

Máster Oficial Interuniversitario



UNIVERSIDAD
DE
CORDOBA

Representación y Diseño
en Ingeniería y Arquitectura

Trabajo Fin de Máster

**Cloud-to-BIM-to FEM: Combinación de
fotogrametría UAV, HBIM y análisis estructural
FEM para evaluar el diseño del Acueducto de
los Veinte Ojos de la rambla de Carcauz**

José Manuel
Casimiro Bernárdez

Curso | 2021-2022
Convocatoria | Julio

Director/es:

Patricio Jesús Martínez Carricondo
Francisco Agüera Vega

Resumen

El Acueducto de los Veinte Ojos es una obra de ingeniería hidráulica con varios siglos de historia que pronto será declarada Bien de Interés Cultural (BIC). Las irregularidades geométricas, la heterogeneidad de sus materiales o su accesibilidad, suponen un desafío para la simulación estructural de este tipo de monumentos.

Los recientes avances en el campo de la fotogrametría UAV, el desarrollo de modelos BIM y la potencia de los ordenadores actuales para resolver modelos de elementos finitos, permiten abordar la labor de reconstrucción, protección y conservación de nuestro patrimonio desde una perspectiva mucho más precisa, ágil y motivadora.

En el presente trabajo, se aplica la innovadora metodología Cloud-to-BIM-to-FEM, capaz de convertir modelos BIM, generados a partir de nubes de puntos, en modelos de elementos finitos. La obtención de la nube de puntos se ha ejecutado mediante fotogrametría UAV llevando a cabo un levantamiento 3D del estado actual del acueducto y su entorno. La nube de puntos obtenida ha servido como base para la generación de un modelo HBIM que representa con precisión la geometría del acueducto (Cloud-to-BIM). El modelo HBIM se ha transformado en un modelo de elementos finitos que respeta la singularidad del monumento sin excesivas simplificaciones geométricas (BIM-to-FEM). Finalmente se deducen diversas consideraciones sobre la estabilidad del conjunto y su comportamiento estructural ante acciones como el viento o el sismo.

Palabras clave. Fotogrametría UAV, Nube de puntos, HBIM, FEM, Análisis estructural, Patrimonio Histórico.



Abstract

The Twenty Eyes Aqueduct is a monumental hydraulic structure with several centuries of history that will soon be declared a Site of Cultural Interest (BIC). The geometric irregularities, the heterogeneity of its materials or its accessibility, pose a challenge for the structural simulation of this type of monuments.

Recent advances in the area of UAV photogrammetry, the development of BIM models and the power of today's computers to solve finite element models, allow us to approach the task of reconstruction, protection and conservation of our heritage from a much more precise, fast and motivating perspective.

In this study, the innovative Cloud-to-BIM-to-FEM methodology is applied, capable of converting BIM models, generated from point clouds, into finite element models.

Obtaining the point cloud has been possible using UAV photogrammetry, carrying out a 3D survey of the current state of the aqueduct and its surroundings. The point cloud obtained has served as the basis for generating a HBIM model that accurately represents the geometry of the aqueduct (Cloud-to-BIM). The HBIM model has been transformed into a finite element model that respects the singularity of the monument without excessive geometric simplifications (BIM-to-FEM). Finally, different considerations are deduced about the stability of the aqueduct and its structural behavior by applying loads such as wind or earthquake.

Keywords. UAV Photogrammetry, Point Cloud, HBIM, FEM, Structural simulation, Cultural Heritage.



ÍNDICE

1.	Introducción	1
2.	Materiales y métodos.....	4
2.1	Situación.....	5
2.2	Información Histórica.....	6
2.3	Descripción arquitectónica y estructural	9
2.4	Levantamiento del estado actual del acueducto mediante fotogrametría UAV	10
2.4.1	Levantamiento topográfico previo para posterior georreferenciación de productos fotogramétricos	10
2.4.2	Adquisición de imágenes	11
2.4.3	Proceso fotogramétrico	13
2.5	Modelado 3D usando la metodología HBIM	15
2.6	Validación del ajuste entre la nube de puntos y el modelo HBIM.....	17
2.7	Del modelo BIM al modelo de elementos finitos FEM	17
2.7.1	Características de los materiales.....	19
2.7.2	Cargas.....	20
2.7.3	Combinación de acciones	21
2.7.4	Condiciones de contorno.....	22
3.	Resultados	23
4.	Discusión	30
4.1	Precisión del proyecto fotogramétrico	30
4.2	Uso de imágenes oblicuas.....	30
4.3	Precisión del modelo HBIM	30
4.1	Precisión del modelo FEM	31
4.2	Comportamiento estructural del acueducto	31
5.	Conclusiones	33
6.	Referencias.....	34



1. Introducción

El acercamiento tradicional a la modelización y simulación estructural de construcciones históricas presenta numerosas dificultades como por ejemplo la adquisición de datos geométricos en campo, la precisión de los modelos 3D resultantes o la excesiva simplificación de los modelos estructurales debido a la complejidad geométrica de la obra en estudio. Sin embargo, los recientes avances en fotogrametría a partir de imágenes captadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV), el desarrollo de modelos integrados BIM (Building Information Modeling) y la mejora del rendimiento computacional de los ordenadores actuales para simular el comportamiento estructural de construcciones complejas, facilitan enormemente la labor de reconstrucción, protección y conservación de nuestro patrimonio.

Con la progresiva popularización del uso de UAV, más conocidos como drones, campos como el de la ingeniería y la arquitectura han aprovechado la oportunidad de obtener un alto grado de precisión en la información recogida mediante vuelos fotogramétricos con UAV, y solucionar las limitaciones de la tecnología tradicional para la reconstrucción de edificaciones u obras civiles que forman parte de nuestro patrimonio histórico (Guo et al., 2022).

Asimismo, el gran desarrollo experimentado tanto en los ordenadores como en los softwares que permiten la modelización en tres dimensiones (3D), ha supuesto un medio perfecto para la reconstrucción virtual, conservación y exposición al público en general de nuestro patrimonio cultural (El-Hakim et al., 2004; Galeazzi, 2017; Remondino, 2011; Bakirman et al., 2020; Chun et al., 2020). De hecho, en el año 1985 la UNESCO incluyó en la Word Heritage List (Lista de Patrimonio Mundial) la reconstrucción virtual como uno de los procedimientos para la conservación y preservación de edificaciones de interés cultural. Además, en 2006, el London Charter expuso los principios para la investigación y divulgación de visualizaciones 3D en el campo del patrimonio (Beacham et al., 2006; Denard, 2016).

Desde el inicio del siglo XXI se han producido grandes avances relacionados con los escáneres laser terrestres (TLS) (Rüther et al., 2009; Lemmens, 2011) y la fotogrametría UAV (Colomina y Molina, 2014), lo que facilita en gran medida la generación de modelos 3D. Gracias a la combinación de los ordenadores actuales y la fotogrametría, podemos utilizar imágenes capturadas a distintas alturas y utilizando diferentes ángulos (Fernández et al., 2014), para obtener modelos 3D basados en nubes de puntos obtenidas a partir de dichas imágenes. Numerosas aplicaciones informáticas permiten realizar este proceso, incluso si las fotografías han sido tomadas con cámaras convencionales.

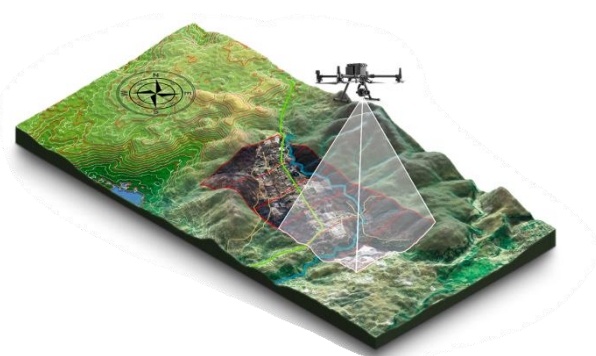


Figura 1. Fotogrametría UAV.

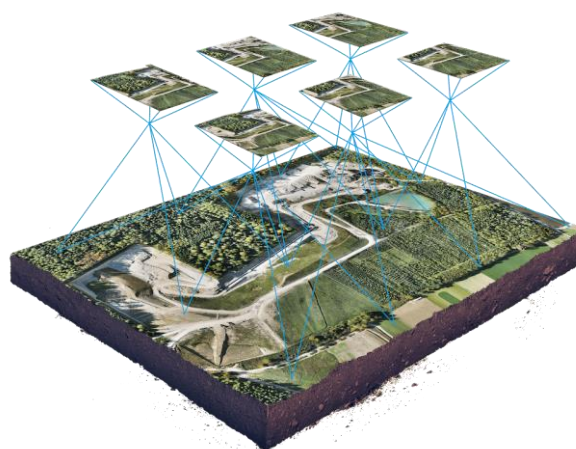
Fuente: MapaMedia (2022)

Esta transformación es posible gracias a una técnica de bajo coste denominada Structure from Motion (SfM), que tiene sus orígenes en el campo de la visualización por



ordenador, capaz de transformar un objeto 2D a 3D con sólo unas cuantas fotografías desde diferentes puntos de vista (Tomás et al., 2016).

El algoritmo SfM proporciona una nube de puntos que representa el objeto en estudio, así como la posición y orientación de las fotografías tomadas por la cámara. SfM integra técnicas estereoscópicas a partir de diferentes vistas (Multiview Stereo Matching, MVS), que derivan en una estructura 3D a través del solape entre fotografías obtenidas en múltiples localizaciones y ángulos, que se relacionan entre sí mediante una transformación de formas invariantes de escala (SIFT) y un ajuste de bloque (Bundle adjustment). Tras procesar este algoritmo, se obtiene



*Figura 2. Fotogrametría UAV.
Fuente: Wingtra (2022)*

una nube de puntos sin escala y en coordenadas relativas. Habitualmente se tiene la necesidad de georreferenciar la misma a un sistema de referencia oficial, ya sea por métodos directos a través de los datos de geolocalización de las fotografías o por métodos indirectos usando puntos de control en el terreno (Ground Control Point, GCP) (Hugenholtz et al., 2016). A diferencia de la fotogrametría clásica aérea, SfM simplifica el proceso eliminando la necesidad de una exhaustiva calibración de la cámara y de la planificación de la ruta de vuelo.

Según diferentes estudios, los resultados obtenidos a través del algoritmo SfM permiten obtener información 3D con precisiones similares a aquellos obtenidos mediante TLS (Martínez Carricondo et al., 2020a; Korumaz et al., 2017). La morfología del elemento o área de estudio, así como su accesibilidad, define la técnica más conveniente: TLS o fotogrametría UAV (Fernández y Gutiérrez, 2017). De hecho, uno de los principales problemas de los TLS son las áreas ocultas a las que no se puede acceder. Para estos casos, los UAV facilitan de una forma eficiente y económica la recolección de la información (Achille et al., 2015). Además, una sencilla manera de mejorar los resultados obtenidos con fotogrametría SfM es utilizar fotografías oblicuas, permitiendo visualizar los detalles que permanecen escondidos en imágenes vistas en planta, sin la necesidad de usar fotografías terrestres (Vetrivel et al., 2015; Lin et al., 2015).

Una vez que se disponga de la nube densa de puntos o la malla 3D del conjunto en estudio, esta servirá de base para el desarrollo del modelo BIM. BIM es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un edificio u obra de ingeniería civil durante su ciclo de vida (buildingSMART Spanish Chapter, 2022). Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes, reduciendo tiempos y recursos en el diseño, la construcción y la gestión del activo, además de minimizar los errores (Azhar, 2011). El BIM supone la evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano, ya que



incorpora información geométrica (3D), de tiempos (4D), de costes (5D), ambiental (6D) y de mantenimiento (7D) (Charef et al., 2018). El BIM se basa en diversos estándares internacionales (UNE, 2020).

La metodología BIM se viene utilizando desde principios de siglo hasta nuestros días estando enfocada principalmente al sector de la construcción (Ullah et al., 2019), aunque recientemente está en auge en el área de gestión y documentación del patrimonio histórico (Pocobelli et al., 2018; Logothetis et al., 2015).

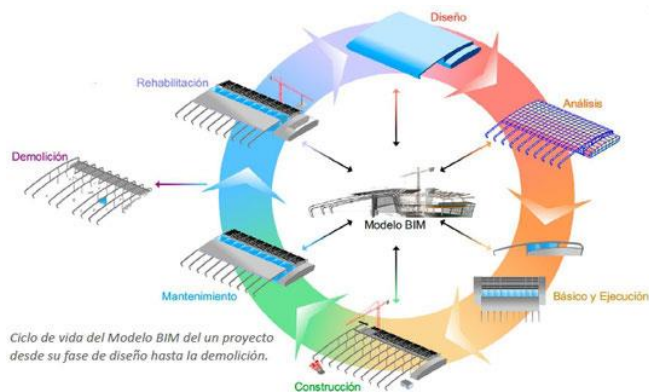


Figura 3. Ciclo de vida de un Modelo BIM.

Fuente: buildingSMART Spain (2022)

Cuando utilizamos la metodología BIM para digitalizar la información existente sobre obras artísticas o históricas de valor patrimonial, nos referimos a este método como Historic Building Information Model (HBIM). Este término fue usado por primera vez por el profesor Maurice Murphy del Instituto Tecnológico de Dublín (Murphy et al., 2009). El objetivo principal del HBIM es poder obtener modelos BIM de construcciones existentes, modeladas a partir de objetos paramétricos que contienen información de diversa naturaleza y que pueden ser fácilmente actualizados, reemplazados o agregados. La implementación del HBIM sin duda facilita la divulgación del patrimonio construido. Sin embargo, la aplicación de esta metodología al campo de la reconstrucción del patrimonio depende de las peculiaridades de cada edificio, debido a las irregularidades que puede presentar en su morfología y los elementos que lo conforman. Una dificultad a superar es que los objetos paramétricos convencionales existentes por defecto en los softwares BIM no pueden ser utilizados, y es necesario la creación de nuevas librerías de objetos paramétricos, con la consiguiente inversión en tiempo que esto requiere.

Para la creación de estos modelos, aparte de la información histórica del edificio de la que se disponga, son de gran ayuda los datos aportados por el uso de TLS o fotogrametría, ayudando a la digitalización del modelo. Este proceso se denomina "Cloud-to-BIM" o "Scan-to-BIM" y permite obtener una reconstrucción y visualización realista de la construcción modelada (Angelini et al., 2017; Rodríguez Moreno, et al., 2018; Martínez Carricondo et al., 2020b, 2021). La calidad del modelo estará relacionada con el nivel de aproximación que se quiera alcanzar durante la fase de modelado. En el caso de elementos del patrimonio en estado ruinoso, este nivel también dependerá de la información existente sobre la geometría y otras características originales.

Uno de los principales retos que se presentan en la actualidad en relación a la modelización digital en 3D de nuestro patrimonio, es poder realizar una simulación del comportamiento estructural de la construcción, mediante modelos de elementos finitos (FEM). El proceso de transformación de un modelo BIM o HBIM a un modelo estructural de elementos finitos se denomina "BIM-to-FEM" (Barazzetti et al., 2015; Bassier et al., 2016).



De hecho, gracias al creciente desarrollo en interoperabilidad entre modelos BIM, un mismo modelo puede ser utilizado para diversos propósitos, en particular, el campo de las estructuras es uno de ellos. Existen plugins específicos BIM para la generación de modelos de elementos finitos. El intercambio de información entre un modelo 3D

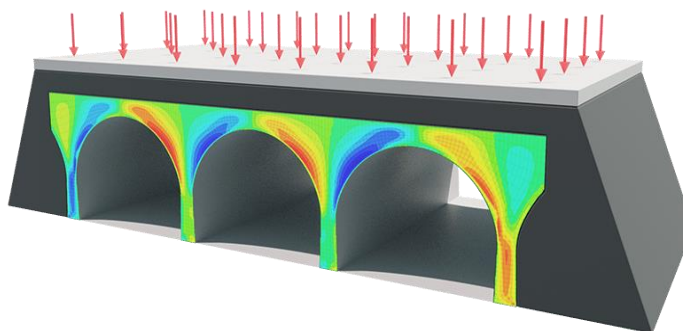


Figura 4. Análisis Modelo FEM.

Fuente: DegreeTutors (2022)

arquitectónico y su correspondiente modelo FEM puede parecer una operación trivial, pero cuando las geometrías tienen cierta complejidad, la interoperabilidad entre softwares que existe hoy en día no permite la consecución de discretizaciones compatibles con elementos legibles por los principales programas de cálculo. Por este motivo es muy importante que, desde el inicio de la fase de modelado, el analista tenga en cuenta no solo la reproducción fidedigna del conjunto, sino el cumplimiento de los requerimientos necesarios para la generación de un correcto modelo FEM, distinguiendo aquellas pequeñas irregularidades y complejidades que puedan influir en el comportamiento estructural de aquellas que no son determinantes (Crespi et al., 2015).

El objetivo del presente trabajo es desarrollar, a partir de una nube de puntos obtenida con fotogrametría UAV, un modelo HBIM del Acueducto de los Veinte Ojos en la rambla de Carcauz, situado entre los términos municipales de Felix y Vúcar (Almería), que a su vez sirva para obtener un modelo de elementos finitos FEM que permita analizar a grandes rasgos su comportamiento estructural, así como poner la primera piedra para el estudio de futuras intervenciones de rehabilitación y conservación. Este proceso se resume en la innovadora metodología en dos pasos denominada Cloud-to-BIM-to-FEM (Barazzetti et al., 2015). Si bien como veremos más adelante, aún quedan grandes pasos que dar para conseguir un flujo de trabajo sólido que solvante las dificultades que se siguen encontrando en esta metodología.

2. Materiales y métodos

La metodología aplicada para la realización de este trabajo parte del estudio de la información histórica y del emplazamiento del Acueducto de Carcauz. A su vez, se diseña el levantamiento del estado actual del acueducto, que en este caso se ha realizado mediante fotogrametría UAV. A partir de esta información se obtiene el modelo HBIM del elemento patrimonial, utilizando softwares específicos para el tratamiento de la información fotogramétrica (Agisoft Metashape) y para el diseño del modelo HBIM (Autodesk Revit 2022). La veracidad del modelo BIM se ha chequeado por medio de un software de validación geométrica del modelo (CloudCompare). Finalmente, se traduce la geometría 3D del modelo BIM a elementos "Shell" (elementos finitos 2D) legibles por el software utilizado para el análisis estructural (SAP2000), en el cual se evalúa el comportamiento estructural del acueducto.

El flujo de trabajo utilizado para el desarrollo del presente documento se resume en la Figura 5. En ella también se incluyen posibles líneas futuras de trabajo, como pueden ser la utilización del modelo HBIM para la reconstrucción virtual del acueducto con fines divulgativos o la implementación en el cálculo estructural del comportamiento plástico no lineal de los materiales pétreos que componen el acueducto.

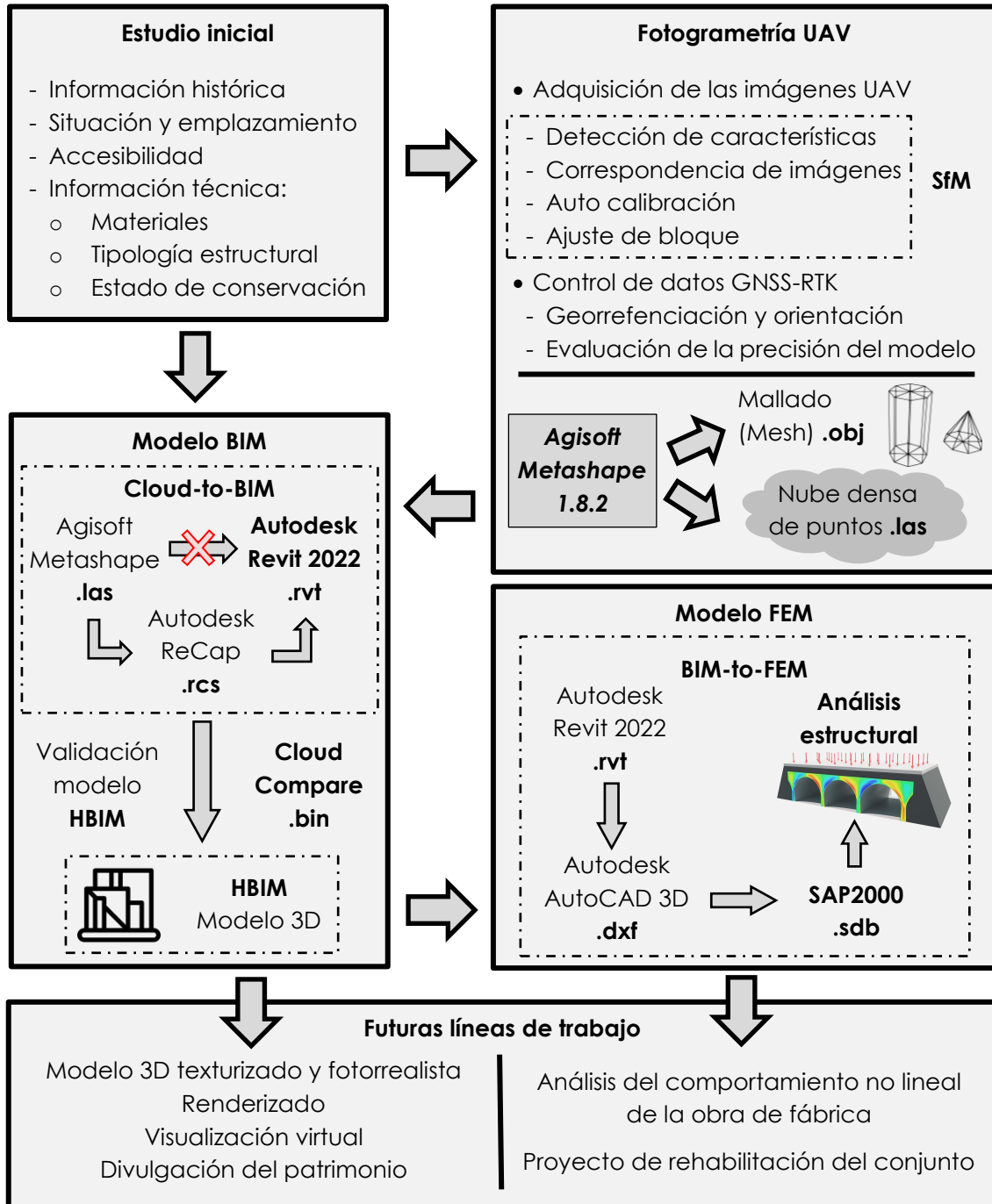


Figura 5. Flujo de trabajo para el desarrollo de esta investigación.

2.1 Situación

El Acueducto de Carcauz es un complejo hidráulico que recorre a lo largo de cerca de 3,2 kilómetros las laderas de la rambla de Carcauz-Casablanca. Está situado en la



vertiente meridional de la Sierra de Gádor, en el sureste de España, en la provincia de Almería, en el límite entre los términos municipales de Vícar y Felix. Esta obra de ingeniería fue creada para transportar el agua desde los afloramientos de las partes altas del macizo montañoso hasta la llanura costera del Campo de Dalías, e irrigar las tierras de Casablanca y Cuernotoro, donde se han localizado sendas *villae* romanas, horizonte cultural al que cabe inscribirlo (Junta de Andalucía, 2022).

Los canales que lo componen discurren a lo largo del trazado sin cambiar de cuenca, por lo que no se hace necesario ningún túnel, como sí se ha observado en otras localizaciones. Estos se han ejecutado excavados en la tierra o en la roca y arcadas o arcuaciones. Por otra parte, es habitual que la zona de almacenamiento y posterior distribución de agua en acueductos romanos en entornos rurales, en este caso la Balsa del Molino, se encuentre por encima de las *villae* y no ocupe tierras cultivables (Junta de Andalucía, 2022).

Al norte del complejo hidráulico se encuentra el sistema de captación (*captus aquae*) en los manantiales del cauce alto de la rambla de Carcauz. No se han detectado captaciones subterráneas o de acuíferos, por lo que el punto inicial del canal podría situarse tanto en manantiales como en surgencias en la propia rambla, con suficiente altitud (más de 600 m.s.n.m.) para que el agua descienda por gravedad a la zona de uso. Como se ha comentado uno de los lugares de almacenamiento de agua es la Balsa del Molino en Felix, donde el agua se encauza mediante un canal (*specus*) encajado en los desfiladeros de roca, obligando a la construcción de monumentales obras de ingeniería hidráulica (Junta de Andalucía, 2022).

Esta investigación se centra en una de estas obras, el Acueducto de los Veinte Ojos situado dentro del complejo hidráulico descrito anteriormente. Las coordenadas en proyección UTM Huso 30 N y datum ETRS89 en el área donde se sitúa el acueducto son:

- Suroeste (526.450, 4.075.645)
- Noreste (526.470, 4.075.688)

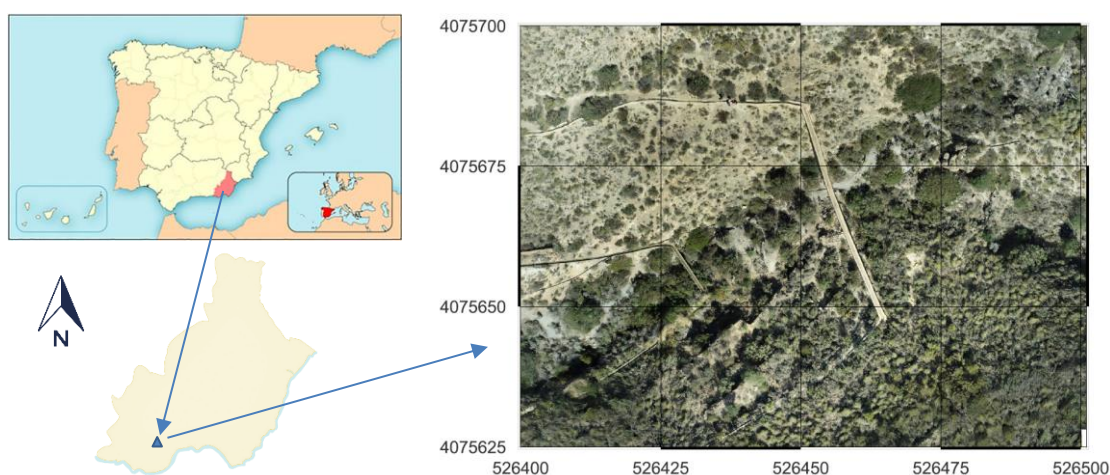


Figura 6. Localización del acueducto objeto de estudio

2.2 Información Histórica

En la época altoimperial a partir del siglo I d.C, el Campo de Dalías tuvo un notable incremento poblacional tras la conquista romana, no documentado en épocas

anteriores, formando parte del *territorium* de la *cívitas* de Murgi. Además de este importante asentamiento, encontramos el de *vicus* o aldea de Turaniana, el puerto de Guardias Viejas y otros asentamientos de menor dimensión cuya economía se sustentaba en la producción de cereales y los cultivos de olivares, legumbres y productos de huerta (Junta de Andalucía, 2022).

La Sierra de Gádor fue un importante foco minero, con un notable desarrollo tras la conquista romana, lo que supuso un aumento de población en la zona. Este hecho provocó la necesidad de aumentar la productividad de las cosechas, y por ende, la búsqueda de un mayor aporte hídrico en los cultivos de regadío de la zona. Para la evolución de estos grandes asentamientos rurales, se dictaron pautas relacionadas con los recursos hídricos por los propios agrónomos, ya que para ellos era imprescindible que una villa contara con manantiales naturales y cursos de agua en su entorno (Junta de Andalucía, 2022).

La construcción del *aquaeductus* de la rambla de Carcauz está vinculado a las poblaciones situadas en la zona meridional de la Sierra de Gádor, las *villae* romanas de Casablanca y Cuernotoro, donde los desfiladeros de la rambla se abren a los llanos del Campo de Dalías (Junta de Andalucía, 2022).



*Figura 7. Acueducto de los Veinte Ojos.
Fuente: Filming Almería (2022)*

La red de acequias y las áreas de regadío se fueron expandiendo a partir de la invasión musulmana en el año 955 y el establecimiento de las alquerías serranas de Felix y Enix, y de Vícar a pie de monte. En el siglo XIV, el escritor granadino Ibn al Jatib, menciona los sistemas de riego del Campo de Dalías impulsados por Jairán.

Siglos más tarde, esta obra de ingeniería hidráulica tendría como una misión adicional aparte del riego de estas tierras, la de mover los molinos del paraje de Casablanca tras la institución de un mayorazgo tras la rebelión morisca, y un marquesado en 1712.

Una de las fuentes que dan testimonio de la antigüedad de esta construcción es el Memorial del Marqués de Casablanca (1804) y el Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de Ultramar de Pascual Madoz, en el cual se nombra al «acueducto romano por Casablanca» para enumerar los límites de la Diócesis de Almería (Junta de Andalucía, 2022).

Conocemos algunos datos históricos de este conjunto hidráulico a través de un pleito que se entabló en 1782 por la propiedad del cortijo de Casablanca entre un caballero Veinticuatro de Granada, Rodrigo Luis de Castro, y un matrimonio vecino de Vícar y Roquetas, Pedro León Fernández y su mujer. En este simbólico combate entre la pequeña nobleza y la ascendente burguesía se aportaron pruebas y testimonios orales de gran interés para la historia de la comarca y, especialmente, para los acueductos de la rambla de Carcauz de los que recogen obras de diferentes fechas. La más antigua data la acequia como del tiempo de los moriscos según un testimonio oral. En un documento de 1718 se recoge el valor de los materiales gastados unos años antes en la reedificación de la acequia y acueducto que siguen al molino de Casablanca realizada por el ingeniero Pedro Ical rectificando una obra anterior de trazado erróneo. En la década del 1740 se realizó un nuevo trazado de la conducción y la limpieza y acondicionamiento de la balsa, y la última reforma corresponde a mediados del siglo XVIII, agrandándose la balsa para ampliar la zona de regadío.

Aunque se ha asignado a los acueductos documentados un origen romano, esta datación resulta controvertida o, al menos, dudosa, pues se ha basado únicamente en la cronología de los yacimientos circundantes. Las características constructivas (mampostería hormigonada, presencia de mechinales, revestimiento de estuco) son más propias de la Edad Media islámica, aunque pudiera existir ya en épocas romana y ser reparado o ampliado posteriormente (Gil Albarracín, 1983).

La infraestructura de riego, con seguridad, anterior a los molinos, ha sido ampliamente descrita y estudiada en sus aspectos históricos y constructivos (Gil Albarracín, 1983; Rodríguez López y Cara Barrionuevo, 1989; Vázquez Guzmán, 2014; López Medina, 1995). Otros historiadores datan su construcción en el siglo XVIII (Rodríguez López y Cara Barrionuevo, 1989) e indican que apenas existen referencias históricas sobre estos molinos, y aunque se tiene la certeza de su posible existencia desde la Edad Media, la primera cita documentada data de 1860.

Todo el conjunto hidráulico completo, minas de agua, cauce, los tres acueductos, las balsas y los molinos de Casablanca, estaban a pleno rendimiento en el siglo XVIII, y se mantuvo en funcionamiento hasta principios del siglo XX, quedando posteriormente en ruina progresiva. A día de hoy, la mayor parte del caudal que recogía la acequia es transportado por tuberías modernas de plástico, en muchas ocasiones ocupando el canal original.

Se puede considerar uno de los elementos de la ingeniería civil popular de mayor valor de la comarca, aunque su estado de conservación es bastante mejorable.

Recientemente, 23 de junio de 2022, la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico ha incoado el procedimiento para inscribir en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz (CGPHA), como Bien de Interés Cultural (BIC), con la tipología de Monumento, el mayor grado de protección.



2.3 Descripción arquitectónica y estructural

Por encima del cauce de un afluente de la rambla de Carcauz se vislumbra la arcada popularmente llamada Acueducto de los Veinte Ojos. Con una longitud que alcanza los 42 m y una altura máxima de 9,50 m sobre el cauce del afluente, se sitúa estratégicamente en un estrechamiento del barranco este monumento, capaz de mantener la cota de la lámina de agua a una altura prácticamente constante de 370,8 m.s.n.m. El nombre de este acueducto deriva de los 20 arcos que presenta en su alzado. En él podemos distinguir las siguientes partes (Junta de Andalucía, 2022):

- La base y sus cimientos: son los afloramientos rocosos de naturaleza caliza del barranco.
- El alzado o la arcada: presenta tres niveles, y dispone de 20 bóvedas formadas por arcos de medio punto.



*Figura 8. Acueducto de los Veinte Ojos.
Fuente: García (2022)*

El agua del cauce atraviesa la pared vertical del acueducto por el arco situado en el primer nivel, justo en el centro de la construcción. Presenta una altura aproximada de 1,70 m desde el suelo hasta la «clave» y 2,30 m de luz. Sobre él se construye un muro que tiene 1,12 m de altura sobre el arco de medida mínima (Junta de Andalucía, 2022).

Por encima del primer nivel descrito, que se asienta en las paredes de roca caliza del cauce, se define un segundo nivel formado por 7 pilas de sección rectangular de dimensiones que oscilan entre los 1,75-1,96 m de largo por 0,80-1,0 m de ancho. Dichas pilas sustentan 8 arcos de similar altura. Cabe resaltar que el arco central se tuvo que reformar construyendo otro a media altura, aproximadamente a 1 m sobre el muro para dar mayor solidez a la estructura (Junta de Andalucía, 2022).

El tercer nivel está formado por 9 pilas de sección rectangular de unos 60 cm de largo por 0,80-1,0 m de ancho, que sirven de apoyo a 10 arcos y sus muros de

acompañamiento hasta conectarse con las paredes de caliza del barranco. Estos arcos se caracterizan por tener una altura entre 1,05-1,35 m y una luz de entre 2,17-2,58 m, siendo el situado al norte del acueducto el de menor tamaño. Todo parece indicar que se tuvieron que reconstruir en algún momento del pasado, ya sea por los desperfectos causados por el paso del tiempo o la erosión provocada por temblores sísmicos (Junta de Andalucía, 2022).

En la coronación del acueducto encontramos el canal de agua, cuya base tiene una anchura entre 30-40 cm y su altura se sitúa en torno a los 34 cm, hecho que contrasta con los 60 cm que tiene la acequia antes de su entrada a la arcada. Hay que considerar que existe una capa de sedimentos decantada sobre el fondo del canal, pero según lo comentado, pudiera pensarse que este canal se ha modificado posteriormente. Los paramentos de la caja están realizados en mampostería trabada con mortero de cal y presentan un espesor de unos 25 cm en los bordes (Junta de Andalucía, 2022).

2.4 Levantamiento del estado actual del acueducto mediante fotogrametría UAV

2.4.1 Levantamiento topográfico previo para posterior georreferenciación de productos fotogramétricos

Para georreferenciar de una forma precisa el proyecto y poder evaluar la precisión del proceso fotogramétrico llevado a cabo, se realizó un levantamiento topográfico tradicional mediante un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), materializando un total de 14 puntos distribuidos a lo largo del área de estudio (ver Figura 11). Estos puntos consistieron en unas dianas en formato A3 (420 mm x 297 mm) divididas en 4 cuadrantes, dos de color naranja y dos de color negro, tal y como se aprecia en la Figura 9.

Las coordenadas 3D de estas dianas han sido medidas mediante un receptor GNSS trabajando en modo RTK (Real Time Kinematic) y recibiendo correcciones diferenciales de una base situada en el extremo norte del acueducto (Figura 10). Previamente, la base había sido situada y se había obtenido su posición de forma estática mediante correcciones diferenciales procedentes de la Estación de Calar Alto de la Red RAP (Red Andaluza de Posicionamiento) durante un tiempo de 10 minutos. Esta red ofrece un posicionamiento de alta precisión en todo el territorio andaluz a través de servicios gratuitos de correcciones diferenciales y archivos RINEX. En el modo de funcionamiento RTK, tanto la base GNSS como el receptor reciben lecturas de las diferentes constelaciones de satélites, y se diferencia del modo PPK en que existe un enlace de datos constante entre la base y el receptor en tiempo real.



Figura 9. Dianas y receptor GNSS.



Figura 10. Base GNSS.

Tanto el receptor como la base GNSS utilizados fueron sistemas de la marca Emlid Reach RS2. Para las mediciones en modo RTK, este receptor geodésico multibanda proporciona una precisión indicada por el fabricante de ± 7 mm +1 ppm para el RMS horizontal y de ± 14 mm +1 ppm para el RMS vertical. Como la distancia entre la estación base y el área de estudio era de aproximadamente 50 m, los errores horizontales y verticales rondan los 7 y 14 mm.

Como se ha comentado, este levantamiento tiene el posterior objetivo de asegurar una correcta precisión tanto planimétrica como altimétrica de los productos fotogramétricos resultantes.

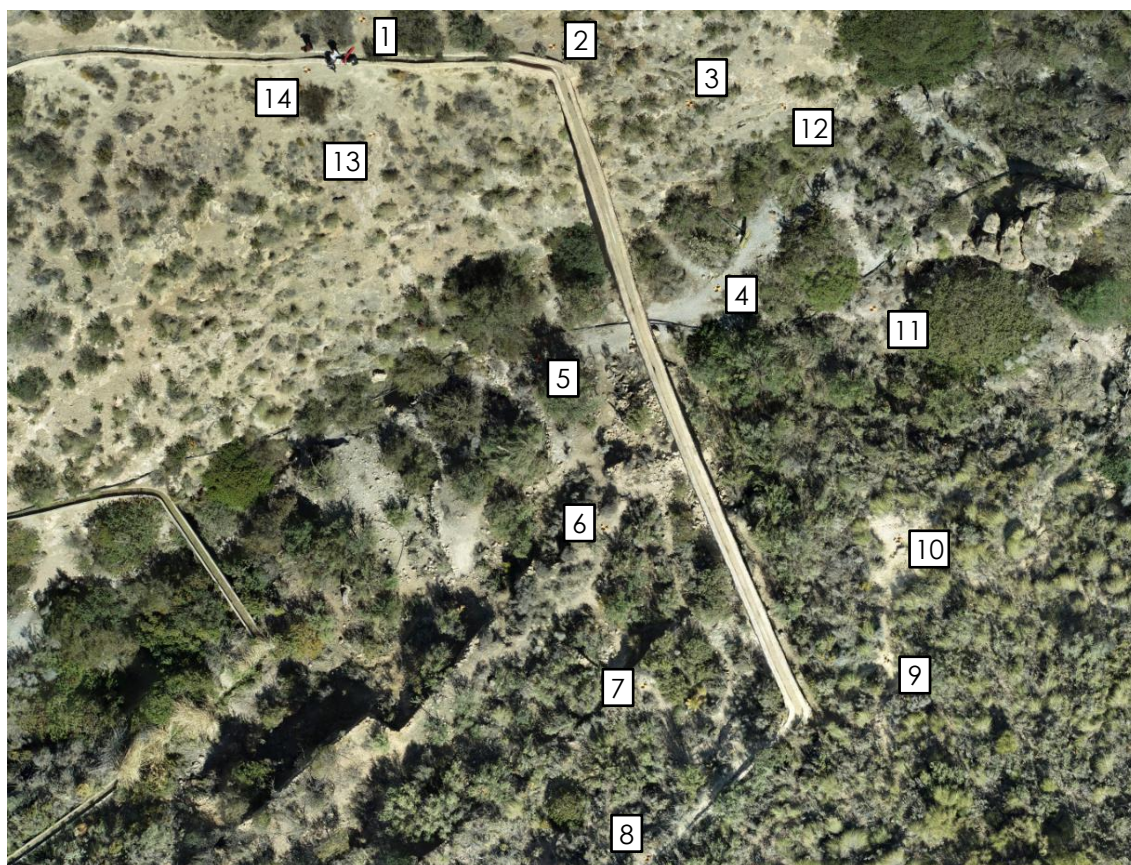


Figura 11. Ortofoto del acueducto y posición de las dianas.

2.4.2 Adquisición de imágenes

Una vez dispuestos los puntos de apoyo se procede a la configuración del plan de vuelo y a la toma de las fotografías por parte del dron. Las imágenes utilizadas en este trabajo han sido tomadas desde un dron DJI Phantom 4 RTK UAV con 4 rotores. Este equipo cuenta con un sistema de navegación mediante GPS y GLONASS. Además, está equipado con un sistema de visión frontal, trasera e inferior que le permite detectar superficies con un patrón definido y una iluminación adecuada, y esquivar obstáculos con un alcance entre 0,2 y 7 m. La cámara Phantom 4 RGB está equipada con un sensor de 20 megapíxeles (5472 x 3648) de 1 pulgada y tiene una apertura ajustable manualmente de F2.8 a F11. El objetivo tiene una distancia focal fija de 8,8 mm y un FOV de 84°.

El vuelo fotogramétrico se planificó y ejecutó de forma automática con la aplicación DJI GS RTK. Dicha aplicación permite la realización de vuelos fotogramétricos 3D de doble cuadrícula lo que garantiza la obtención de fotografías desde diferentes puntos de vista e inclinación del objeto a estudiar. La Figura 12 muestra la trayectoria seguida por el dron durante la realización del vuelo fotogramétrico.

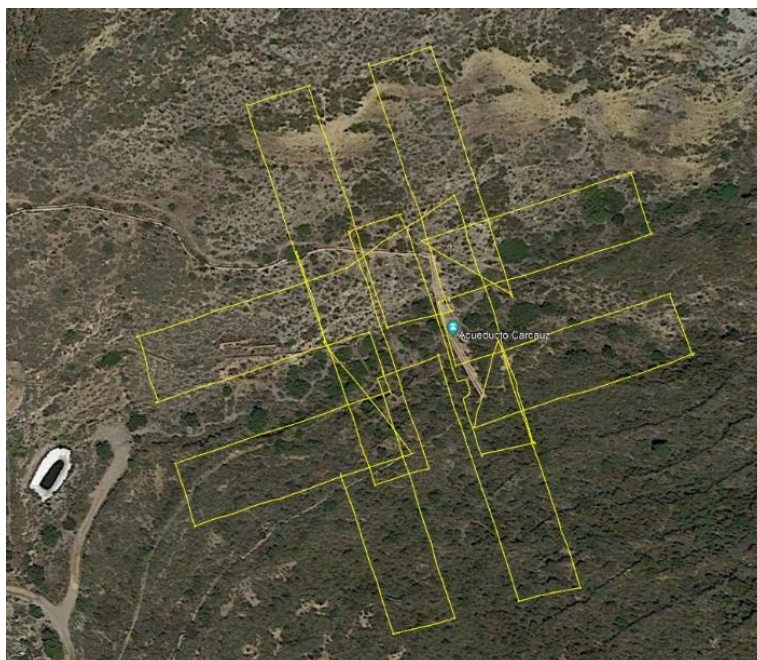


Figura 12. Trayectoria del vuelo planificado.

El vuelo se planificó a 40 metros de altura desde el punto de despegue (situado en la parte norte del acueducto) con un Ground Sample Distance (GSD) equivalente de 1.22 cm/pix y constó de un total de 315 fotografías. Para conseguir una mejor precisión en el proyecto fotogramétrico se configuró el vuelo de forma que tomase tanto imágenes cenitales como oblicuas, con un ángulo de 45°. De acuerdo con la altitud de vuelo, la velocidad del UAV y las condiciones de luz en el momento del vuelo, la velocidad del obturador se ajustó para minimizar el efecto de desenfoque en las imágenes tomadas. La cámara se disparó cada 2 segundos y la velocidad de vuelo se fijó para obtener solapes longitudinales y transversales del 70%.

Una vez finalizado el vuelo y descargadas las fotografías se procedió a corregir el dato de geolocalización de las cámaras para mejorar la precisión. Para ello, el sistema RTK del UAV permite guardar la información de observación por satélite para el postprocesamiento cinemático (PPK). En este caso se usaron, como base de correcciones, los datos RINEX (Receiver Independent Exchange Format) a 1s proporcionados por la Estación de Calar Alto de la Red RAP de Andalucía. Este proceso se realizó a través del software Atygeo V1.8, el cual permite realizar la corrección del metadato de la fotografía a partir del archivo de navegación del dron (.obs) y de los archivos de observaciones y navegación de la base.

Una vez corregidos los datos de geolocalización de las cámaras se llevó a cabo el proceso fotogramétrico mediante el software Agisoft Metashape Professional© versión 1.8.2.

2.4.3 Proceso fotogramétrico

Las principales diferencias que encontramos entre la fotogrametría clásica y la fotogrametría UAV son las siguientes (Meroño, 2022):

Fotogrametría clásica

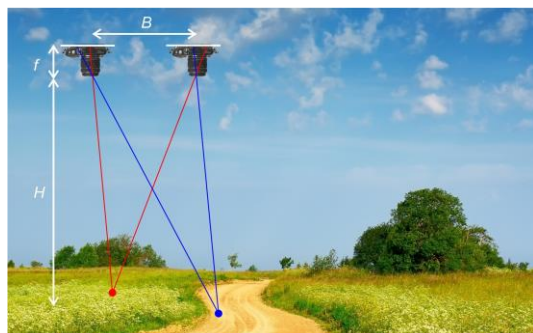


Figura 13. Fotogrametría Clásica.

Fotogrametría UAV



Figura 14. Fotogrametría UAV.

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Plataforma estable: satélite o avión.2. Las imágenes se registran con ángulos y coordenadas precisas definidas según proyecto.3. Sensores métricos y estables.4. Condiciones estables. | <ol style="list-style-type: none">1. Plataforma "no estable" en adquisición.2. Las imágenes se registran con distintos ángulos y distancias respecto al objeto.3. Sensores no métricos.4. Adquisición "desestructurada". |
|--|---|

El proyecto fotogramétrico objeto del presente trabajo ha sido ejecutado mediante el software profesional Agisoft Metashape versión 1.8.2. Este programa, basado en el algoritmo SfM, ha sido utilizado en varios pasos.

En primer lugar, se han alineado todas las fotografías identificando y emparejando puntos homólogos entre fotografías. Durante la ejecución de este proceso, el software estima los parámetros internos y externos para la calibración de la cámara, incluyendo distorsiones radiales no lineales, comenzando por el valor de la distancia focal de la cámara (valor obtenido de los datos EXIF de las fotografías). Para este estudio, este paso se llevó a cabo ajustando la precisión del mismo al nivel medio. Una vez terminado, el programa obtiene una nube de puntos dispersa con la geometría del entorno del acueducto, la posición individual del sensor, la orientación y una estimación de los parámetros de calibración de la cámara. A partir de los datos de geolocalización de las fotografías tomadas por el dron, la nube de puntos resultante resulta georreferenciada de forma directa. Sin embargo, esta georreferenciación es de poca precisión y se requiere el apoyo de los puntos de control GCP para mejorarlo. Al menos serán necesarios 3 puntos de control para mejorar esta precisión (Agüera Vega et al., 2017; Rosnell y Honkavaara, 2012), aumentando la misma al tomar un número mayor de puntos de control. De las 14 dianas establecidas en el trabajo de campo, se utilizarán 7 de ellas (números impares) como puntos de apoyo, y las otras 7 (números pares) servirán como puntos de control de calidad del trabajo realizado, georreferenciando de esta manera la nube de puntos en el datum ETRS89 y la proyección UTM Huso 30N.



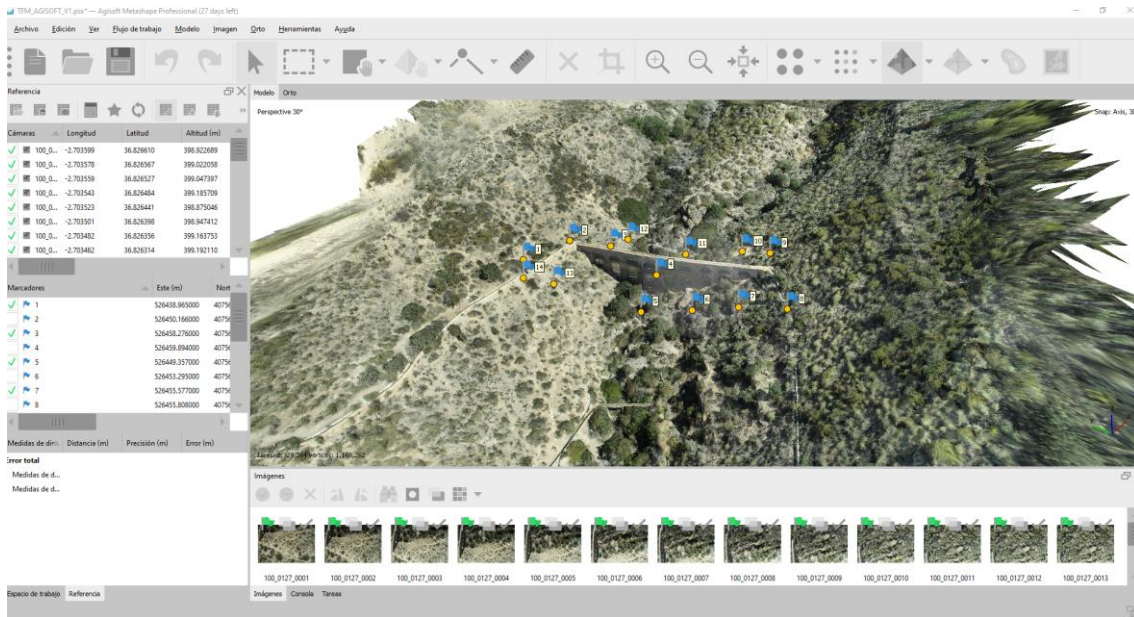


Figura 15. Desarrollo del proceso fotogramétrico en Agisoft Metashape.

Una vez que se le indica al software los puntos de apoyo que se van a usar, se vuelve a optimizar el modelo de calibración de la cámara y se vuelve a ajustar la nube de puntos dispersa obtenida.

Seguidamente se densifica la nube de puntos dispersa creando una nube de puntos densa con 11.779.429 puntos, eliminando manualmente aquellos puntos anómalos que puedan haber aparecido en el modelo. El resultado ha sido una nube de puntos densa con un alto grado de detalle (ver Figura 24).

La Figura 16 muestra los errores obtenidos en los puntos usados para el ajuste del bloque fotogramétrico. Mediante este proceso, la nube de puntos obtenida alcanza precisiones similares a las obtenidas con un escáner láser terrestre (TLS) (Martínez Carricondo et al., 2020a).

A partir de esta nube de puntos densa se pueden obtener distintos productos como: la malla triangulada de la superficie, a la cual se le puede aplicar la textura obtenida a partir de las fotografías realizadas; el Modelo digital de superficies (DSM) y de elevaciones (DEM); una ortofoto del entorno o las coordenadas XYZ en formato .txt de cada punto que conforma la nube densa creada.

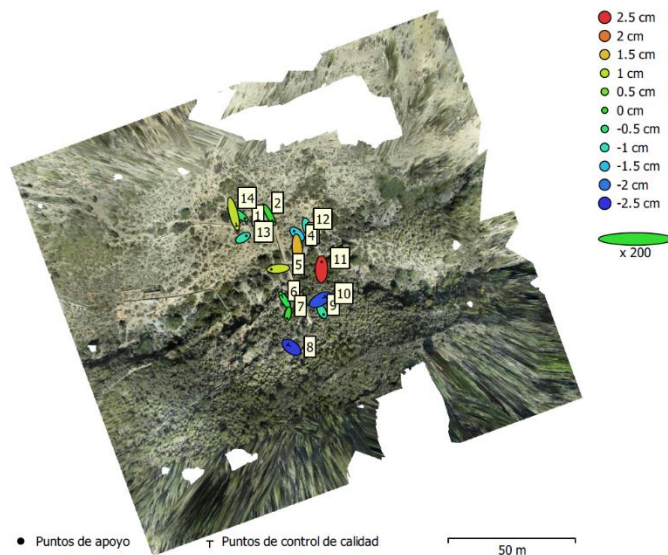


Figura 16. Errores obtenidos en los puntos de apoyo y en los puntos de control de calidad.



Cabe resaltar que se ha realizado una clasificación de la nube de puntos densa, combinando el algoritmo interno de clasificación que viene implementado en el software Agisoft Metashape con la clasificación por medios manuales de algunos puntos, por ejemplo, los pertenecientes al acueducto. Se han realizado 3 grupos de clasificación: terreno, vegetación y acueducto.

Finalmente se ha procedido a exportar en formato .las la nube de puntos clasificados como acueducto, la cual servirá como punto de partida para la generación del modelo HBIM.

2.5 Modelado 3D usando la metodología HBIM

El BIM es un proceso inteligente basado en la generación y control digital de modelos 3D que contienen información de la geometría, de los materiales y de las características funcionales de la construcción en estudio. Una vez creado el modelo BIM, es posible extraer de él numerosa información, desde planos (plantas, alzados, secciones, etc.), mediciones o presupuestos hasta todo tipo de datos técnicos.

El modelado BIM del acueducto ha sido llevado a cabo en el software Autodesk Revit 2022, uno de los softwares BIM más utilizados en el mundo. Este incluye un entorno visual de programación que permite el diseño mediante elementos de dibujo paramétricos. Además, el punto fuerte de esta metodología es la integración en un mismo modelo de diferentes dimensiones, la información geométrica (3D), de tiempos (4D), de costes (5D), ambiental (6D) y de mantenimiento (7D) (Charef et al., 2018), así como la interoperabilidad con diversos softwares y distintas disciplinas (ingeniería de estructuras o instalaciones, contratista, Project Manager, etc.).

El proceso denominado Cloud-to-BIM precisa del uso de un software auxiliar llamado Autodesk ReCap, que nos permite la interconexión entre los softwares Agisoft Metashape y Autodesk Revit 2022. En primer lugar, es necesario importar en Autodesk ReCap la nube de puntos densa



Figura 17. Nube de puntos importada a Autodesk Revit.

obtenida a través de fotogrametría UAV en formato .las, la cual contiene la nube de puntos clasificada como acueducto, para posteriormente convertir el proyecto a formato .rcs, que sí es un formato de nube de puntos legible por Autodesk Revit.

La información incorporada es una nube con miles de puntos y su color RGB asociado, que muestra los detalles del actual acueducto, desde irregularidades en la morfología de las bóvedas de los arcos, los diferentes acabados, variaciones en el espesor de los muros o en su desplome a lo largo de la directriz del acueducto. Esto nos permite que la nube de puntos visualizada nos sirva de guía y referencia para establecer el modelo paramétrico. Para completar el modelado no ha sido necesaria la generación de librerías de objetos paramétricos particularizadas para el acueducto. A pesar de que Revit no cuenta con un reconocimiento automatizado de la geometría 3D a partir de la

nube de puntos, sí cuenta con herramientas para generar objetos 3D con las geometrías más utilizadas en el mundo de la construcción actual (Ochmann et al., 2019), que aunque habitualmente no son válidas para la modelización del patrimonio histórico (Dore y Murphy, 2017) debido a sus geometrías tan particulares (bóvedas nervadas, cornisas, adornos en dinteles...), sí que son adecuadas para el modelo HBIM que se pretende generar en este trabajo. En los últimos años, se están realizando grandes esfuerzos que permitan la generación de geometrías 3D mediante el reconocimiento automático de puntos.

Antes de proceder al modelado del acueducto es necesario definir el nivel de detalle que se quiere alcanzar, el cual está estrechamente relacionado con los objetivos y en nivel de precisión que se quiere alcanzar en la investigación llevada a cabo. Desde el punto de vista puramente gráfico, se pueden diferenciar 3 grados de definición del modelo: Grado 1 (Grosso), Grado 2 (Medio) y Grado 3 (Fino), tal y como se muestra en la Figura 18 (Chiabrando et al., 2017).

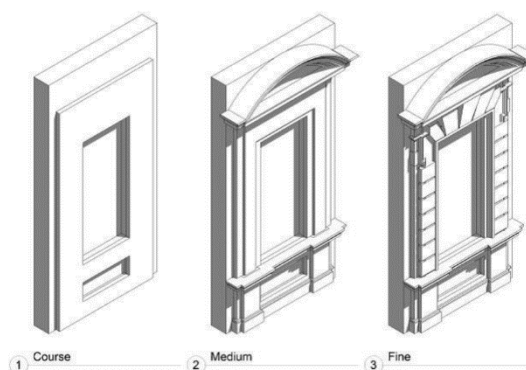


Figura 18. Nivel de detalle gráfico.

Como el objetivo del presente documento está orientado a la obtención de un modelo de elementos finitos que sirva para el análisis estructural del acueducto, será suficiente con alcanzar un nivel de representación 3D entre los Grados 1 y 2. Si hacemos referencia al nivel de desarrollo LOD (Level of Development) de nuestro modelo BIM, podemos establecerlo entre los niveles LOD200 y LOD300, según los términos acuñados por el Instituto Americano de Arquitectura (AIA, American Institute of Architects).

Según lo anteriormente expuesto, teniendo muy presente el objetivo final del trabajo, es necesario decantarse entre dos posibles opciones de modelado:

- Opción 1: Objetivo reconstrucción virtual.
Esta opción es la que mejor se adapta a la geometría real del acueducto. Debido a que el espesor del acueducto varía considerablemente tanto en altura como entre unas pilas y otras (por ejemplo, hay pilas que en su base tienen un espesor de 0,90 m y en su coronación de 1,05 m o superior), se ha modelado toda esta variabilidad mediante componentes in-situ de Autodesk Revit que permiten ir enlazando diferentes secciones transversales a lo largo de una directriz con la herramienta "fundido de barrido". Posteriormente, se precisa el uso de la herramienta de formas vacías y de corte para poder restar los "ojos del acueducto" al volumen principal modelado con componentes in-situ.

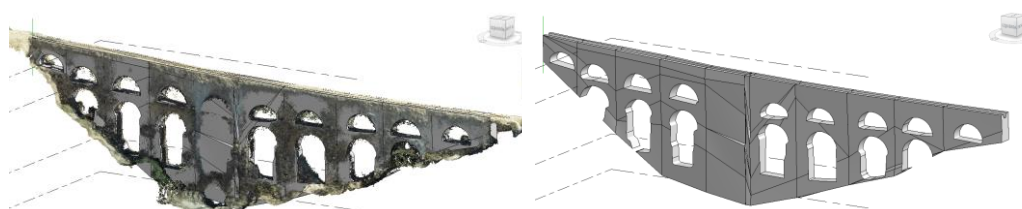


Figura 19. Modelado Opción 1 en Autodesk Revit 2022.

- Opción 2: Objetivo análisis estructural.
Esta opción no consigue una representación tan fidedigna de la geometría del acueducto, pero sí lo suficientemente precisa para el desarrollo de un modelo de cálculo que represente el comportamiento real de la estructura. Esta opción se basa en la modelización del acueducto mediante un muro estructural de espesor constante de 0,90 m (adoptando un espesor que nos deje del lado de la seguridad para el posterior análisis estructural). Una vez creado el muro estructural, teniendo como referencia el trazado en planta del acueducto, se procede a la apertura de los ojos del acueducto de la misma manera que en la opción anterior.

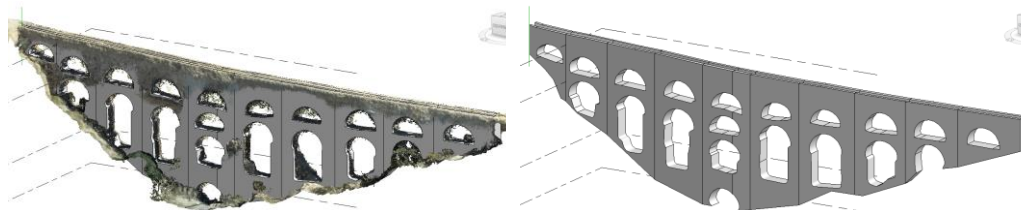


Figura 20. Modelado Opción 2 en Autodesk Revit 2022.

Finalmente, en el presente trabajo se ha optado por el desarrollo de la opción 2 ya que es la que nos permite una mejor aplicación de la metodología en 2 pasos Cloud-to-BIM-to-FEM, ya que asegura una buena interoperabilidad entre los objetos paramétricos del modelo BIM y su transformación a elementos finitos tipo "shell" a utilizar en el programa de cálculo estructural.

Por otra parte, ya que no es objeto de este trabajo la reconstrucción virtual realista del entorno del acueducto, no ha sido necesario incluir la modelización del terreno en el modelo HBIM.

2.6 Validación del ajuste entre la nube de puntos y el modelo HBIM

Cada uno de los objetos paramétricos creados para desarrollar el modelo HBIM deben validarse mediante la medición de las distancias entre la nube de puntos del modelo fotogramétrico y el mallado o "mesh" del objeto paramétrico creado. Para llevar a cabo este proceso de validación se ha exportado el modelo de Autodesk Revit en formato .obj, que junto al archivo .txt con la nube de puntos del acueducto obtenida de Agisoft Metashape, se han importado al software CloudCompare (Girardeau Montaut, 2022) donde mediante el comando "Cloud to Mesh Distance" se puede calcular la distancia entre ambos elementos. A falta de un criterio común entre la literatura científica existente para la validación de un modelo HBIM (Adami et al., 2017) en esta investigación se han establecido los siguientes:

- Que la distancia media entre puntos sea cercana a 0 m (entre -0,10 m y 0,10 m)
- Que la desviación estándar de la distancia entre puntos sea menor de 0,10 m (Martínez Carricondo et al., 2020b, 2021).

2.7 Del modelo BIM al modelo de elementos finitos FEM

El cálculo estructural ha experimentado en las últimas décadas un importante impulso gracias al desarrollo de nuevas herramientas matemáticas que, trasladadas al desarrollo informático también en auge, han permitido resolver problemas de una forma más eficaz y veloz. Fruto del desarrollo científico, nace el Método de los Elementos Finitos

(FEM, Finite Element Model) muy usado en la actualidad para el análisis tensional y de deformaciones de los sistemas estructurales.

El MEF es un método por aproximación numérica que parte del conocido Método Matricial, elevándolo de modo "discreto" a "continuo". La precisión del modelo FEM dependerá del tamaño y la forma de los elementos en los que discretizamos la pieza. Además, la posibilidad de introducir elementos en 2D y 3D nos ofrece mucha mayor precisión a la hora de obtener resultados que un modelo construido solo con barras 1D.

El Método de los Elementos Finitos es matemáticamente más complejo que otros métodos lineales como el matricial, sin embargo, aporta más precisión y sobre todo más capacidad para modelar estructuras fuera del rango de los elementos barra. Aunque su manejo matemático es tedioso, afortunadamente contamos con numerosos softwares capaces de generar y resolver las ecuaciones numéricas que implica este método en poco tiempo, permitiendo al proyectista conocer un comportamiento veraz de su estructura reduciendo su trabajo a la introducción de los datos de partida y el análisis de los resultados. Para el presente trabajo se utilizará el software SAP2000 desarrollado por la compañía Computers & Structures, INC.

El objetivo de esta investigación es elaborar un modelo FEM que permita estudiar el comportamiento estructural del Acueducto de los Veinte Ojos. Para ello es necesario transformar el modelo HBIM a un modelo en 3D con elementos geométricos legibles por SAP2000. Se ha elegido este software ya que permite la importación de una geometría de elementos 3D sólidos o 2D shells y su posterior discretización o mallado. Para este proyecto debido al carácter lineal de la estructura se ha decidido modelizar la misma mediante elementos 2D de tipo shells, cuyas principales ventajas son la minimización de los tiempos de cálculo de la estructura y la simplificación del análisis tensional de la misma.

El hecho de partir de un modelo HBIM en 3D para generar el modelo de cálculo de elementos finitos ahorra mucho tiempo en la fase de desarrollo del modelo FEM, aprovechando además la ventaja de tener un mayor detalle con respecto a los modelos simplificados habituales que se suelen adoptar para estos fines (Crespi et al., 2015).

Existe un plugin denominado CSiXRevit que se puede instalar en Autodesk Revit para permitir el intercambio de información entre dicho programa y SAP2000. Sin embargo, se han encontrado grandes dificultades a la hora de conseguir un modelo de elementos finitos que fuese fiel a la geometría del acueducto, principalmente debido a que no se reconocen correctamente los volúmenes vacíos de los ojos del acueducto. Por este motivo, ha sido necesario el uso del software Autodesk AutoCAD 3D para poder generar un modelo geométrico que SAP2000 pudiera interpretar correctamente.

A continuación, se exponen los pasos abordados para la generación del modelo FEM. En primer lugar, se ha exportado el modelo BIM del acueducto al formato .dwg para poder trabajar con él en AutoCAD 3D. El producto resultante está compuesto por mallas policara que definen la geometría del conjunto. Estas mallas policara se han dividido a su vez en mallas secundarias de menor tamaño subdivididas en horizontal y vertical, estando delimitadas por cuatro aristas. Para la generación de estas mallas secundarias se ha dividido el acueducto manualmente en 10 tramos y así conseguir un tamaño final



de discretización que asegurase el correcto análisis estructural posterior. Finalmente, se han descompuesto estas mallas secundarias en elementos "Cara 3D" que son fácilmente importables en el software SAP2000 como elementos "shells".

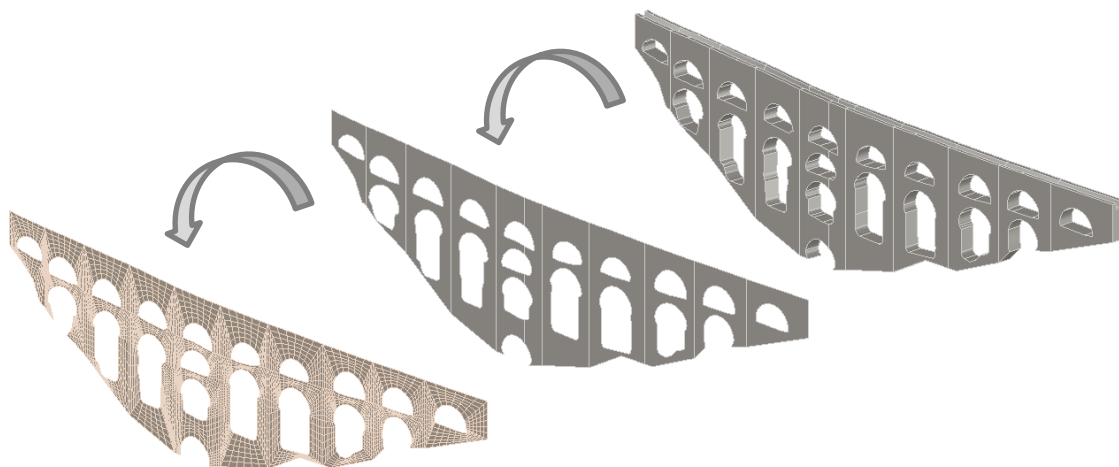


Figura 21. Transformación en AutoCAD del modelo 3D en elementos superficiales "Cara 3D".

Una vez importados los elementos cara 3D en SAP2000 obtenemos el modelo de elementos finitos que se observa en la Figura 22, compuesto por 4.170 elementos área o shell. Para limitar el número de elementos que componen el modelo, se ha establecido el tamaño medio de malla en un valor inferior a 0,50 m, asegurando una buena calidad de los resultados obtenidos.

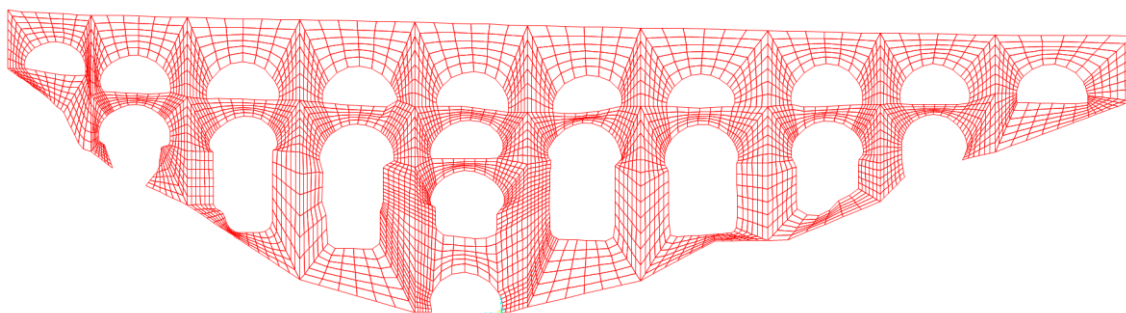


Figura 22.- Modelo importado a SAP2000.

Una vez se dispone de la geometría del modelo en SAP2000, es necesario incluir todos los "inputs" o información inicial que necesita el software para poder abordar el cálculo. Ha sido necesario definir las características mecánicas del conjunto piedra-mortero que materializa el acueducto, las acciones exteriores que actúan sobre la estructura y las condiciones de contorno que afectan a su comportamiento estructural, principalmente su apoyo sobre el terreno.

2.7.1 Características de los materiales

El Acueducto de los Veinte Ojos es una obra de fábrica construida mediante un conjunto de piezas de cantería trabadas y asentadas con mortero. Las propiedades de la fábrica dependen en buena medida de las propiedades de sus partes constituyentes: las piezas pétreas y el mortero, que en ocasiones puede no existir (Martín-Caro Álamo, 2001).

Para el presente trabajo no se han llevado a cabo ensayos de caracterización destructivos sobre la fábrica del acueducto. Tras un análisis visual y geológico de la zona, y dada la naturaleza caliza de la roca que encontramos en el barranco de la rambla de Carcauz, se han estimado las características del material pétreo que forma este futuro Bien de Interés Cultural.

Se han establecido las características mecánicas de la obra fábrica en relación a su módulo elástico, el coeficiente de Poisson y el peso específico del material.

Según Martín-Caro Álamo (2001), el peso específico de la roca caliza se sitúa en torno a 20 y 26 kN/m³. Si bien, el peso específico del material compuesto de la obra de fábrica vendrá dado por el de los componentes ponderados por sus respectivas proporciones en volumen. Teniendo en cuenta que en las construcciones de mampostería de piedra el volumen de mortero es muy inferior al de piedra, podemos estimar que el peso específico del conjunto será de 20 kN/m³, adoptando un valor conservador.

El módulo de elasticidad (E_b) de la piedra caliza se sitúa entre los 17.000 y los 76.000 N/mm² y tiene un coeficiente de Poisson entre 0,15 y 0,20. En el caso del mortero de cal, se considera un módulo de elasticidad (E_m) de entre 400 y 2000 N/mm² y un coeficiente de Poisson de 0,2. La deformabilidad de la fábrica es debida en gran parte a su componente menos rígido: el mortero. Interesa, no obstante, conocer el módulo de elasticidad de las piezas puesto que la relación de rigideces entre piezas y mortero es un parámetro que determina el comportamiento del material compuesto, labor que presenta una cierta complejidad. Un valor orientativo del módulo de deformación longitudinal (E) del conjunto pieza-mortero es (Martín-Caro Álamo, 2001):

$$E = 0,50 * E_b = 0,5 * 17000 \text{ N/mm}^2 = 8500 \text{ N/mm}^2$$

Se adoptará para el conjunto de la obra de fábrica un coeficiente de Poisson de 0,15.

2.7.2 Cargas

En este apartado se describen todas las acciones actuantes sobre el acueducto, justificando los valores adoptados y analizando la idoneidad de las cargas tenidas en cuenta.

Acciones permanentes: Peso propio y cargas muertas.

En todos los elementos de fábrica, su peso propio se ha obtenido según sus características geométricas, teniendo en cuenta un peso específico de la fábrica de 20 kN/m³.

Debido a la naturaleza de la construcción no se contemplan cargas muertas adicionales sobre la estructura.

Acciones variables: Viento y agua.

A efectos de la acción del viento, el alzado del acueducto se comporta como un muro vertical con diversas aperturas. Por las particularidades geométricas de estas estructuras, lo más adecuado para definir la acción del viento será utilizar el apartado 7.4.1 Muros autoportantes y barandillas del Eurocódigo (UNE 1991-1-4:2005).



Las condiciones de viento consideradas en proyecto son las siguientes:

- Situación: T.M. de Vícar y Felix (Almería).
- Velocidad básica de viento: 26 m/s.
- Presión correspondiente a la velocidad pico: $q_p = 0,83 \text{ kN/m}^2$.
- Categoría de terreno: II. Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos.
- Coeficiente de presión $c_p=1,20$, para muros con más de un 20% de huecos.

Luego la presión del viento sobre la superficie exterior, w_e , será igual a:

$$w_e = 0,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 1,2 = 0,99 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_e \approx 1,00 \text{ kN/m}^2$$

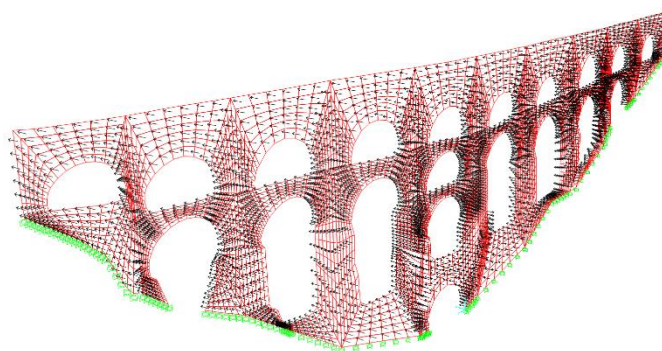


Figura 23. Cargas de Viento + introducidas en el modelo de SAP2000.

Esta acción se introducirá en ambas fachadas del acueducto, actuando en un sentido para la hipótesis "Viento +" y en el sentido opuesto en la hipótesis "Viento -".

No se ha considerado la acción del agua sobre el canal del acueducto, dado que en la actualidad no transita ningún caudal por el mismo ya que este ha sido derivado por otras acequias del entorno.

Acciones accidentales: Sismo

La acción sísmica se ha tenido en cuenta llevando a cabo con SAP2000 un análisis modal-espectral, tal y como recomienda la Norma Sismorresistente NCSE-02. Los parámetros principales adoptados en el análisis modal espectral son:

- Para los municipios de Vícar y Felix:
 - Aceleración básica: 0,23g
 - Coeficiente de contribución: $K = 1,00$
- Construcción de importancia normal.
- Coeficiente adimensional de riesgo: $\rho = 1,0$
- Coeficiente de terreno: $C = 1,00$ (Terreno tipo I). Corresponde con el tipo de terreno rocoso que aflora en la rambla Carcauz.
- Coeficiente de amortiguamiento: 4%
- Ductilidad: $\mu = 1,0$ (Sin ductilidad).

2.7.3 Combinación de acciones

Las hipótesis de carga tomadas en consideración se forman combinando los valores de cálculo de las acciones cuya actuación pueda ser simultánea (acciones

concomitantes), según los criterios generales prescritos en el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Vivienda, 2006), tanto para Estados Límite Últimos, como para Estados Límite de Servicio.

En la siguiente tabla se indican las combinaciones de hipótesis de carga relativas a las comprobaciones en Estados Límite Últimos de Estabilidad y de Resistencia del acueducto (ELU), y los Estados Límite de Servicio de Deformaciones (ELS), indicando los coeficientes de mayoración de acciones.

Tabla 1. Combinaciones de cálculo del modelo FEM.

Combinación	Hipótesis simples					Análisis
	Peso Propio	Viento X+	Viento X-	Sismo X	Sismo Y	
1-ELU	1,35	1,50	-	-	-	Resistencia
2-ELS	1,00	1,00	-	-	-	Deformaciones
3-ELU	1,35	-	1,50	-	-	Resistencia
4-ELS	1,00	-	1,00	-	-	Deformaciones
5-ELU	1,00	-	-	1,00	0,30	Resistencia y Deformaciones
6-ELU	1,00	-	-	0,30	1,00	Resistencia y Deformaciones

Para las comprobaciones de estabilidad se utilizarán las fuerzas globales proporcionadas por el programa para cada hipótesis simple.

2.7.4 Condiciones de contorno

Según la visita a campo y la inspección visual realizada a la cimentación del acueducto, se ha determinado que este apoya directamente sobre los afloramientos rocosos que se observan en el cauce, pudiendo haberse dispuesto una zapata corrida, realizada también de fábrica, en aquellos puntos del valle donde existiese una capa superficial de rellenos.

Según lo observado, las condiciones de apoyo de la base del acueducto se encuentran en una situación intermedia entre un apoyo simple y un empotramiento. Ya que gran parte del muro del acueducto se inserta en el macizo rocoso de naturaleza caliza, parece razonable que para el nivel de estudio que se quiere alcanzar en la presente investigación, se adopten unas condiciones de contorno en todo el borde inferior del modelo del acueducto simulando un apoyo empotrado. En cualquier caso, para corroborar el análisis estructural llevado a cabo con la suposición de apoyo empotrado, se podría realizar un modelo adicional auxiliar en el que se contemple este encuentro como simplemente apoyado o con una modelización de la interacción estructura-terreno mediante muelles, y así determinar unas conclusiones globales según la información aportada por los diferentes modelos.

Para cumplir con la finalidad del presente trabajo, será suficiente con el análisis del modelo descrito con las condiciones de contorno de empotramiento en la base del acueducto.



3. Resultados

En el flujo de trabajo establecido, los primeros resultados que obtenemos son los de la nube de puntos del entorno del acueducto. La Figura 24 muestra dicha nube de puntos obtenida en el software Agisoft Metashape.



Figura 24. Nube de puntos obtenida en Agisoft Metashape.

La Tabla 2 muestra la precisión del proyecto fotogramétrico realizado. En ella se indica para cada punto de control de calidad, el error medio cuadrático obtenido entre las coordenadas X, Y y Z medidas por el receptor GNSS y aquellas derivadas del análisis fotogramétrico llevado a cabo.

Tabla 2. Errores detectados en los puntos de control de calidad (Informe Agisoft Metashape).

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
2	1.66399	-3.1027	0.0259657	3.52084	0.311 (188)
4	0.341269	-3.91809	1.57669	4.2372	0.257 (235)
6	-1.25744	2.02388	-0.218058	2.39265	0.263 (213)
8	-1.44521	1.09357	-2.4372	3.03718	0.292 (219)
10	2.0657	1.23115	-2.28027	3.31397	0.297 (224)
12	0.482149	-1.82293	-1.0632	2.16471	0.301 (207)
14	1.22377	-4.85691	1.01957	5.11143	0.277 (169)
Total	1.3391	2.89577	1.50445	3.52733	0.286

Los resultados muestran un $RMSE_x$ de valor 1,34 cm, un $RMSE_y$ de 2,90 cm y $RMSE_z$ de 1,50 cm. El error total $RMSE_T$ alcanza un valor de 3,53 cm.

Tras la clasificación de los puntos de la nube en Agisoft Metashape y la exportación de los puntos clasificados como "acueducto", se obtiene la nube de puntos que se observa en la Figura 25. Esta nube tiene un total de 284.779 puntos y es la que se importa en el software Autodesk Revit para la creación del modelo HBIM.



Figura 25. Nube de puntos importada en Autodesk Revit.

Según la metodología descrita en el apartado anterior, las características geométricas del acueducto han sido modeladas tomando como guía la nube de puntos. Las Figura 26 y Figura 27 muestran una superposición de la nube de puntos y el modelo HBIM creado en Autodesk Revit. En la Figura 28 se muestra únicamente el modelo HBIM generado.

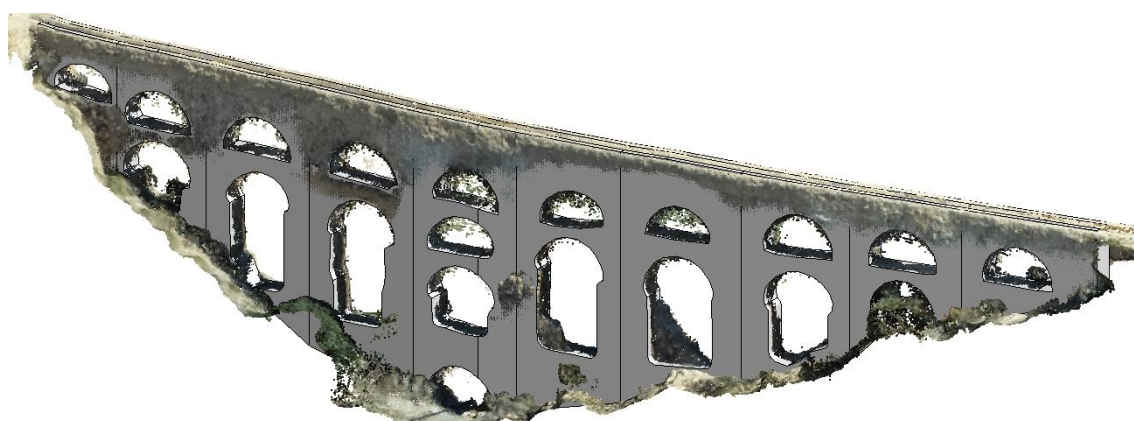


Figura 26. Modelo HBIM y nube de puntos vista desde el oeste.



Figura 27. Modelo HBIM y nube de puntos vista desde el este.

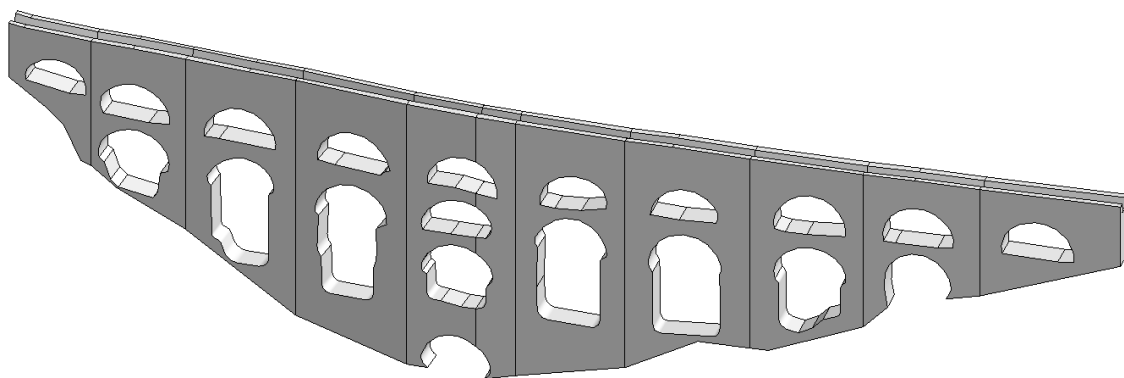


Figura 28. Modelo HBIM.

Una vez creado el modelo HBIM ha sido preciso validar la precisión del ajuste hecho en relación a la nube de puntos. La Figura 29 muestra los resultados del análisis comparativo entre ambos elementos realizado por medio del software CloudCompare. La media de las diferencias detectadas entre el objeto HBIM creado y el modelo fotogramétrico (nube de puntos) se sitúa en 0,022 m, centrándose dichas diferencias en la gran mayoría de los puntos en el intervalo entre - 0,10 m y 0,10 m. La desviación estándar obtenida es de 0,08 m. Los resultados se representan en una escala de colores que resalta las diferencias, observando en rojo los puntos en los que peor correspondencia se obtiene, y en verde los que mejor representados se encuentran en el modelo generado.

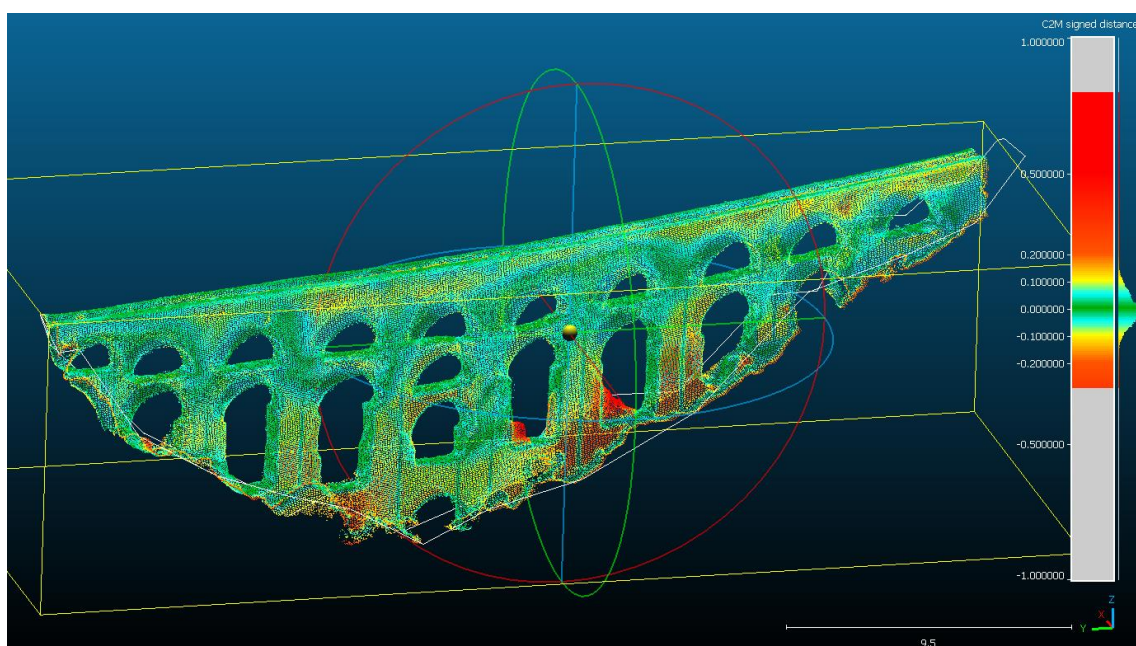


Figura 29. Validación del modelo HBIM del acueducto en CloudCompare.

El último paso en el flujo de trabajo descrito en el apartado 2 es la generación y el análisis del modelo FEM. Este modelo está compuesto por 4.627 puntos y 4.170 elementos área o shell. Tras analizar la estabilidad del conjunto ante vuelco y deslizamiento, el comportamiento tensional y resistente de la fábrica, y las deformaciones producidas en la pared vertical del acueducto, se han obtenido los resultados que se desarrollan a continuación.

La estabilidad de la construcción se determina mediante los coeficientes de seguridad a vuelco (CSV) y deslizamiento (CSD), considerando que el conjunto se comporta como un sólido rígido.

Del modelo de cálculo en SAP2000 se han obtenido las siguientes reacciones:

- La reacción global en Z debida al peso propio del acueducto es de 2979,4 kN.
- La reacción global en X (eje perpendicular al muro del acueducto) debido al efecto del viento es de 163,3 kN.
- La reacción global en X (perpendicular al muro del acueducto) debido al efecto del sismo es de 447,9 kN.

Se estima un coeficiente de rozamiento entre el terreno y la estructura de valor $\mu = 0,55$, y se ha determinado una altura media del centro de gravedad de cada tramo del acueducto de valor $h=3,40$ m (posición en la que se aplican las fuerzas resultantes de viento y sismo a efectos de las comprobaciones de estabilidad). Además, el espesor medio del muro del acueducto es 0,90 m.

Para la combinación de estabilidad más desfavorable donde interviene la acción del viento se obtiene un CSV y un CSD de valor:

$$CSV = \frac{\text{Momentos Estabilizadores}}{\text{Momentos Desestabilizadores}} = \frac{2979,4 \text{ kN} * \frac{1}{2} * 0,90 \text{ m}}{163,3 \text{ kN} * 3,40 \text{ m}} = 2,41$$

$$CSD = \frac{\text{Fuerza Estabilizadoras}}{\text{Fuerzas Desestabilizadoras}} = \frac{2979,4 \text{ kN} * 0,55}{163,3 \text{ kN}} = 10,03$$

Para la combinación de estabilidad más desfavorable donde interviene la acción del sismo se obtiene un CSV y un CSD de valor:

$$CSV = \frac{\text{Momentos Estabilizadores}}{\text{Momentos Desestabilizadores}} = \frac{2979,4 \text{ kN} * \frac{1}{2} * 0,90 \text{ m}}{447,9 \text{ kN} * 3,40 \text{ m}} = 0,88$$

$$CSD = \frac{\text{Fuerza Estabilizadoras}}{\text{Fuerzas Desestabilizadoras}} = \frac{2979,4 \text{ kN} * 0,55}{447,9 \text{ kN}} = 3,66$$

Para el análisis del comportamiento tensional y resistente del acueducto sin ánimo de ser exhaustivos, se han extraído del modelo de SAP2000 los esfuerzos provocados en los muros del acueducto según las combinaciones indicadas en el apartado 2.7.3.

Para la hipótesis simple de peso propio se obtienen los siguientes esfuerzos axiales horizontales y verticales:



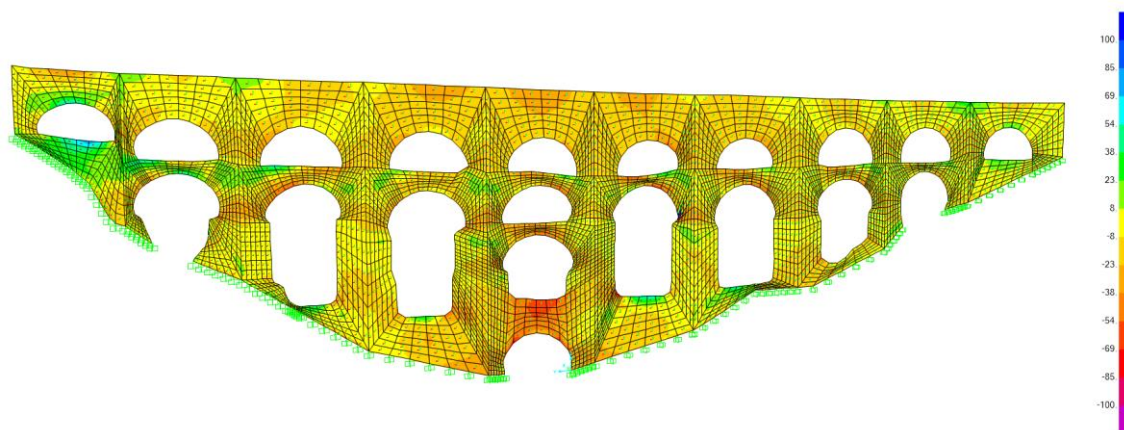


Figura 30. Esfuerzos axiales horizontales (F11) debidos al peso propio.

En la figura anterior, se observa un máximo valor de compresión de $-65,6$ kN/m, y un máximo valor de tracción de $79,7$ kN/m.

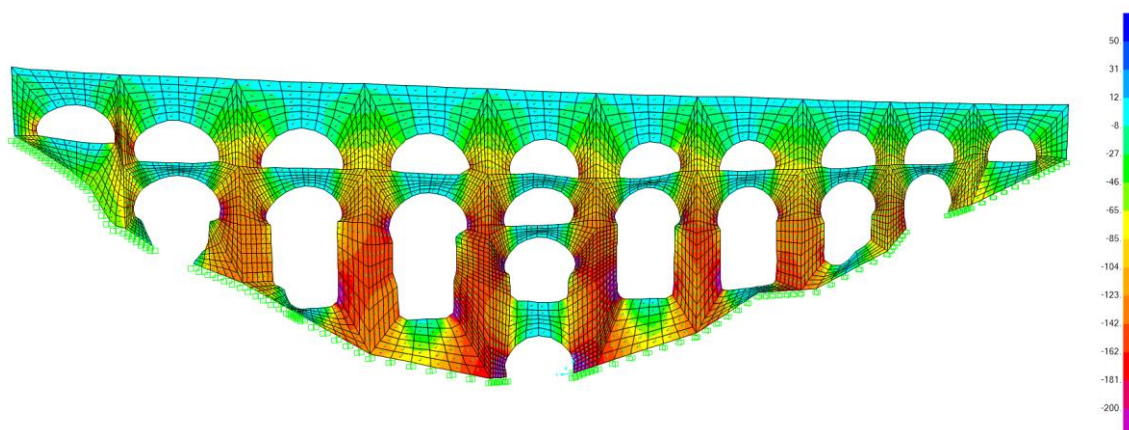


Figura 31. Esfuerzos axiales verticales (F22) debidos al peso propio.

En la figura anterior, se observa un máximo valor de compresión de $-315,8$ kN/m, siendo las tracciones prácticamente nulas.

Las acciones horizontales de viento y sismo se caracterizan principalmente por generar esfuerzos flectores y cortantes en la base del muro del acueducto. Para las combinaciones que contemplan la acción del viento (1-ELU y 3-ELU), los esfuerzos obtenidos en los elementos shells en los que se ha discretizado el acueducto son los reflejados en la Figura 32 (momentos) y en la Figura 33 (cortantes). Para las combinaciones que contemplan la acción del sismo (5-ELU y 6-ELU), los esfuerzos obtenidos son los reflejados en la Figura 32 (momentos) y en la Figura 33 (cortantes).

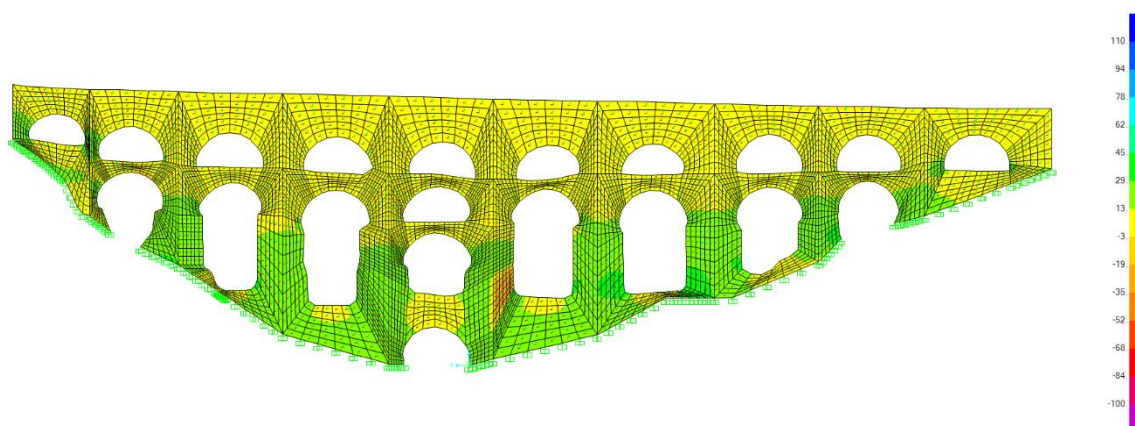


Figura 32. Esfuerzos flectores (M22) para la combinación 1-ELU.

En la figura anterior, se observa un máximo momento flector en la base del acueducto de valor 37,1 kN*m/m.

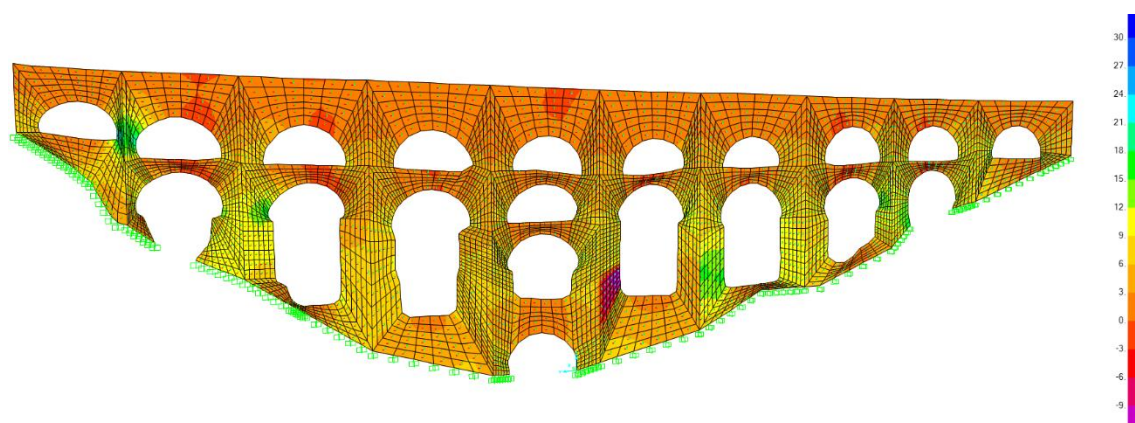


Figura 33. Esfuerzos cortantes (Vmax) para la combinación 1-ELU.

En la figura anterior, se observa un cortante máximo de valor 15,6 kN/m.

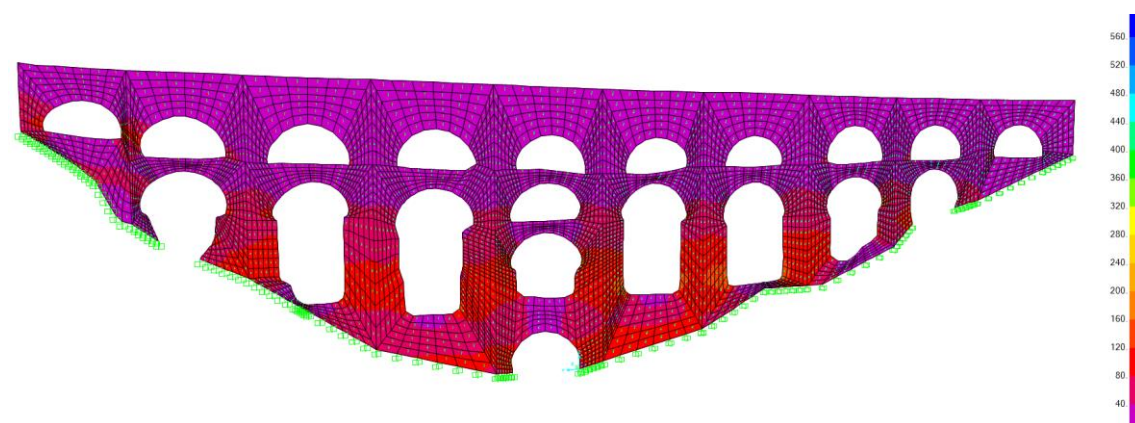


Figura 34. Esfuerzos flectores (M22) para la combinación 5-ELU.

En la figura anterior, se observa un máximo momento flector en la base del acueducto de valor 133,2 kN*m/m.

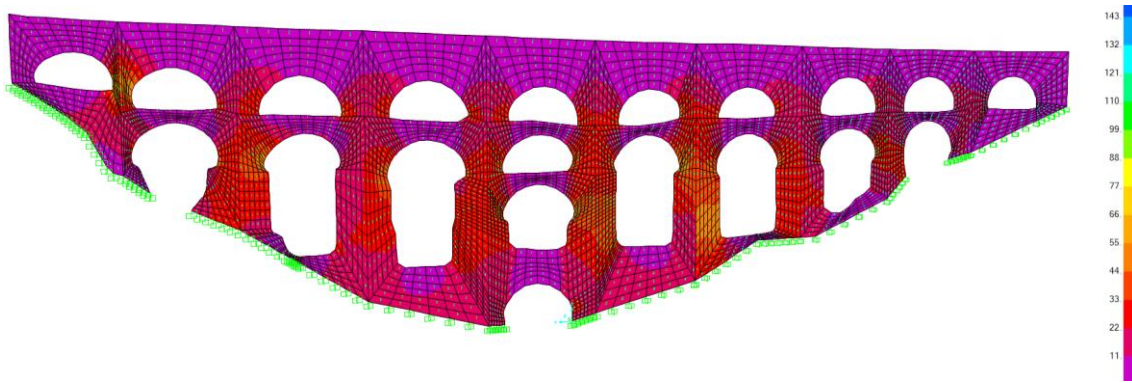


Figura 35. Esfuerzos cortantes (V23) para la combinación 5-ELU.

En la figura anterior, se observa un cortante máximo de valor 47,8 kN/m.

Finalmente, se exponen las deformaciones resultantes en la estructura debido a las combinaciones que contemplan la acción del viento en Estado Límite de Servicio (2-ELS y 4-ELS) y del sismo (5-ELU y 6-ELU).

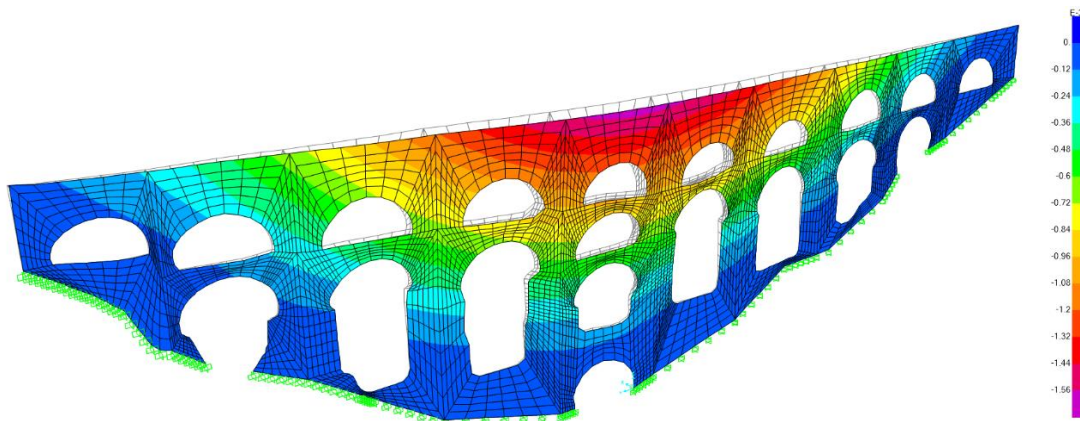


Figura 36. Desplazamientos horizontales para la combinación 4-ELS. Escala aumentada x500.

En la figura anterior, se observa un desplazamiento máximo en coronación del acueducto de 1,6 mm.

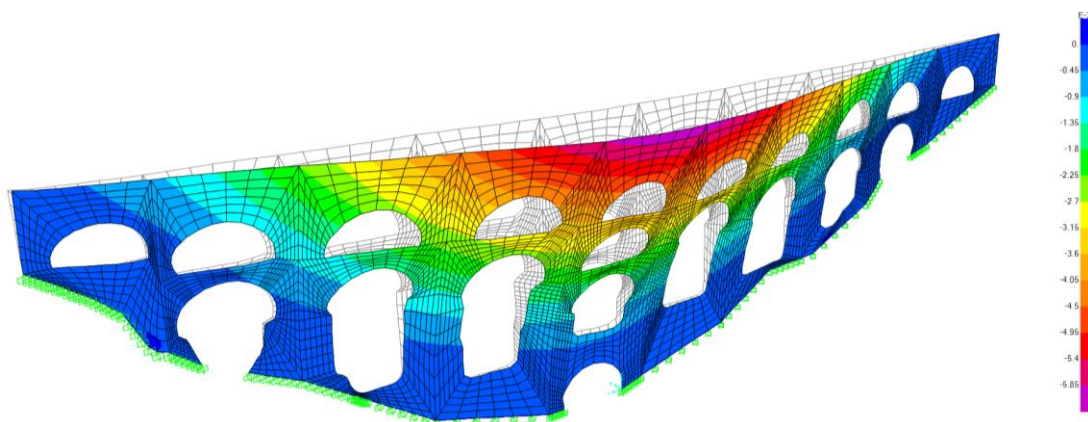


Figura 37. Desplazamientos horizontales para la combinación 5-ELU. Escala aumentada x500.

En la figura anterior, se observa un máximo desplazamiento en coronación del acueducto de 6,2 mm.

4. Discusión

4.1 Precisión del proyecto fotogramétrico

Los valores obtenidos en el proyecto fotogramétrico están en consonancia con diversas aplicaciones prácticas estudiadas por Clapuyt et al. (2016), quienes comparan 10 casos de reconstrucciones topográficas 3D basadas en el algoritmo SfM con similares condiciones a las existentes en el emplazamiento del acueducto, así como otras investigaciones centradas en el patrimonio histórico, donde la finalidad de las investigaciones ha tolerado errores de hasta 15 cm (Martínez Carricondo, 2020b, 2021). En todos los casos la precisión medida fue del orden del centímetro.

En esta investigación, el error total obtenido en el modelo georreferenciado es de 3,53 cm (ver Tabla 2), el cual se considera más que acertado para el tipo de análisis llevado a cabo, incluso similar al que se hubiese obtenido con un análisis TLS (Martínez Carricondo, 2020a).

4.2 Uso de imágenes oblicuas

La mejora de la precisión y el detalle de las nubes de puntos obtenidas por fotogrametría UAV usando fotografías oblicuas ha sido demostrada en numerosos estudios (Martínez Carricondo, 2020b, 2021; Aicardi et al., 2016; Karachaliou et al., 2019).

En este estudio, el proyecto fotogramétrico ha utilizado fotografías tomadas a una distancia cercana al objeto y con un ángulo de inclinación de la cámara de 45° y 90°, sin la necesidad de tomar fotografías terrestres. Estas condiciones son similares al estudio (Aicardi et al., 2016) del monasterio de Piedmont (Italia), donde también se obtuvo una alta precisión.

Se considera indudable que la utilización de fotografías tomadas en diferente ángulo ha sido beneficioso para obtener una nube de puntos del acueducto de mayor precisión.

4.3 Precisión del modelo HBIM

De acuerdo con la literatura científica específica, no existen unos valores límite de precisión establecidos para los modelos HBIM creados a través de una nube de puntos. El nivel de precisión debe de escogerse en relación al tipo de intervención o análisis que se quiera llevar a cabo, para obtener un modelo que sea fácil de manejar y de entender (Biagini et al., 2016).

En este estudio, se han establecido unos límites que permiten la correcta interpretación estructural del modelo del acueducto, así como una transformación del modelo HBIM al modelo FEM sin simplificaciones relevantes en dicho modelo. Las diferencias observadas en su mayoría no superan los 10 cm y en general estas diferencias se producen por defecto, es decir, que se considera menor sección estructural que la realmente existente, por lo que nos encontramos del lado de la seguridad en cuanto al análisis del comportamiento estructural de la obra.

Además, es necesario tener en cuenta la presencia de algunos derrumbamientos y acumulaciones de materiales en los ojos del acueducto que no forman parte estructural del mismo pero que crean pequeñas diferencias de ajuste en algunas áreas.



4.1 Precisión del modelo FEM

La representación fidedigna de la geometría real del acueducto en el modelo HBIM, no deriva en un objeto exportable legible por el software de cálculo SAP2000. Por ello, aspectos como la variabilidad del espesor de los muros o los desplomes que se observan en las paredes del acueducto, han debido simplificarse para poder asegurar el intercambio de información entre softwares. Estas simplificaciones no afectan de forma relevante a los resultados obtenidos, ya que se han realizado quedando del lado de la seguridad ante el análisis estructural y respetando una precisión geométrica alta del modelo generado.

Los problemas de interoperabilidad para geometrías complejas que se han encontrado entre Autodesk Revit y SAP2000, han obligado a abordar el desarrollo del modelo FEM pasando por el software Autodesk AutoCAD 3D. Este aspecto sigue siendo un foco de trabajo e investigación para poder materializar de una forma automatizada esta transición.

El tamaño medio de la malla del modelo FEM se considera adecuado para el análisis que se pretende abordar en este trabajo, ya que la distancia máxima entre nodos de una misma arista de los elementos shell, no supera los 50 cm. El realizar un mallado más fino no variará notablemente las conclusiones obtenidas, pero sí aumentará los tiempos de cálculo, por lo que no se ha estimado oportuno reducir el tamaño de los elementos modelizados.

4.2 Comportamiento estructural del acueducto

Del análisis de la estabilidad frente a las acciones externas que actúan sobre el acueducto se puede deducir que la estructura del acueducto es estable ante acciones gravitatorias y variables como el viento, tanto a vuelco como ha deslizamiento. Sin embargo, ante un eventual episodio sísmico su estabilidad a vuelco se vería comprometida.

Según los criterios marcados en el CTE (Ministerio de Vivienda, 2006), el valor del coeficiente de seguridad a vuelco (CSV) debe ser superior a 2, mientras que el coeficiente de seguridad al deslizamiento (CSD) debe superar el valor de 1,5. Luego si observamos los resultados expuestos en el apartado 3, el CSV ante acciones sísmicas se sitúa en 0,88, valor incluso inferior a la unidad y lejos del coeficiente marcado por el CTE.

Esta situación abre una puerta hacia una nueva investigación que estudie las diferentes alternativas de refuerzo que se pueden acometer sobre este monumento para poder asegurar su estabilidad ante cualquier combinación establecida por la normativa vigente.

En relación a la distribución de tensiones que se producen en el acueducto debido a su peso propio, los resultados derivados del modelo son coherentes ya que se observan compresiones horizontales en las bóvedas de los arcos (Figura 30) y compresiones verticales en las pilas aumentando su valor en la base (Figura 31), lo que coincide con el comportamiento estructural habitual de este tipo de construcciones. En relación a los máximos esfuerzos axiales que genera el peso propio del acueducto (ver Figura 30) se puede indicar que las tensiones de compresión observadas en la fábrica son muy inferiores a la resistencia característica a compresión tanto de la piedra caliza (entre 25



y 130 N/mm²) como del mortero de cal (entre 0,5 y 2 N/mm²). Asimismo, las tensiones de tracción también se sitúan lejos de la resistencia a tracción de la piedra, que según diversos autores se puede estimar como un 5% de la resistencia característica a compresión (Martín-Caro Álamo, 2001).

$$\sigma_{compresión} = \frac{N}{A} = \frac{315800 \text{ N}}{1000 \text{ mm} * 900 \text{ mm}} = 0,35 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{tracción} = \frac{N}{A} = \frac{79700 \text{ N}}{1000 \text{ mm} * 900 \text{ mm}} = 0,089 \text{ N/mm}^2$$

Donde:

σ : Tensión (N/mm²)

N: Esfuerzo Axil (N)

A: Área de la sección (mm²)

Si bien, para obtener unas conclusiones certeras sobre el comportamiento resistente del acueducto, es imprescindible analizar en mayor detalle las combinaciones de cálculo, teniendo en cuenta la acción del viento y del sismo. Una aproximación a las tensiones de compresión máximas que debe resistir la sección crítica del acueducto puede llevarse a cabo aplicando la fórmula de Navier para secciones sometidas a flexión compuesta:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M * y}{I}$$

Donde:

σ : Tensión (N/mm²)

N: Esfuerzo Axil (N)

A: Área de la sección (mm²)

M: Momento Flector (N*mm)

y: Distancia desde el eje neutro a la fibra más comprimida (mm)

I: Inercia de la sección (mm⁴)

En la situación sísmica, que es la que produce un máximo momento flector en la base del acueducto, tendríamos un incremento de las tensiones de compresión en la sección debidas al momento flector de valor:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} = \frac{133,2 \text{ kN} * \text{m} * 10^6 * 450 \text{ mm}}{\frac{1}{12} * 1000 * 900^3} = 0,99 \text{ N/mm}^2$$

Sí sumamos esta tensión de compresión generada por el momento flector en la combinación sísmica a las tensiones de compresión procedentes de los esfuerzos axiles sobre la sección, las tensiones obtenidas seguirán estando muy alejadas de la resistencia característica a compresión de la obra de fábrica.



Para un análisis en profundidad del comportamiento de la sección ante las tensiones de compresión y tracción, se recomienda la implementación de un modelo que tenga en cuenta un comportamiento no lineal de la estructura, análisis complejo que se sale fuera del propósito de este trabajo. Si bien, aquí se abre otra posible línea de continuidad de esta investigación ya que para poder analizar correctamente el comportamiento tensional y resistente de la obra de fábrica ante los momentos y cortantes que actúan sobre la misma, sería conveniente la generación de un modelo de elementos finitos que tenga en cuenta el comentado comportamiento no lineal de las obras de fábrica. Adicionalmente, resultados con mayor grado de precisión también se podrían determinar analizando la estructura con elementos finitos 3D o de tipo "solid" (Roca et al., 2000; Akhaveissy, 2012; López Torres et al., 2017).

Por último, cabe indicar que los resultados de las deformaciones horizontales que encontramos en el modelo cuando actúa la acción del viento y del sismo, se encuentran dentro de los valores límite de desplome total que establece el CTE y otras normativas internacionales.

El desplome total (δ) para las combinaciones que incluyen la acción del viento no debe sobrepasar 1/500 de la altura total del acueducto. En este caso el desplazamiento elástico observado en la Figura 36 es de 1,6 mm y la altura máxima sobre el cauce del acueducto es 9,50 m. Luego según la normativa actual se permitiría un desplazamiento de hasta 1,9 cm, valor bastante superior al modelizado.

$$\delta \leq \frac{9,50 \text{ m}}{500} = 0,019 \text{ m}$$

El desplome total (δ) para las combinaciones que incluyen la acción del sismo no debe sobrepasar 1/100 de la altura total del acueducto. En este caso el desplazamiento elástico observado en la Figura 37 es de valor 6,2 mm. Luego según la normativa actual se permitiría un desplazamiento de hasta 9,5 cm, valor bastante superior al modelizado.

$$\delta \leq \frac{9,50 \text{ m}}{100} = 0,095 \text{ m}$$

Es cierto que estos desplazamientos indicados serían superiores si se considerase un comportamiento no elástico de la fábrica. Si bien, se obtienen valores suficientemente alejados del límite normativo como para considerar, para este nivel de estudio, un comportamiento aceptable en ELS de deformaciones del acueducto.

5. Conclusiones

La metodología Cloud-to-BIM-to-FEM permite la generación de modelos BIM y FEM de obras arquitectónicas y de ingeniería con un bajo coste, flexibilidad y una gran calidad de los resultados. Por ello se convierte en una herramienta esencial para la reconstrucción, protección y conservación de nuestro patrimonio histórico.

El proyecto fotogramétrico realizado ha mostrado unos resultados competitivos con respecto a levantamientos llevados a cabo con un escáner láser terrestre (TLS). El hecho de haber combinado imágenes cenitales y oblicuas ha mejorado significativamente la nube densa de puntos obtenida a partir del proceso fotogramétrico.



El proceso de generación del modelo HBIM ha tenido presente en todo momento el objetivo final del trabajo, sin simplificaciones injustificadas llevando a cabo una representación fidedigna del acueducto. Se ha aplicado un proceso de validación de la similitud entre el objeto paramétrico creado en el modelo HBIM y la nube densa de puntos procedente del proyecto fotogramétrico, asegurando un alto ajuste geométrico entre modelos, lo que facilita la posterior interpretación estructural del acueducto de una forma acertada.

Al igual que el modelo HBIM refleja la complejidad geométrica del acueducto, el modelo de elementos finitos FEM refleja las irregularidades del mismo sin simplificaciones excesivas en la estructura. Esto es un aspecto a destacar puesto que se mejora la simulación tradicional basada en modelos muy básicos del comportamiento de las obras de fábrica.

Los desarrollos futuros requerirán la implementación de funciones avanzadas para automatizar la conversión de modelos BIM a FEM. Actualmente las soluciones BIM-to-FEM existentes solo se pueden aplicar a edificios regulares y con disposiciones muy estandarizadas.

El análisis estructural del modelo FEM ha podido evaluar las condiciones de inestabilidad del conjunto ante un eventual sismo, aunque sí se comporta de una manera adecuada ante las acciones del viento. En cuanto al comportamiento tensional de los muros del acueducto, se observa que las máximas compresiones a las que se ve sometida la obra de fábrica distan mucho de la resistencia característica del conjunto que forman las piezas de cantería y el mortero de cal que las une. Sin embargo, será necesario la implementación de un análisis que tenga en cuenta la no linealidad del comportamiento de las obras de fábrica para determinar si las tracciones que se generan en los muros pueden conllevar compresiones inasumibles o situaciones de rotura en algunas secciones.

En este punto se abre una futura línea de investigación que permita discernir aquellas zonas donde se produzcan tracciones que deban corregirse para asegurar la integridad estructural a lo largo de los años de este futuro Bien de Interés Cultural, así como para la redacción de un proyecto de rehabilitación del monumento. Otra línea interesante de trabajo sería la reconstrucción virtual realista del acueducto como medio de divulgación del amplio patrimonio histórico que encontramos en la provincia de Almería.

6. Referencias

- Achille, C., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Fassi, F., Fregonese, L., & Taffurelli, L. (2015). UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy). *Sensors*, 15 (7), 15520-15539.
- Adami, A., Scala, B., & Spezzoni, A. (2017). Modelling and accuracy in a BIM environment for planned conservation: The apartment of troia of Giulio Romano. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42 (2W3), 17-23.



- Agüera Vega, F., Carvajal Ramírez, F., & Martínez Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A., Noardo, F., & Spano, A. (2016). UAV photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1*, 835-842.
- Akhaveissy, A. H. (2012). The DSC Model for the Nonlinear Analysis of In-plane Loaded Masonry Structures. *The Open Civil Engineering Journal*, 6, 200-214.
- Angelini, M. G., Baiocchi, V., Costantino, D., & Garzia, F. (2017). Scan to BIM for 3D reconstruction of the papal basilica of saint Francis in Assisi In Italy. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 42 (5W1), 47-54.
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.
- Bakirman, T., Bayram, B., Akpınar, B., Karabulut, M. F., Bayrak, O. C., Yigitoglu, A., & Seker, D. Z. (2020). Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 174-184.
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, 71-87.
- Bassier, M., Hadjidemetriou, G., Vergauwen, M., Van Roy, N., & Verstrynghe, E. (2016). Implementation of Scan-to-BIM and FEM for the Documentation and Analysis of Heritage Timber Roof Structures. *Digital heritage. Progress in cultural heritage: Documentation, preservation, and Protection. EuroMed 2016. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 10058. Springer, Cham (págs. 79-90). Cham: Springer International Publishing.
- Beacham, R., Denard, H., & Niccolucci, F. (2006). An Introduction to the London Charter. *The e-evolution of Information Communication Technology in Cultural Heritage: where hi-tech touches the past: risks and challenges for the 21st century*. Budapest: Ioannides, M. et al. (eds).
- Biagini, C., Capone, P., Donato, V., & Facchini, N. (2016). Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. *Automation in Construction*, 71 (1), 74-86.
- buildingSMART Spain. (23 de 06 de 2022). ¿Qué es BIM? Obtenido de <https://www.buildingsmart.es/bim/>
- Charef, R., Alaka, H., & Emmitt, S. (2018). Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views. *Journal of Building Engineering*, 19, 242-257.



- Chiabrando, F., Lo Turco, M., & Rinaudo, F. (2017). Modeling decay in an HBIM starting from 3D point clouds. A followed approach for cultural heritage knowledge. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5*, 605-612.
- Chun, L., Yujie, C., Chen, Y., Yuan, Z., & Mengchi, A. (2020). Pattern identification and analysis for the traditional village using low altitude UAV-borne remote sensing: multifeatured geospatial data to support rural landscape investigation, documentation and management. *Journal of Cultural Heritage, Vol. 44*, 185-195.
- Clapuyt, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2016). Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology, 260*, 4-15.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volumen 92*, 79-97.
- Crespi, P., Franchi, A., Ronca, P., Giordano, N., Scamardo, M. A., Gusmeroli, G., & Schiantarelli, G. (2015). From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building. *WIT Transactions on The Built Environment, 149*, 581-592.
- DegreeTutors. (23 de 06 de 2022). *Finite Element Analysis of Continuum Structures in Python*. Obtenido de <https://www.degreetutors.com/isoparametric-finite-element-analysis-of-continuum-structures-in-python/>
- Denard, H. (2016). A new introduction to the London Charter. En A. Bentkowska-Kafel, & H. Denard, *Paradata and Transparency in Virtual Heritage* (págs. 83-98). Routledge.
- Dore, C., & Murphy, M. (2017). Current state of the art historic building information modelling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5*, 185-192.
- El-Hakim, S. F., Beraldin, J. -A., Picard, M., & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications, 24 (3)*, 21-29.
- Fernández, J., & Gutiérrez, G. (2017). The Alejico Carboniferous Forest: a 3D-Terrestrial and UAV-Assisted Photogrammetric Model for Geologic Heritage Preservation. *Geoheritage, Volume 9*, 163-173.
- Fernández, J., González, D., Rodríguez, P., & Mancera, J. (2014). Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications. *Archaeometry, 57(1)*, 128-145.
- Filming Almería. (23 de 06 de 2022). *Localizaciones*. Obtenido de Patrimonio Industrial-Patrimonio: <https://www.dipalme.org/Servicios/cmsdipro/index.nsf/informacion.xsp?p=filming&documentId=2F718E5AE3184B55C1257D8E005FC6C3&seccion=Localizaciones>



- Galeazzi, F. (2017). 3D recording, documentation and management of cultural heritage. *International Journal of Heritage Studies*. Volume 23 (7), 671-673.
- García , F. (23 de 06 de 2022). *El Acueducto de Carcauz pasará a ser Bien de Interés Cultural*. Obtenido de La Voz de Almería: <https://www.lavozdealmeria.com/noticia/3/provincia/240048/el-acueducto-de-carcauz-pasara-a-ser-bien-de-interes-cultural>
- Gil Albarracín, A. (1983). Construcciones romanas de Almería. *Faventia*, 5(2), 152-154.
- Girardeau Montaut, D. (26 de 06 de 2022). *CloudCompare*. Obtenido de 3D point cloud and mesh processing software. Open Source Project: <http://www.danielgm.net/cc/>
- Guo, Q., Liu, H., Hassan, F. M., Bhatt, M. W., & Buttar, A. M. (2022). Application of UAV tilt photogrammetry in 3D modeling of ancient buildings. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13, 424-436.
- Hugenholtz, C., Brown, O., Walker, J., & Barchyn, T. E. (2016). Spatial Accuracy of UAV-Derived Orthoimagery and Topography: Comparing Photogrammetric Models Processed with Direct Geo-Referencing and Ground Control Points. *Geomatica*, 70 (1), 21-30.
- Junta de Andalucía. (23 de 06 de 2022). *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía - Histórico del BOJA*. Obtenido de Boletín número 119: <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2022/119/32>
- Karachaliou, E., Georgiou, E., Psaltis, D., & Stylianidis, E. (2019). UAV for mapping historic buildings: from 3D modelling to BIM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 397-402.
- Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., . . . Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, Volume 153, 224-238.
- LANZADERA DIGITAL, S. (24 de 01 de 2022). *Helix North*. Obtenido de Sistema georreferenciado de datos RTK y PPK, ¿cuál es mejor?: <https://www.helixnorth.com/blog/sistema-georreferenciado-de-datos-rtk-y-ppk-cul-es-mejor>
- Lemmens, M. (2011). Terrestrial Laser Scanning. En M. Lemmens, *Geo-information* (págs. 101-121). Springer.
- Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L., & Lin, J. (2015). Use of UAV oblique imaging for detection of individual trees in residential environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14 (2), 404-412.



- Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2 (5W3), 177-183.
- López Medina, M. J. (1995). El agua en el sureste peninsular durante época romana. Su aprovechamiento para la agricultura. *Agricultura y regadío en Al-Andalus, síntesis y problemas : actas del coloquio, Almería, 9 y 10 de junio de 1995*, (págs. 13-16). Almería.
- López Torres, C. U., Tena Colunga, A., & Juárez Luna, G. (2017). Modelado no lineal de muros de mampostería combinada y confinada. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Guadalajara, Jalisco (Mexico): Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- MapaMedia. (23 de 06 de 2022). *Mapa Media Servicios Geospaciales*. Obtenido de Fotogrametría con drones: <https://www.mapamedia.com/levantamientos-aereos/>
- Martín-Caro Álamo, J. A. (2001). Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de Comprobación. *Tesis Doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez Carricondo, P., Agüera Vera, F., & Carvajal Ramírez, F. (2020a). Use of UAV-Photogrammetry for Quasi-Vertical Wall Surveying. *Remote Sensing*, 12 (14), 2221.
- Martínez Carricondo, P., Carvajal Ramírez, F., Yero Paneque, L., & Agüera Vega, F. (2021). Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain). *Heritage Science*, 9 (95).
- Martínez Carricondo, P., Carvajal Ramírez, F., Yero Paneque, L., & Agüera Vera, F. (2020b). Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). *Building Research & Information*, 48, 140-159.
- Meroño, J. E. (2022). Tema 3.- Orientación en Fotogrametría. *Generación de Modelos Geométricos Mediante UAV*. Córdoba, Córdoba, España: Universidad de Córdoba.
- Ministerio de Vivienda. (17 de 3 de 2006). Código Técnico de la Edificación. *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. España.
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavía, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27 (4), 311-327.
- Ochmann, S., Vock, R., & Klein, R. (2019). Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 251-262.
- Pocobelli, D. P., Boehm, J., Bryan, P., Still, J., & Grau Bové, J. (2018). BIM for heritage science: a review. *Heritage Science*, 6 (30).



- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104-1138.
- Roca, P., Molins, C., & Carol, I. (2000). Análisis de edificios de muros de carga de mampostería ante acciones horizontales. *Hormigón y acero*, 215, 115-126.
- Rodríguez López, J. M., & Cara Barrionuevo, L. (1989). Aproximación al conocimiento de la historia agrícola de la Alpujarra oriental (Almería). Épocas antigua y medieval. En L. Cara Barrionuevo, *El agua en zonas áridas. Arqueología e historia. Hidráulica tradicional de la provincia de Almería* (págs. 441-466). Almería: Instituto de Estudios Almerienses. Departamento de Historia.
- Rodríguez Moreno, C., Reinoso Gordo, J. F., Rivas López, E., Gómez Blanco, A., Ariza López, F. J., & Ariza López, I. (2018). From point cloud to BIM: an integrated workflow for documentation, research and modelling of architectural heritage. *Survey Review*, 50, 212-231.
- Rosnell, T., & Honkavaara, E. (2012). Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera. *Sensors*, 12 (1), 453-480.
- Rüther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S. J., . . . Horwitz, L. K. (2009). Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36 (9), 1847-1856.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., & Abellán, A. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. *10º Simposio Nacional Ingeniería Geotécnica*, (págs. 19-21). A Coruña.
- Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019). *An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry: Benefits and Barriers*. Bingley: Emerald Publishing Limited.
- UNE, A. E. (2020). *Estandarización de la información digital para el proyecto, construcción y gestión de edificios y obras de ingeniería civil*. Asociación Española de Normalización (UNE).
- Vázquez Guzmán, J. P. (2014). La hidráulica rural de Carcauz (Vicar-Almería). *Revista de Hespérides*, 16, 7-10.
- Vetrivel, A., Gerke, M., Kerle, N., & Vosselman, G. (2015). Identification of damage in buildings based on gaps in 3D point clouds from very high resolution oblique airborne images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105, 61-78.
- Wingtra. (23 de 06 de 2022). *Software de fotogrametría recomendado*. Obtenido de <https://wingtra.com/es/mejor-software-de-fotogrametria/>



Resumen:

El Acueducto de los Veinte Ojos es una obra de ingeniería hidráulica con varios siglos de historia que pronto será declarado BIC. Las irregularidades geométricas, la heterogeneidad de sus materiales o su accesibilidad, suponen un desafío para la simulación estructural de este tipo de monumentos.

Los recientes avances en el campo de la fotogrametría UAV, el desarrollo de modelos BIM y la potencia de los ordenadores actuales para resolver modelos de elementos finitos, permiten abordar la labor de reconstrucción, protección y conservación de nuestro patrimonio desde una perspectiva mucho más precisa, ágil y motivadora.

En el presente trabajo, se aplica la innovadora metodología Cloud-to-BIM-to-FEM, capaz de convertir modelos BIM generados a partir de nubes de puntos en modelos de elementos finitos. La obtención de la nube de puntos se ha ejecutado mediante fotogrametría UAV llevando a cabo un levantamiento 3D del estado actual del acueducto y su entorno. La nube de puntos obtenida ha servido como base para la generación de un modelo HBIM que representa con precisión la geometría del acueducto (Cloud-to-BIM). El modelo HBIM se ha transformado en un modelo de elementos finitos que respeta la singularidad del monumento sin excesivas simplificaciones geométricas (BIM-to-FEM). Finalmente, se deducen diversas consideraciones sobre la estabilidad del conjunto y su comportamiento estructural ante acciones como el viento o el sismo.

