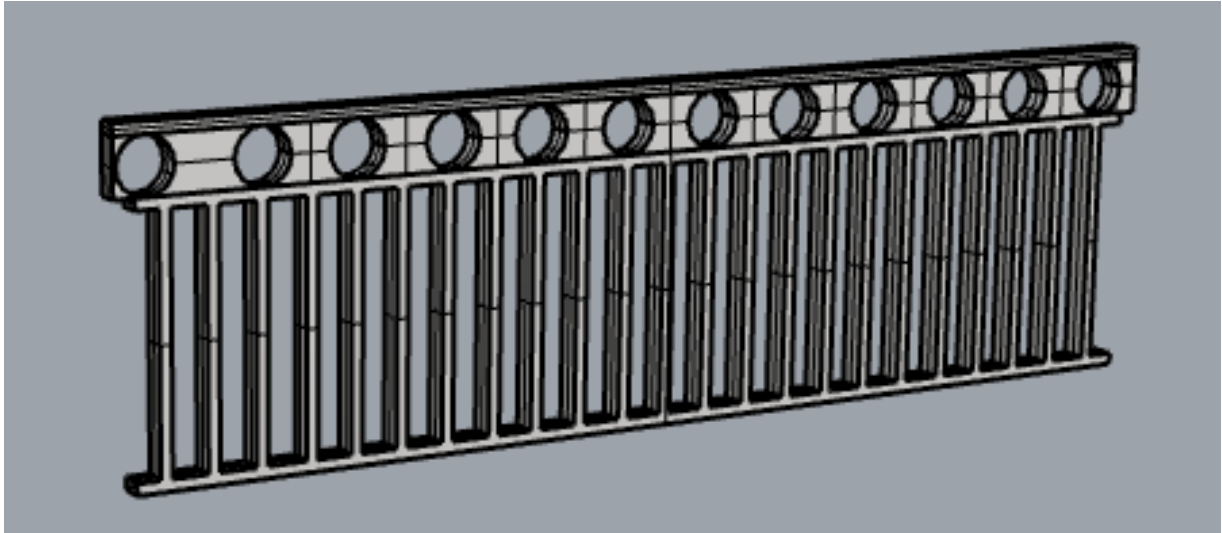


Figura 38: Barandilla. Fuente: elaboración propia en Rhino

5.3.4. Calzada

El último elemento modelado es la calzada, no se ha encontrado información exacta sobre su composición por lo que se ha realizado una hipótesis, como se representa en la Figura 39, se han modelado seis centímetros de asfalto como capa superior, 30 centímetros de hormigón armado como capa intermedia y el resto albero prensado rellenando los huecos del panel.

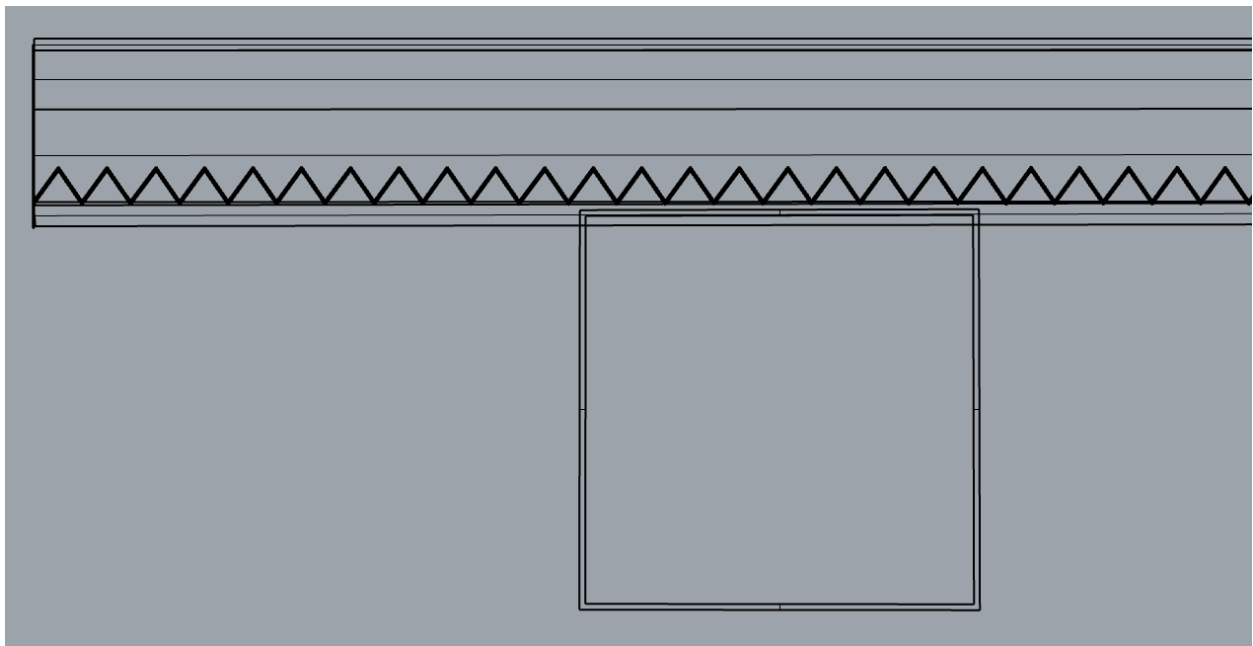


Figura 39: Corte de la calzada y estructura del tablero. Fuente: elaboración propia en Rhino

Una vez que todas las partes están modeladas, se procede a unir las.

5.4. Análisis de deformaciones

Dentro de las distintas deformaciones que ha podido sufrir el puente con el paso del tiempo, en este trabajo se van a analizar tres: las deformaciones sufridas en el arco y la verticalidad y planitud del paramento del Puente.

A continuación, se explica el proceso seguido.

5.4.1. Deformaciones en el arco

En primer lugar, es necesario tener el arco aislado, sin las paredes del puente ni ningún otro elemento. Esto de nuevo se realiza con el comando 'Segment' de CloudCompare.

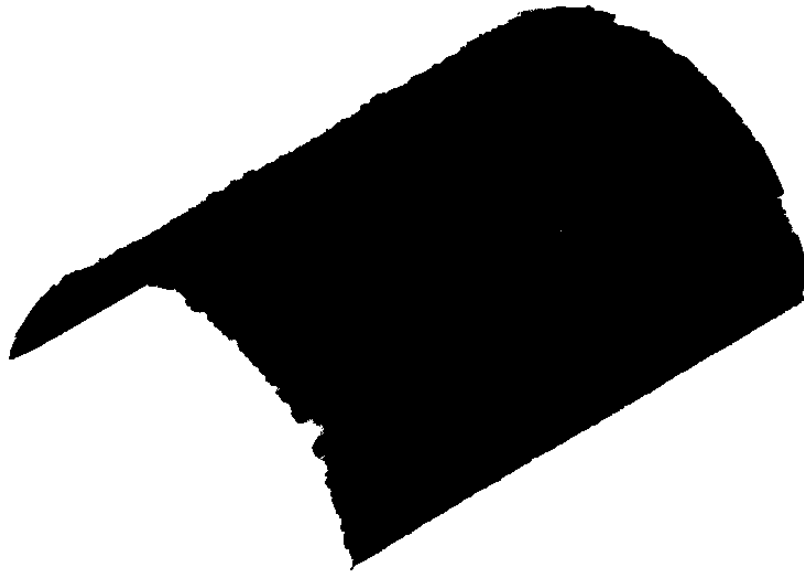


Figura 40: Nube de puntos del arco recortado. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Para analizar las deformaciones se va a comparar la nube de puntos del arco real con un arco ideal. Para ello se importa en Rhino la nube de puntos de la Figura 40 y se aproxima una curva genérica que mejor se ajuste al arco real. Usando el comando 'Arco: desde inicio, final y punto en arco' se consiguió una curva que se adaptaba en gran medida a la real, pero fue necesario modificarla con el comando 'Gumball' hasta obtener la curva amarilla de la Figura 41. Esta modificación es simétrica, por lo que se mantiene la dirección de los ejes originales de la curva, la cual se encuentra girada al igual que el arco, como se observa en la Figura 41.

A continuación, esta curva se extruye con el comando 'Extrusión de Curva', con una longitud igual a la del arco y usando como dirección de extrusión la del arco real (Figura 42).

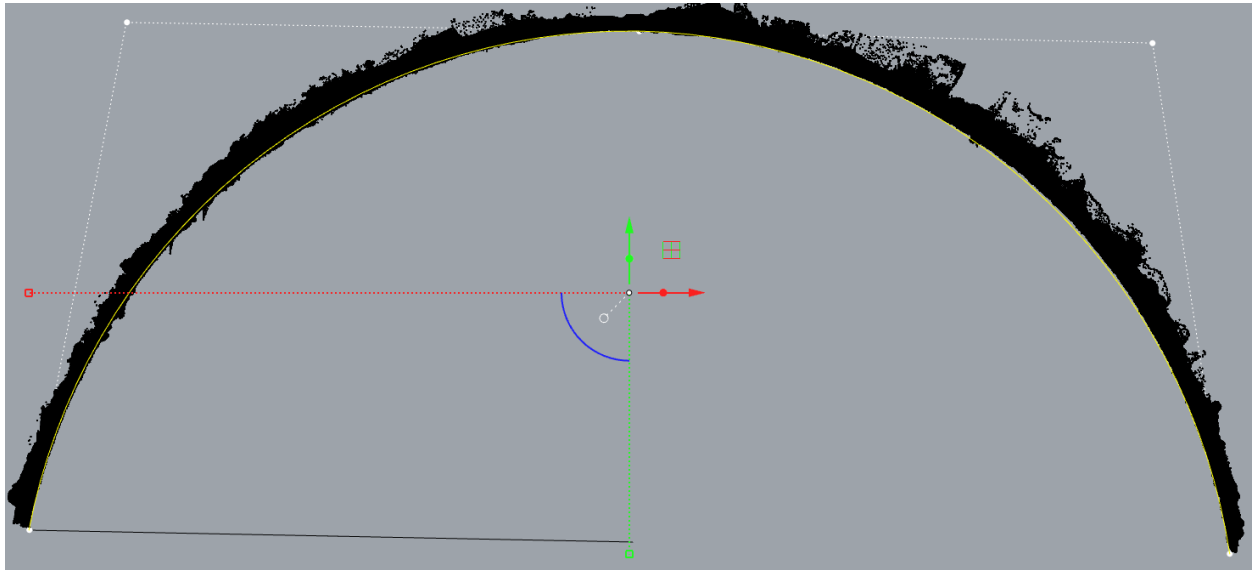


Figura 41: Vista en alzado del arco y curva ideal. Fuente: elaboración propia en Rhino

Además, se han medido las longitudes del ancho y alto del arco con el comando ‘Distancia’ en Rhino, siendo estas de 10,5 m y 4,5 m respectivamente.

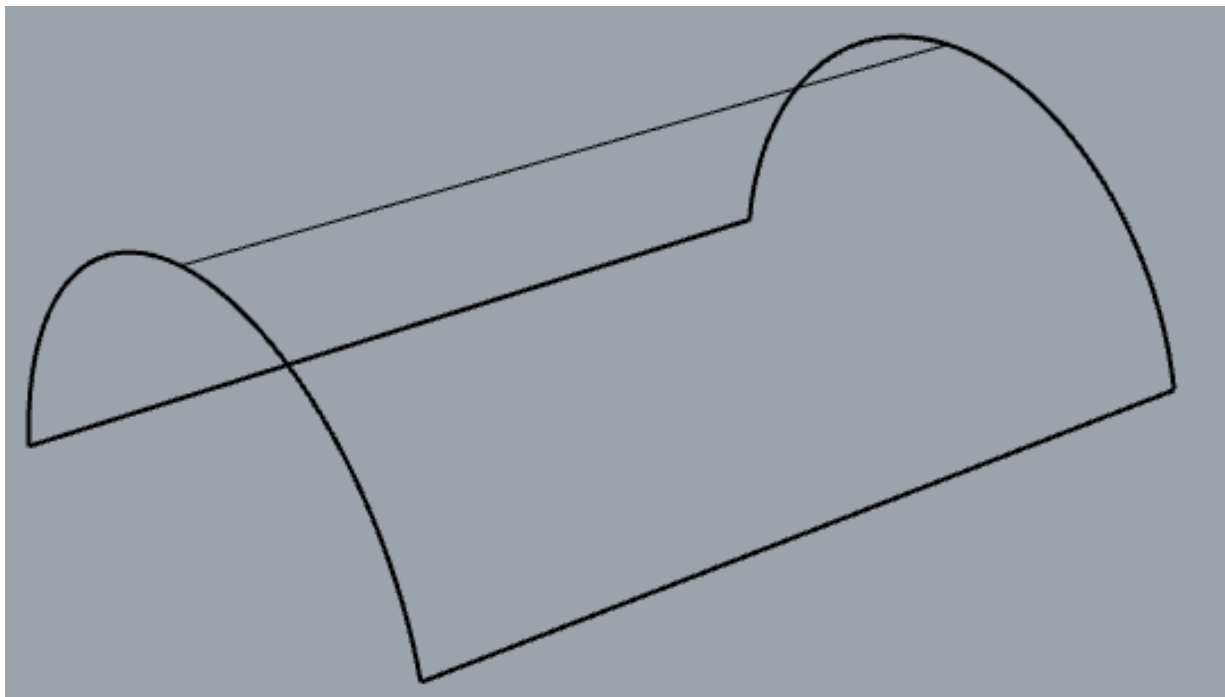


Figura 42: Curva extruida. Fuente: elaboración propia en Rhino

A continuación, se usa el comando ‘Contorno’ para crear curvas planas entre el inicio y el final de la extrusión con una distancia entre ellas de tres centímetros. Una vez que tenemos todas las curvas, es necesario seccionar estas para conseguir la nube de puntos ideal, para ello se usa el comando ‘Dividir curva por longitud’, usando de nuevo una longitud de tres centímetros entre cada segmento. Con el comando ‘Nube de puntos’ unimos todos los puntos obtenidos (representados en la Figura 43) y esa nube se exporta en formato ‘Puntos’ (.txt) para poder usarla en CloudCompare.

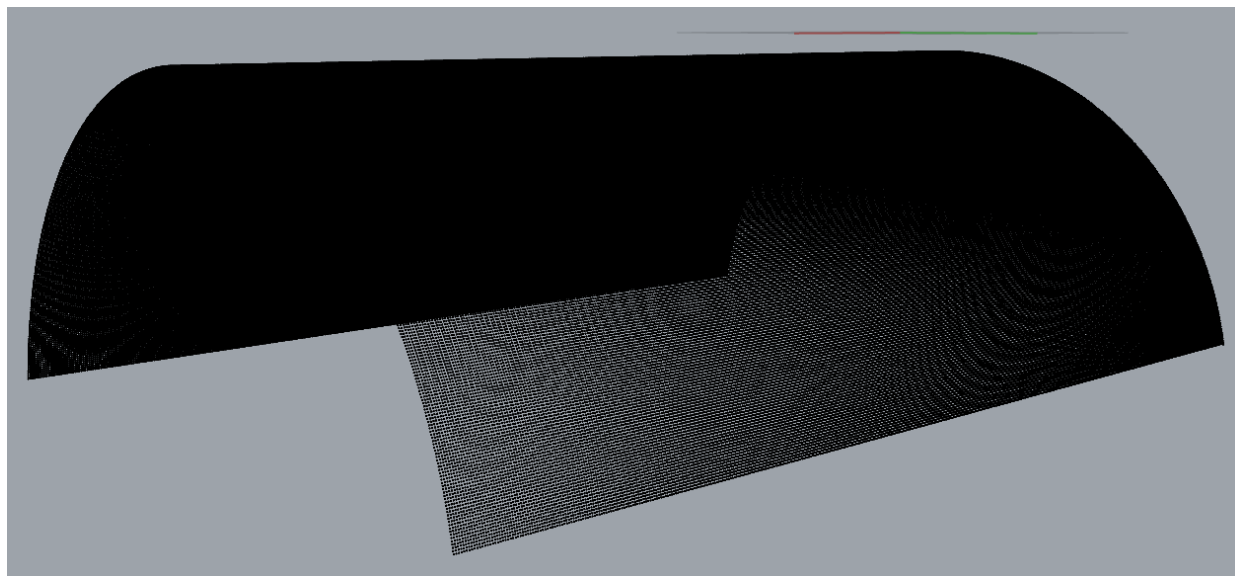


Figura 43: Nube de puntos del arco ideal. Fuente: elaboración propia en Rhino

En CloudCompare se importan tanto la nube ideal recién creada como la nube real del arco y se comparan con el comando ‘Compute Cloud/Cloud distance’, usando como referencia la nube de puntos ideal, eligiéndolo en la ventana que aparece representada en la Figura 44.

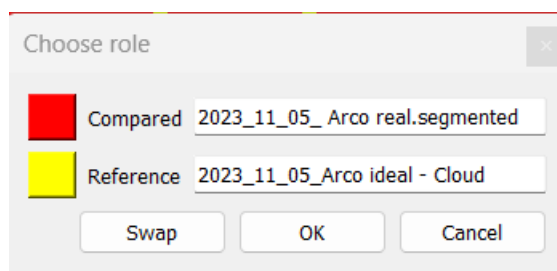


Figura 44: Ventana de CloudCompare para elegir nube de referencia. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

5.4.2. Verticalidad de la pared

Antes de realizar el análisis de verticalidad, se ha extraído el paramento de la fachada Norte del puente por segmentación en CloudCompare y se ha recortado para obtener la nube de puntos más fina posible y con la mayoría de los puntos contenidos en un espesor de 7 cm, aunque se ha perdido información, la erosión no está relacionada con el desplome del paramento por lo que no influye en este análisis.



Figura 45: Cara norte recortada. Fuente: elaboración propia en Rhino

Una vez se tiene la cara aislada del resto del Puente (Figura 45), se ha creado un plano ajustado a los puntos del paramento (plano negro en la Figura 46) y otros dos planos verticales (planos magenta y verde en la Figura 46) que se interseccionan con el primero. Se han obtenido las dos líneas rectas de las secciones entre estos planos que son paralelas y se ha dibujado la perpendicular a estas dos, obteniendo así la recta de máxima pendiente del paramento (línea cian en la Figura 46) que se ha proyectado sobre uno de los planos verticales. Esta recta de máxima pendiente se ha comparado con su proyección en el plano vertical con el comando 'Ángulo'.

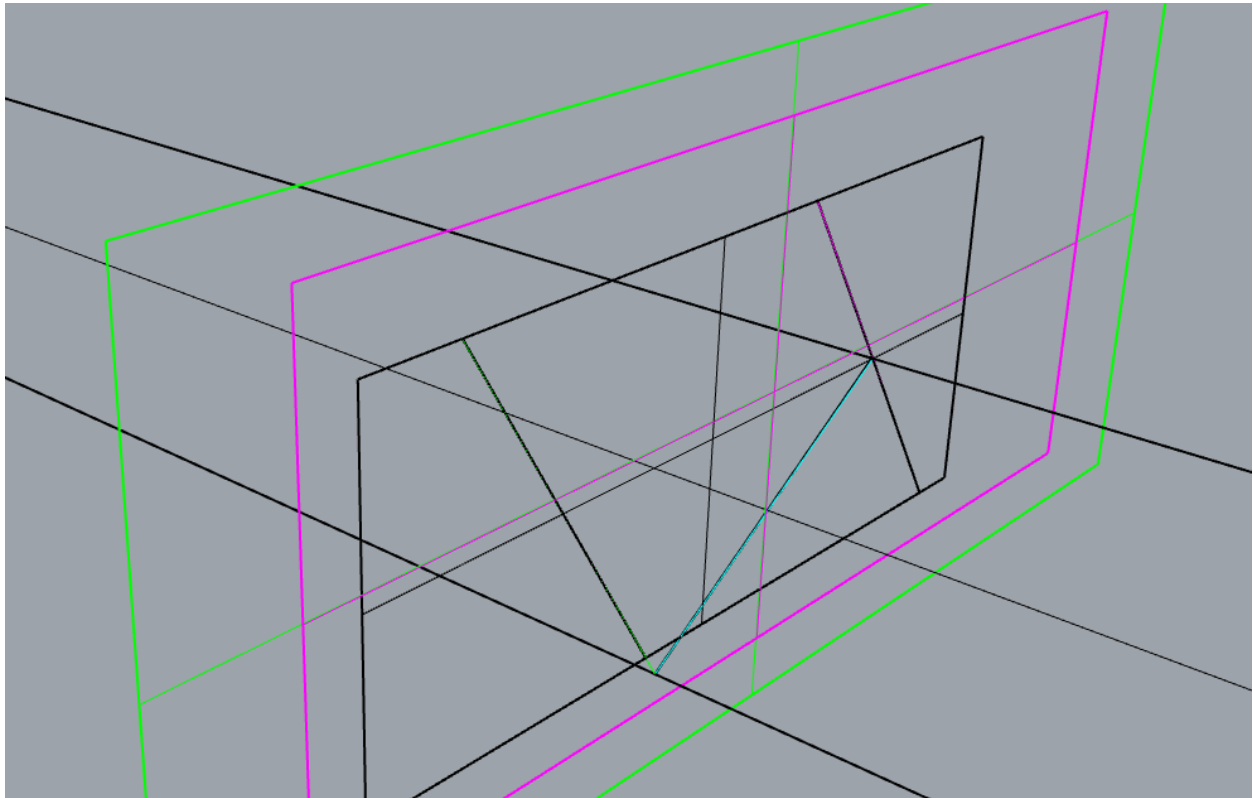


Figura 46: Perspectiva del modelado de la recta de máxima pendiente del paramento de la cara sur del estribo. Fuente: elaboración propia en Rhino.

5.4.3. Planitud del paramento frente de la bóveda

En el caso del análisis de planeidad del paramento frente de la bóveda, se ha vuelto a abrir la pared aislada en Rhino pero esta vez usando el comando ‘Ajustar plano a través de puntos’ y como su nombre indica, se ha creado un plano ajustándolo a la nube de puntos recortada previamente. Este plano se ha reconstruido y se han extruido los puntos para después crear la nube de puntos (Figura 47) que ha sido abierta en CloudCompare para recortarla con la forma del arco (Figura 48).

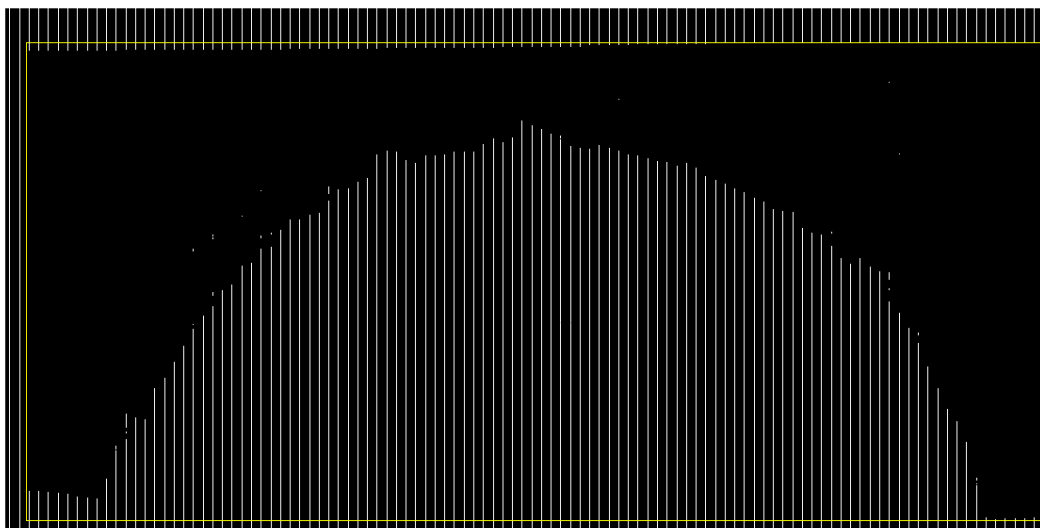


Figura 47: Nube de puntos ajustada al plano del paramento y nube de puntos del paramento en CloudCompare. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

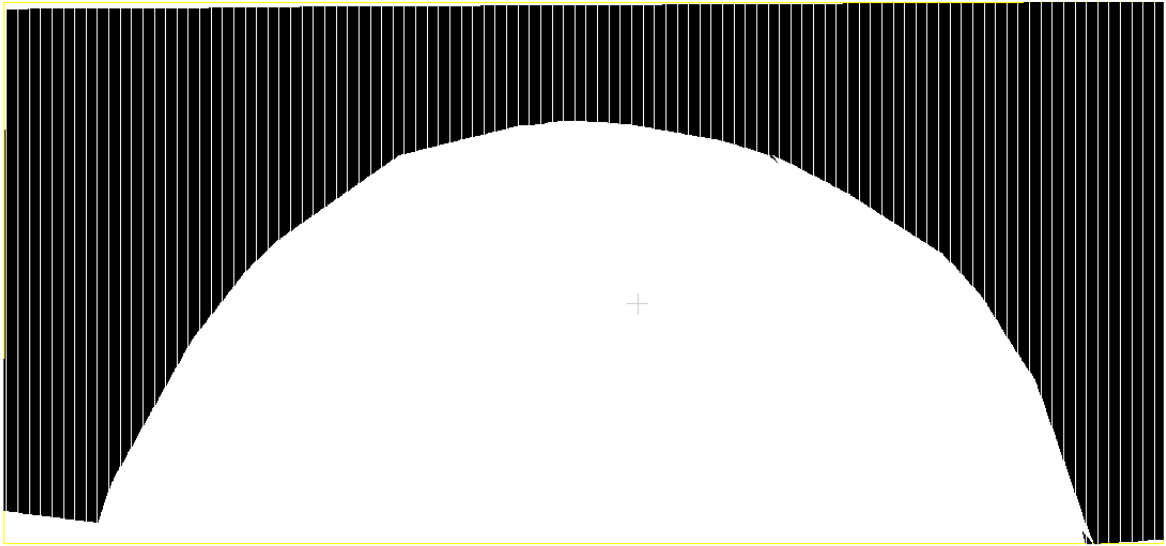


Figura 48: Nube de puntos ajustada al paramento recortada con la forma del arco. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

Una vez se tiene la nube del paramento ideal recortada, se procede a comparar ambas nubes de la misma forma que para el arco, con el comando 'Compute Cloud/Cloud distance' siendo de nuevo la referencia la nube de puntos ideal, y la comparada, la real.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Modelado del puente

El primer resultado que se obtiene de este trabajo es el modelado del puente en sí tras unir todas las partes que se han modelado por separado.

Por un lado está el estribo de piedra (Figura 49) y por otro el resto del puente hasta la siguiente fila (Figura 50 y Figura 51).

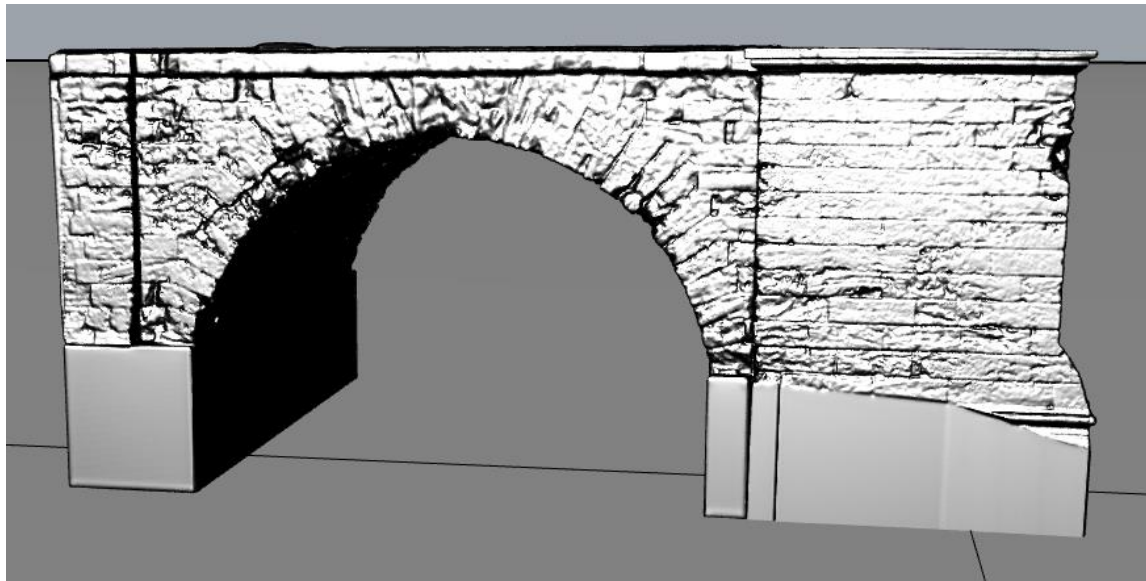


Figura 49: Malla del estribo del puente unido. Fuente: elaboración propia en Rhino

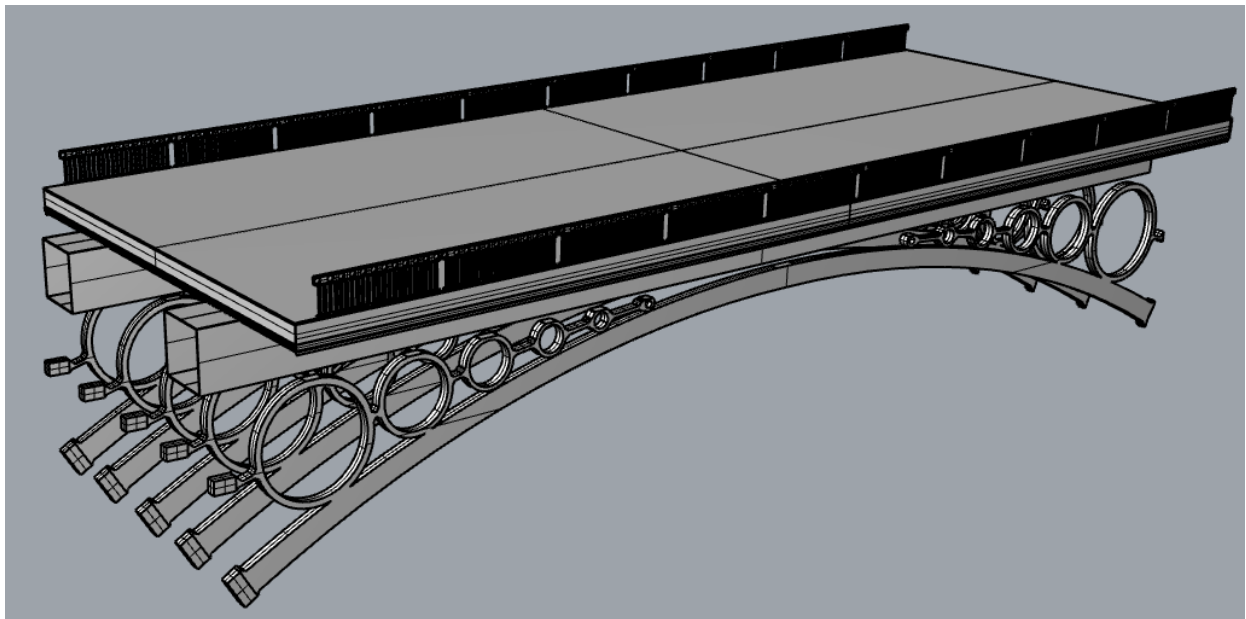


Figura 50: Modelado del tablero y parte de hierro unido. Fuente: elaboración propia en Rhino

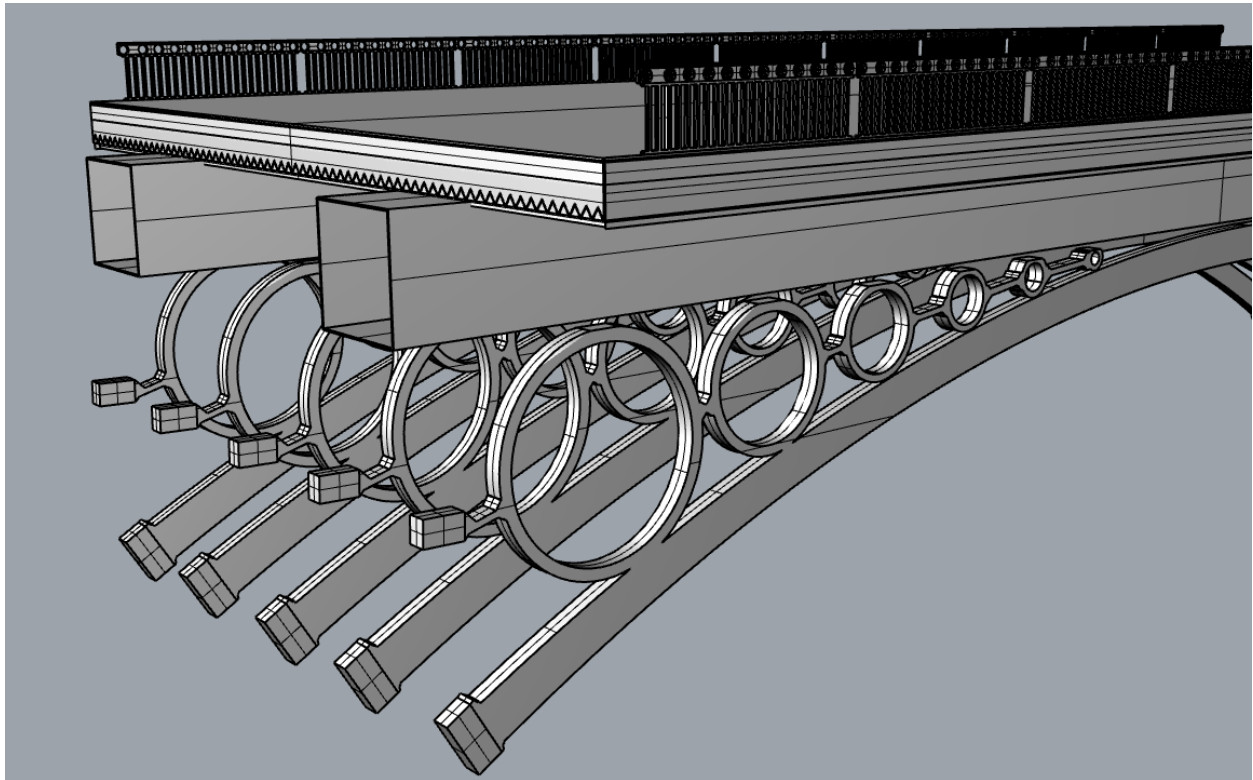


Figura 51: Zoom del modelo del tablero y parte de hierro unido. Fuente: elaboración propia en Rhino.

Como ya se indicó en apartados anteriores, el modelado del estribo pasa a formar parte de la información de conservación del Puente de Triana, mientras que la función del modelado de la parte de hierro y el tablero es la de servir para un futuro análisis estructural del estribo, puesto que ejerce un peso y fuerzas sobre el primero.

En la Figura 52 y en la Figura 53 se puede ver representado el modelo completo que se ha realizado en este trabajo.

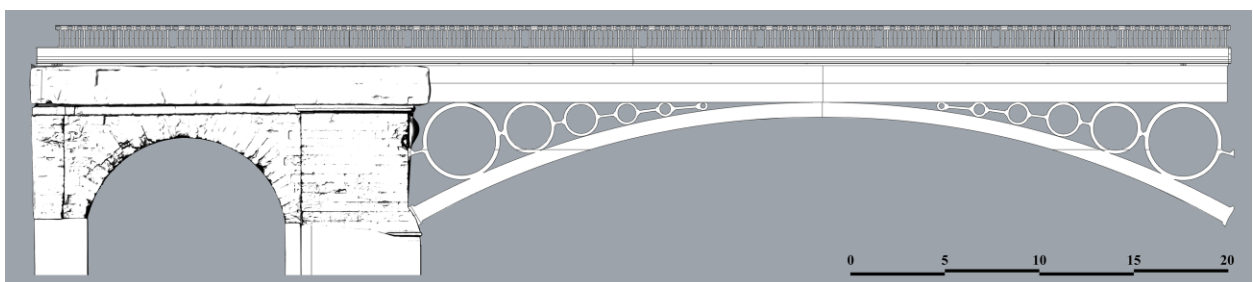


Figura 52: Alzado del puente. Fuente: elaboración propia en Rhino

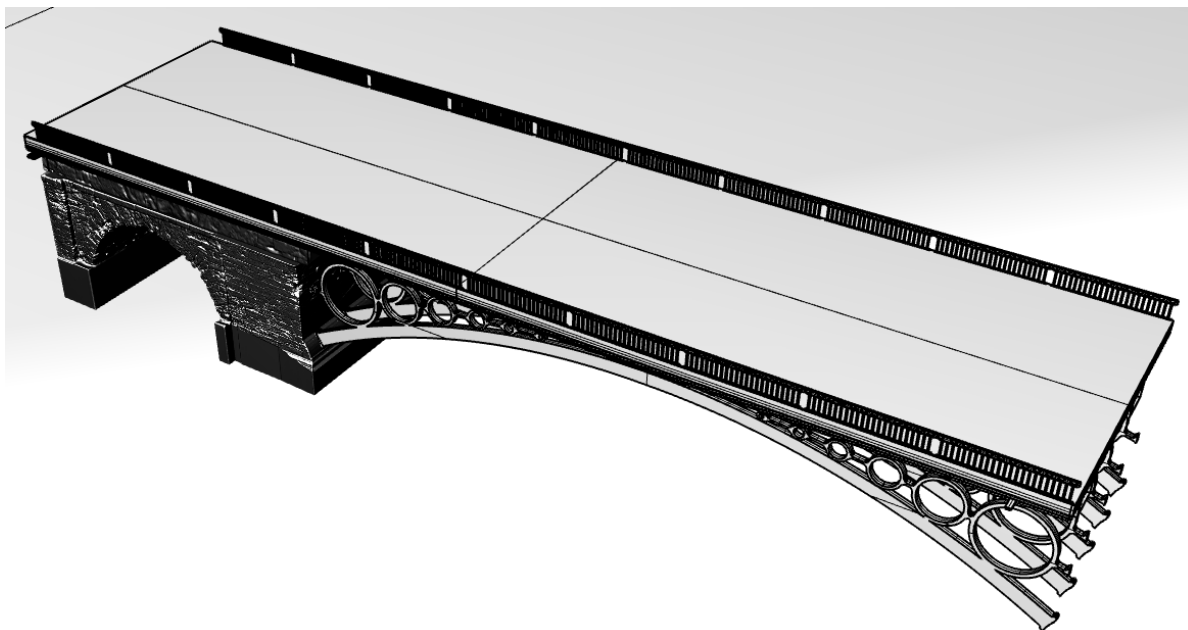


Figura 53: Puente en perspectiva. Fuente: elaboración propia en Rhino

6.2. Análisis geométrico

6.2.1. Deformaciones del arco

Como resultado de la comparación de la bóveda real e ideal, se ha obtenido una distancia promedio entre nubes de 0,0552 m y una desviación estándar de 0,0335 m.

En el histograma de la Figura 54 se muestran, en el eje de abscisas, las distancias, en metros, entre puntos de la nube real escaneada de la bóveda y la ideal modelada en Rhino, mientras que el eje de ordenadas representa la cantidad de puntos que están a esa distancia.

Como se observa en la Figura 54, para el caso del arco mariner, alrededor de 580.000 puntos se difieren del arco ideal en 0,02 metros y alrededor 160.000 puntos en 0,1 metros, siendo una de las distancias mayores entre las dos nubes de 0,2 metros, en la que se encuentran alrededor de 100.000 puntos.

En la Figura 55Figura 56, podemos observar los puntos con mayores desviaciones en color naranja/rojo y constituyen grandes grietas en la piedra. Si vemos una fotografía real del puente, como la de la Figura 57, se puede comprobar que esos puntos en color rojo son en efecto grandes grietas que se pueden observar fácilmente paseando por el debajo de la bóveda.

Por otro lado, en color azul y verde (Figura 55 y Figura 56), se encuentran deformaciones de la bóveda respecto a la geometría ideal. Es decir, hay desviaciones del arco real en grandes zonas.

Por último, en verde y amarillo se puede observar deformaciones en sillares/dovelas por erosión.

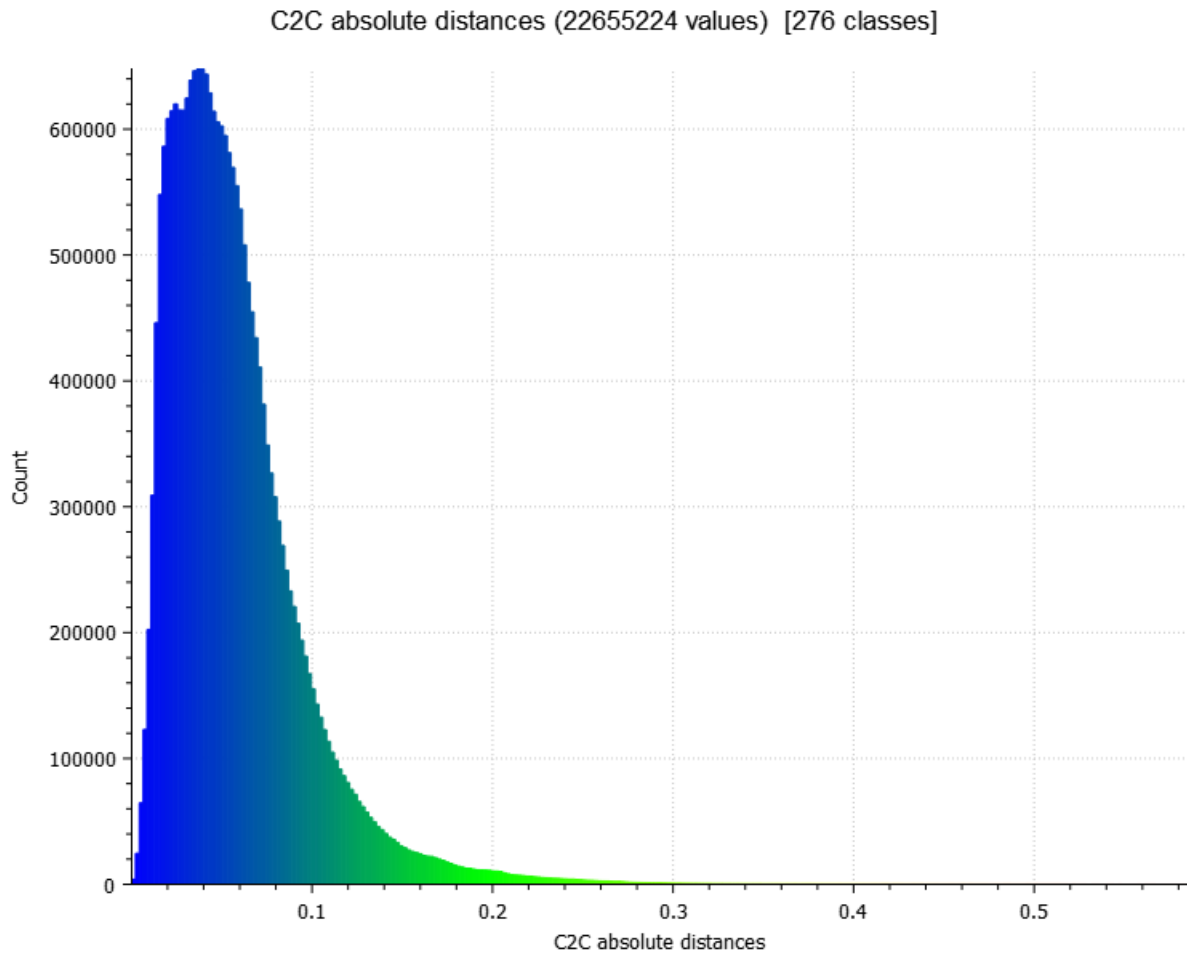


Figura 54: Histograma de las distancias entre la nube de puntos del arco ideal y la real. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

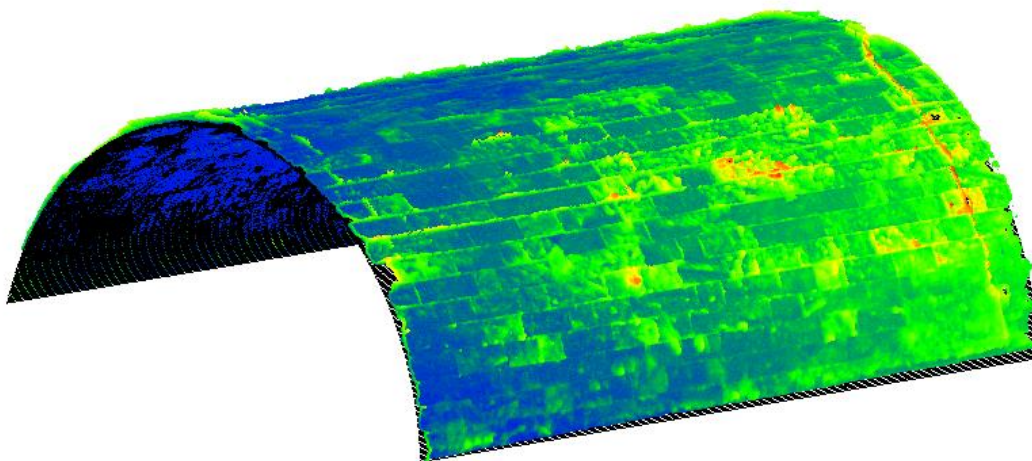


Figura 55: Mapa de colores del arco en perspectiva. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

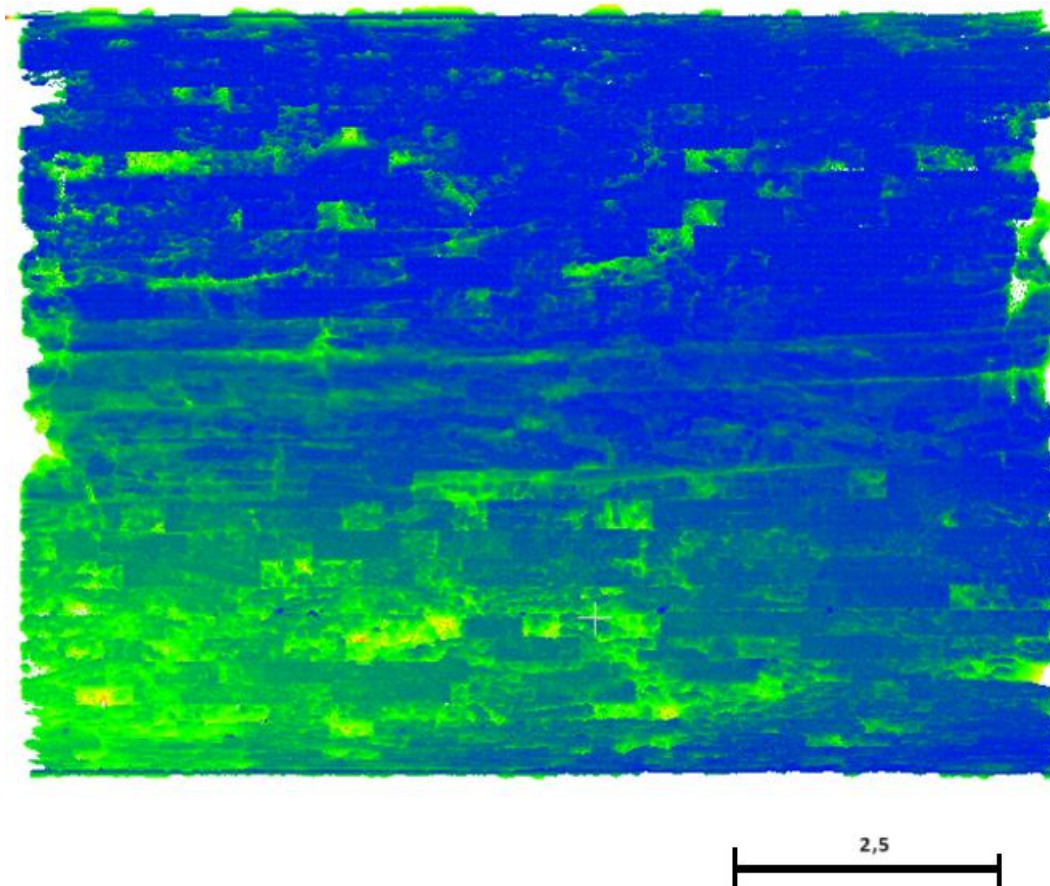


Figura 56: Mapa de colores en vista inferior. Fuente: elaboración propia en CloudCompare

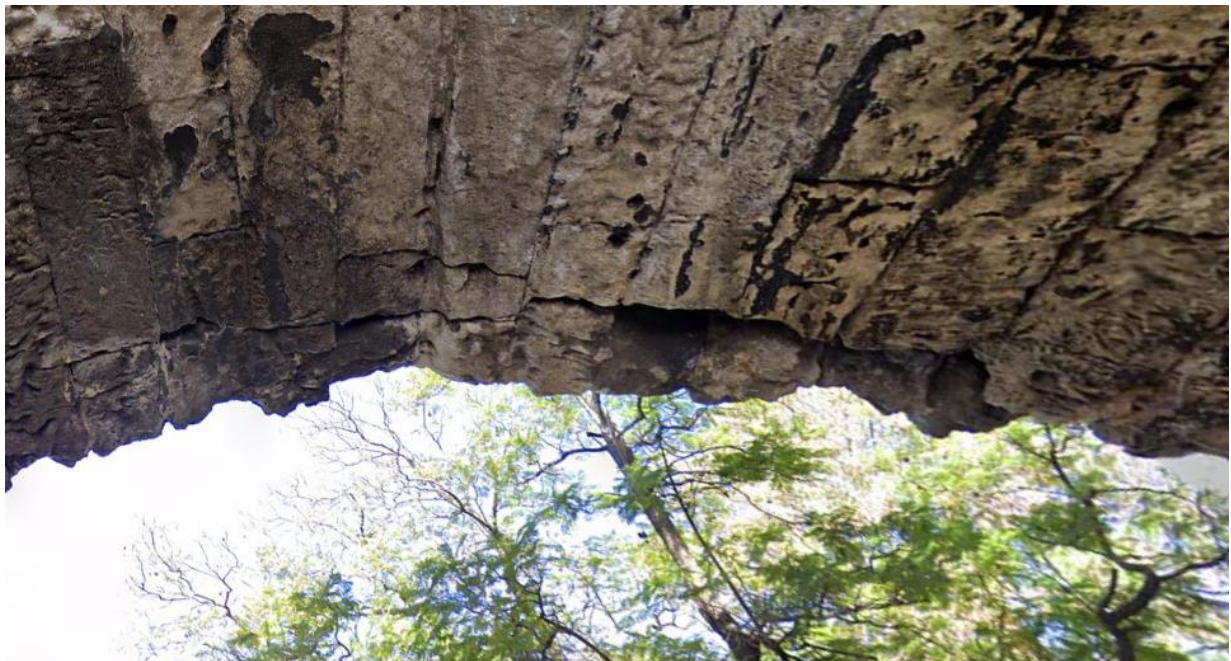


Figura 57: Fotografía de grieta en la bóveda real. Fuente: Google maps
<https://www.google.es/maps/@37.386894,-6.0019378,3a,75y,295.94h,142.5t/data=!3m6!1e1!3m4!1sRjHbteb-R8fmPYmf2sZciQ!2e0!7i16384!8i8192?entry=ttu>

6.2.2. Verticalidad

Tras comparar el plano vertical con la recta de máxima pendiente del paramento, el ángulo obtenido es de $0,31^\circ$ en la cara norte y $0,149^\circ$ en la cara sur. Esto quiere decir que, asumiendo que, en la creación del puente, el paramento fuera totalmente vertical, tanto el paramento de la cara norte, como el de la cara sur, han sufrido un leve desplome, sin ser una gran variación respecto a su supuesto diseño idealmente vertical.

6.2.3. Planitud

Por último, en cuanto a la planitud, se ha obtenido una distancia promedio de 0,0811 m y una desviación estándar de 0,0492 m.

En las siguientes figuras se puede observar los puntos donde más distancia existe entre la nube real y el plano creado ajustado a esa nube. En este caso, la cantidad de puntos a distancias mayores aumenta respecto al arco. Como se puede observar en la Figura 58, alrededor de 5.000 puntos se encuentran a una distancia de 0,02 m, la mayoría de los puntos, alrededor de 110.000, se encuentran a una distancia de 0,06 m y hay una pequeña cantidad de alrededor de 2.500 puntos que se encuentran a una distancia de 0,34 m, puntos correspondientes a una zona con una pérdida significativa de masa en la piedra (en rojo en la Figura 59).

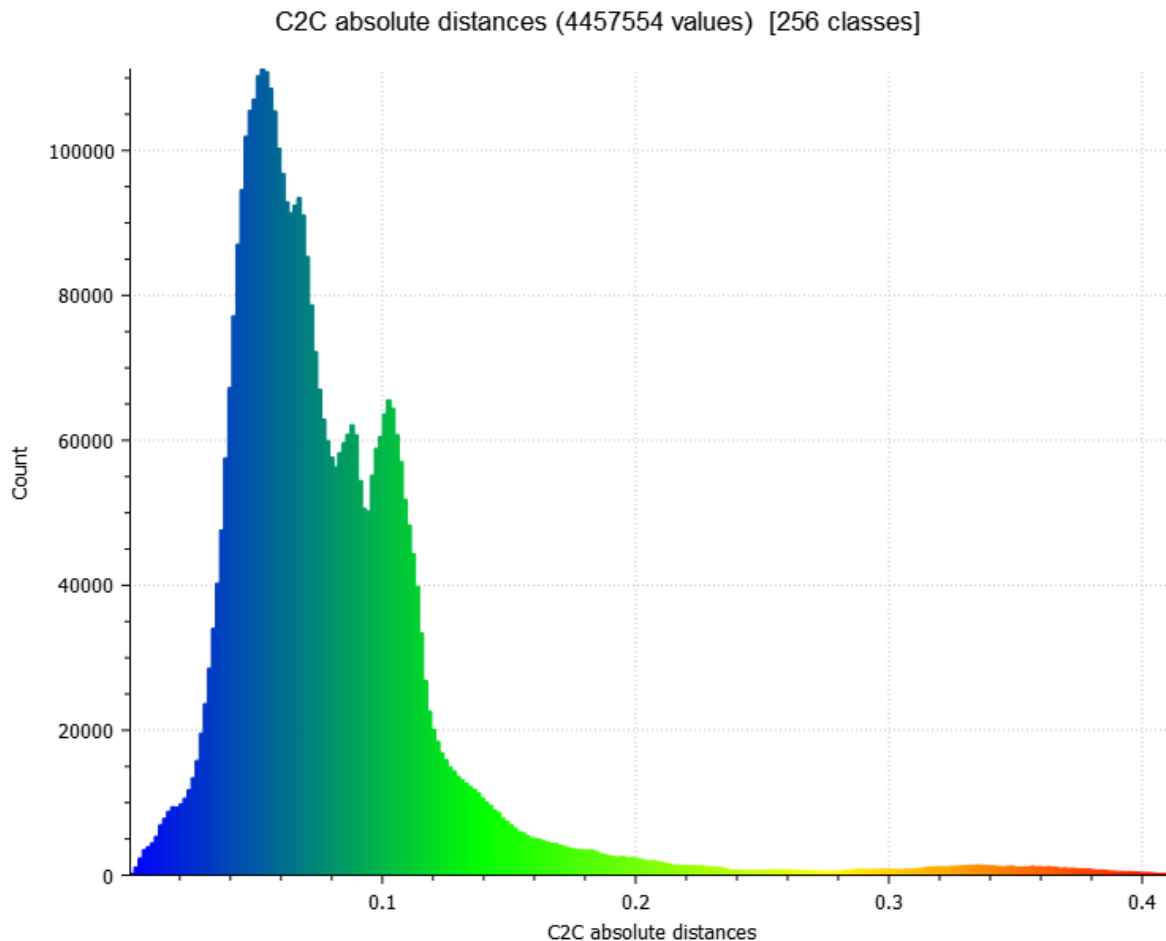


Figura 58: Histograma de la distancia entre la nube de puntos ideal del paramento y la real. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.

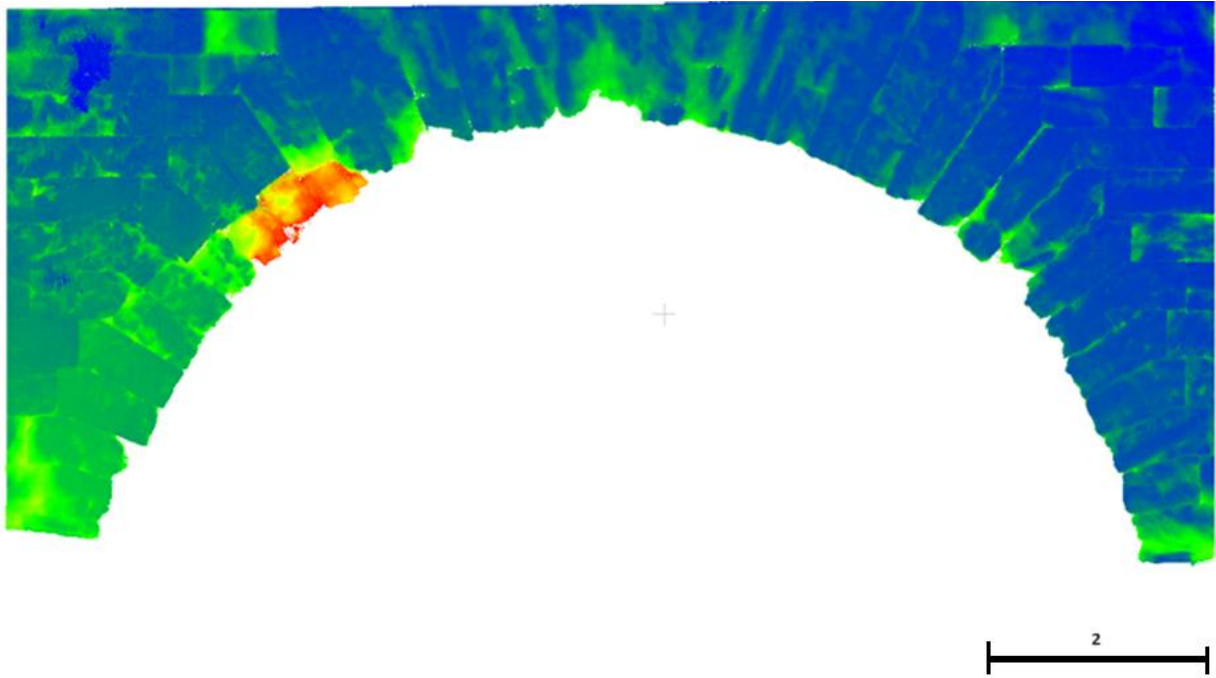


Figura 59: Mapa de colores de distancias entre nubes del paramento en vista alzado. Fuente: elaboración propia en CloudCompare.

7. CONCLUSIONES

En primer lugar, se ha llegado a la conclusión de que el escaneado 3D es un método fiable para conservar información sobre elementos, edificios y sitios patrimoniales. En el caso que ocupa el presente trabajo, se ha obtenido un modelo gráfico del arco mariner que conforma el estribo este del Puente de Triana para representar de forma detallada su estado actual de conservación.

A partir de la adquisición de datos de nubes de puntos mediante la tecnología de Escaneado Láser Terrestre, se ha realizado un mallado 3D del estribo, considerando sus alteraciones geométricas. Esto ha permitido desarrollar el modelo virtual del caso de estudio, así como utilizar esta información 3D para realizar un análisis geométrico que localice y cuantifique las deformaciones que han tenido lugar a lo largo de su historia.

Con vistas a lograr un adecuado mallado 3D, se ha llevado a cabo un análisis de precisiones con distintos niveles de detalle, cuantificando sus características geométricas y similitud respecto a la nube de puntos procesada. La desviación estándar obtenida en esta reconstrucción 3D ha sido de 0,0136 m aproximadamente.

Además, se ha formulado una hipótesis de cimentación que ha permitido integrar este elemento en la nube de puntos y lograr así una malla hermética para completar el modelo.

El citado análisis geométrico ha comparado las formas originales del arco mariner, tanto en su intradós (bóveda de cañón) como ambos frentes, con las formas ideales que derivan del diseño del puente. Para ello, se han ajustado planos y superficies a los puntos de la nube procesada y se han extraído nubes de puntos ideales para el análisis de desviaciones.

Este trabajo ha obtenido los siguientes resultados:

- A nivel cualitativo, se han detectado áreas del intradós con desviaciones significativas respecto a la geometría ideal, incluyendo grietas que podrían afectar a su comportamiento estructural y suponer un riesgo de desprendimiento. En el paramento norte del arco se han identificado sillares con una pérdida importante de masa, así como un alabeo del plano en la parte inferior izquierda.
- A nivel cuantitativo, el intradós del arco, cuya nube de puntos procesada cuenta con un total de 22.655.224 vértices, muestra que la mayoría de ellos se encuentran a una distancia de la nube ideal inferior a 10 cm. Sólo el 2,5% del total de puntos distan alrededor de 2 cm, lo que indica que esos sectores del arco permanecen prácticamente igual desde su ejecución, asumiendo que en su creación este fuera un arco ideal y perfecto. Por otra parte, en torno al 0,4% de los puntos se alejan aproximadamente 20 cm de la nube ideal, constituyendo las deformaciones que han tenido lugar desde su construcción.
- El análisis del paramento vertical de la fachada norte del puente, cuya nube contiene 4.457.554 puntos, muestra que la mayoría de ellos se encuentran a una distancia del plano ideal inferior a 12 cm, de los cuales un 0,11% dista en torno a 2 cm y un 2,5% aproximadamente 6 cm. Además, existe un 0,056% que se encuentra alejado del plano ideal alrededor de 34 cm.

Con estos datos, se puede concluir que la parte del estribo de piedra que más deformaciones ha sufrido es el paramento. Esto puede deberse a una mayor exposición de esta área a la climatología frente a la bóveda. Gracias a este trabajo se han identificado sectores en los que se podría intervenir mediante acciones de restauración para conservar este bien patrimonial.

Finalmente, además de para poner el estribo del puente de Triana en contexto, se ha desarrollado el modelo virtual de parte del primer tramo hasta la siguiente pila para servir de base a futuras investigaciones. Esto se ha llevado a cabo usando la topología de la nube de puntos, detectando curvas para definir la forma de los objetos sólidos que configuran el modelo de esta parte de hierro. Aquí se plantea realizar una evaluación del comportamiento estructural del estribo a través del método de elementos finitos (Zienkiewicz & Taylor, 2000), lo que podría arrojar datos esenciales para un eventual refuerzo del puente.

8. REFERENCIAS

- Antón García, D. (2019). *Modelado de información y alteraciones geométricas para respaldar el análisis preciso de activos patrimoniales*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Antón, D., Carretero Ayuso, M. J., Moyano Campos, J., & Nieto Julián, J. E. (2022). Laser Scanning Intensity Fingerprint: 3D Visualisation and Analysis of Building Surface Deficiencies. En *New Technologies in Building and Construction* (págs. 207-223). Singapur: Springer.
- Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(5), 790-805.
- Antón, D., Pineda, P., Medjdoub, B., & Iranzo, A. (2019). As-Built 3D Heritage City Modelling to Support Numerical Structural Analysis: Application to the Assesment of an Archaeological Remain. *Remote Sensing*.
- Ávila Jalvo, J. M. (2001). El puente de Triana y su tiempo. *Informes de la Construcción*, 52(472), 5-15.
- Azkarate, A., Ael, M. J., & Santana, A. (2003). *El patrimonio arquitectónico*. Vitoria-Gasteiz: Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Obtenido de <http://cort.as/-ICeT>
- Croci, G. (1998). *Croci, G. (1998). The conservation and structural restoration of architectural heritage*. WIT Press.
- Danshmand, M., Helmi, A., Avots, E., Noroozi, F., Alisinanoglu, F., Arslan, H. S., . . . Anbarjafari, g. (2018). *3D Scanning: A comprehensive Survey*.
- Díaz Gómez, F., Jiménez Peiró, J., Barreda Benavent, A., Asensi Recuenco, B., & Hervás, J. (2015). Modelado 3D para la generación de patrimonio virtual. *Virtual Archaeology Review*, 6, 29-37.
- Domínguez, J. C. (2018). *Levantamiento, modelado y recreación virtual del Puente de Isabel II de Sevilla con Catia V.5*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Douillard, B., Underwood, J., N. Kuntz, V. V., Quadros, A., Morton, P., & Frenkel, A. (2011). On the Segmentation of 3D LIDAR Point Clouds. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai.
- Entrenas Villegas, J. M. (2019). *Escaneo edificio Bilbao Santander*. Recuperado el 9 de 11 de 2023, de Geocaptiva: <http://geocaptiva.com/modelo-digital-para-patrimonio-captura-3d-del-edificio-del-banco-santander-en-bilbao/>
- Falip, S., & Del Cogliano, D. (2019). Generación de Nubes de Puntos 3D con Escáner Laser Terrestre. Georreferenciación y Evaluación de la Calidad. *Ingeniería*, 24(2), 171-197.
- García Menéndez, L., Domínguez-Somonte, M., & Espinosa-Escudero, M. d. (2021). *Escáneres ópticos 3D de mano en ingeniería inversa*. Madrid.
- Girardeau-Montaut, D. (2006). *Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles*. Doctorat Traitement du Signal et des Images.

- González Muñoz, M. J., Rueda Ruiz, A., Segura Sánchez, R., Ogáyar Anguita, C., Esteban Hoyas, A., & Lara, J. (2010). Uso de sistemas basados en escáner 3D para digitalización y estudio del patrimonio arqueológico. *Virtual Archaeology Review*, 1, 99-102.
- Graciani García, A. (1996). La construcción del Puente de Isabel II de Sevilla. Los problemas de cimentación. *Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid.
- Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. (Octubre de 2023). *Guiadigital del Patrimoni Cultural de Andalucía*. Obtenido de Puente de Triana: <https://guiadigital.iaph.es/bien/mueble/258763/sevilla/sevilla/puente-de-triana>
- Kazhdan, M., Bolitho, M., & Hoppe, H. (2006). *Poisson Surface Reconstruction*. The Eurographics Association.
- Lefler Pino, J., Herencia Ruiz, A., & Vázquez Orellana, R. (1999). *Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Sevilla: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Leica Geosystems. (2018). (Leica Geosystems) Recuperado el 1 de 10 de 2023, de <https://shop.leica-geosystems.com/es/es-ES/leica-blk/blk360-g1/buy>
- Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A., & Blanco-Rotea, R. (2008). *Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)*. Arqueología de la arquitectura.
- Mettenleiter, M., Härtl, F., Heinz, I., Neumann, B., Hildebrand, A., Abmayr, T., & Fröhlich, C. (2003). Escaneo láser 3D para ingeniería y conservación del patrimonio arquitectónico. *Actas del XIX Simposio Internacional, CIPA 2003: nuevas perspectivas para salvar el patrimonio cultural*, (págs. 484-489). Antalya (Turquía).
- Molina, D. F., & Tubío, F. d. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: La Torre del Homenaje. *ANTIQUITAS*(24), 277-302.
- Movellán, A. V. (1978). La arquitectura del hierro en Sevilla. *El arte del siglo XIX: II Congreso Nacional de Historia del Arte*. Valladolid.
- Nieto Julían, J. E., Moyano Campos, J. J., Rico Delgado, F., & Antón García, D. (2013). La necesidad de un modelo de información aplicado al patrimonio arquitectónico. *Primer Congreso Nacional BIM*, (págs. 1-12). Valencia.
- Pacheco Morales-Padrón, M. (2018). Consideraciones Sobre La sustitución Del Puente De Barcas De Triana: Un Proyecto De Puente De Piedra (1631). *Atrio. Revista de Historia del Arte*(24), 42-57.
- Quintilla Castan, M., & Agustín-Hernández, L. (2023). Los Sistemas de Documentación como instrumento de conservación del Patrimonio Arquitectónico. Experiencias en España y Europa. *ERPH. Revista electrónica de Patrimoni Históric*(32), 41-75.
- Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. (3).
- Rhino3D. (2020). (Grasshopper) Recuperado el 3 de 10 de 2023, de <https://www.rhino3d.com/es/for/architecture/#:~:text=Rhino%20es%20una%20gran%20herramienta,con%20funciones%20de%20realidad%20aumentada>.

- Ríos Pérez, M. (2017). *El puente de Triana. Un rescate de la ingeniería andaluza para la historia de Sevilla*. Obtenido de Academia Andaluza de Ciencia Regional: <https://www.acacr.es/discursos/Discurso%20M.%20R%C3%ADos%20P.-Ilustrado.pdf>
- Rodríguez Juárez, A. (2016). *Estudio de captura de datos con escáner láser terrestre (TLS) para aplicación en el modelado de información para la edificación (BIM)*. Jaén.
- Salas, N. (2016). Los puentes sobre el Guadalquivir de Sevilla, hitos del desarrollo histórico de la ciudad. *Centenario de la Asociación Territorial de Ingenieros Industriales de Andalucía Occidental*, (págs. 1-52). Sevilla.
- Salazar González, G., & Ligorred Perramon, J. (2022). Tecnología en la investigación del patrimonio arquitectónico y arqueológico. *Revista Universitarios Potosinos*, 18(267), 26-31.
- Santos Maestre, C. (2014). *Aplicación arquitectónica de la fotogrametría digital para levantamiento gráfico y fotogramétrico de fachadas en palacete Prytz*. Alicante.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Sanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 389-399.
- Wachowiak, M. J., & Karas, B. V. (2009). 3d Scanning and Replication for Museum and Cultural Heritage Applications. *Journal of the American Institute for Conservation*, 48(2), 141-158.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method* (5 ed., Vol. 1). Butterworth-Heinemann.

9. ANEXO I

Cyclone REGISTER 360

Informe de registro

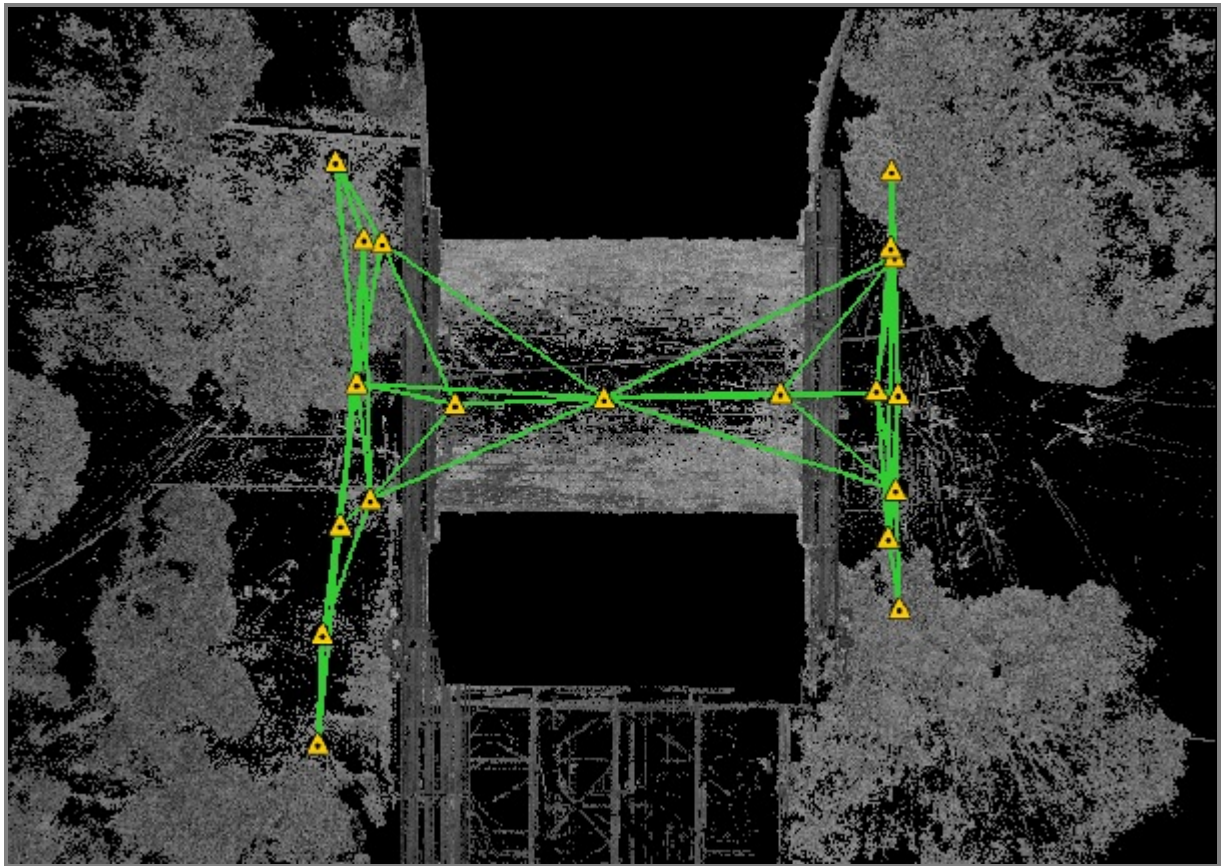
mar. 28, 2023

Certificado por:

Gloria Liébana

Trabajo Fin de Máster

Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación



SiteMap 1

Calidad general

Resultados de error para Conjunto 1

Número de estacionamientos: 19
Número de enlaces: 46
Fuerza: 75 %
Solapamiento: 52 %

Error de conjunto 0.007 m ✓	
Solapamiento 52 % ✓	Fuerza 75 % ✓
Nube a nube	Error de diana

Resultados de error de enlace

1 Vista general

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 1	E1	E2	58 %	0.005 m
Enlace 2	E2	E3	54 %	0.007 m
Enlace 3	E3	E4	53 %	0.004 m
Enlace 4	E4	E5	47 %	0.010 m
Enlace 5	E5	E6	47 %	0.008 m
Enlace 6	E3	E7	58 %	0.005 m
Enlace 7	E7	E8	66 %	0.004 m
Enlace 8	E8	E9	58 %	0.005 m
Enlace 9	E9	E10	58 %	0.008 m
Enlace 10	E10	E11	62 %	0.010 m
Enlace 11	E11	E12	56 %	0.009 m
Enlace 12	E10	E13	56 %	0.007 m
Enlace 13	E13	E14	54 %	0.009 m
Enlace 14	E10	E17	52 %	0.005 m
Enlace 15	E10	E15	52 %	0.007 m
Enlace 16	E16	E17	68 %	0.005 m
Enlace 17	E15	E16	65 %	0.006 m
Enlace 18	E15	E17	45 %	0.004 m
Enlace 19	E5	E18	46 %	0.008 m
Enlace 20	E2	E19	54 %	0.005 m
Enlace 21	E4	E19	48 %	0.007 m
Enlace 22	E14	E15	40 %	0.011 m
Enlace 23	E12	E17	49 %	0.011 m
Enlace 24	E1	E19	43 %	0.005 m
Enlace 25	E3	E18	43 %	0.009 m
Enlace 26	E4	E7	63 %	0.006 m
Enlace 27	E2	E7	46 %	0.007 m
Enlace 28	E4	E8	56 %	0.005 m
Enlace 29	E2	E8	48 %	0.007 m
Enlace 30	E9	E11	52 %	0.012 m
Enlace 31	E9	E13	52 %	0.008 m
Enlace 32	E8	E13	46 %	0.009 m

Enlace 33	E8	E11	50 %	0.006 m
Enlace 34	E1	E3	49 %	0.005 m
Enlace 35	E18	E19	48 %	0.006 m
Enlace 36	E4	E18	47 %	0.005 m
Enlace 37	E3	E5	34 %	0.010 m
Enlace 38	E3	E19	52 %	0.005 m
Enlace 39	E6	E18	32 %	0.010 m
Enlace 40	E3	E8	59 %	0.005 m
Enlace 41	E8	E10	63 %	0.006 m
Enlace 42	E11	E17	55 %	0.005 m
Enlace 43	E13	E15	57 %	0.006 m
Enlace 44	E10	E16	57 %	0.010 m
Enlace 45	E13	E16	48 %	0.007 m
Enlace 46	E11	E16	56 %	0.012 m

2 Detalles

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 1	E1	E2	58 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 2	E2	E3	54 %	0.007 m
		Nube a nube		0.007 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 3	E3	E4	53 %	0.004 m
		Nube a nube		0.004 m

		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 4	E4	E5	47 %	0.010 m
		Nube a nube		0.010 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 5	E5	E6	47 %	0.008 m
		Nube a nube		0.008 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 6	E3	E7	58 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 7	E7	E8	66 %	0.004 m
		Nube a nube		0.004 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 8	E8	E9	58 %	0.005 m

			Nube a nube	0.005 m
			Diana	Error medio de diana: --
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 9	E9	E10	58 %	0.008 m
			Nube a nube	0.008 m
			Diana	Error medio de diana: --
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 10	E10	E11	62 %	0.010 m
			Nube a nube	0.010 m
			Diana	Error medio de diana: --
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 11	E11	E12	56 %	0.009 m
			Nube a nube	0.009 m
			Diana	Error medio de diana: --
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 12	E10	E13	56 %	0.007 m
			Nube a nube	0.007 m
			Diana	Error medio de diana: --
Nombre de	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.

enlace				
Enlace 13	E13	E14	54 %	0.009 m
		Nube a nube		0.009 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 14	E10	E17	52 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 15	E10	E15	52 %	0.007 m
		Nube a nube		0.007 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 16	E16	E17	68 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 17	E15	E16	65 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 18	E15	E17	45 %	0.004 m
		Nube a nube		0.004 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 19	E5	E18	46 %	0.008 m
		Nube a nube		0.008 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 20	E2	E19	54 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 21	E4	E19	48 %	0.007 m
		Nube a nube		0.007 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 22	E14	E15	40 %	0.011 m
		Nube a nube		0.011 m
		Diana	Error medio de	--

Diana

diana: --

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 23	E12	E17	49 %	0.011 m
		Nube a nube		0.011 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 24	E1	E19	43 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 25	E3	E18	43 %	0.009 m
		Nube a nube		0.009 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 26	E4	E7	63 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 27	E2	E7	46 %	0.007 m

Nube a nube

0.007 m

Diana

Error medio de
diana:

--

**Nombre de
enlace**

Estacionamiento 1

Estacionamiento 2

Solapamiento

Error medio Abs.

Enlace 28

E4

E8

56 %

0.005 m

Nube a nube

0.005 m

Diana

Error medio de
diana:

--

**Nombre de
enlace**

Estacionamiento 1

Estacionamiento 2

Solapamiento

Error medio Abs.

Enlace 29

E2

E8

48 %

0.007 m

Nube a nube

0.007 m

Diana

Error medio de
diana:

--

**Nombre de
enlace**

Estacionamiento 1

Estacionamiento 2

Solapamiento

Error medio Abs.

Enlace 30

E9

E11

52 %

0.012 m

Nube a nube

0.012 m

Diana

Error medio de
diana:

--

**Nombre de
enlace**

Estacionamiento 1

Estacionamiento 2

Solapamiento

Error medio Abs.

Enlace 31

E9

E13

52 %

0.008 m

Nube a nube

0.008 m

Diana

Error medio de
diana:

--

**Nombre de
enlace**

Estacionamiento 1

Estacionamiento 2

Solapamiento

Error medio Abs.

Enlace 32	E8	E13	46 %	0.009 m
		Nube a nube		0.009 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 33	E8	E11	50 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 34	E1	E3	49 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 35	E18	E19	48 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 36	E4	E18	47 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 37	E3	E5	34 %	0.010 m
		Nube a nube		0.010 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 38	E3	E19	52 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 39	E6	E18	32 %	0.010 m
		Nube a nube		0.010 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 40	E3	E8	59 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 41	E8	E10	63 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--

Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 42	E11	E17	55 %	0.005 m
		Nube a nube		0.005 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 43	E13	E15	57 %	0.006 m
		Nube a nube		0.006 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 44	E10	E16	57 %	0.010 m
		Nube a nube		0.010 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 45	E13	E16	48 %	0.007 m
		Nube a nube		0.007 m
		Diana	Error medio de diana:	--
Nombre de enlace	Estacionamiento 1	Estacionamiento 2	Solapamiento	Error medio Abs.
Enlace 46	E11	E16	56 %	0.012 m
		Nube a nube		0.012 m

Diana

Error medio de
diana:

--