

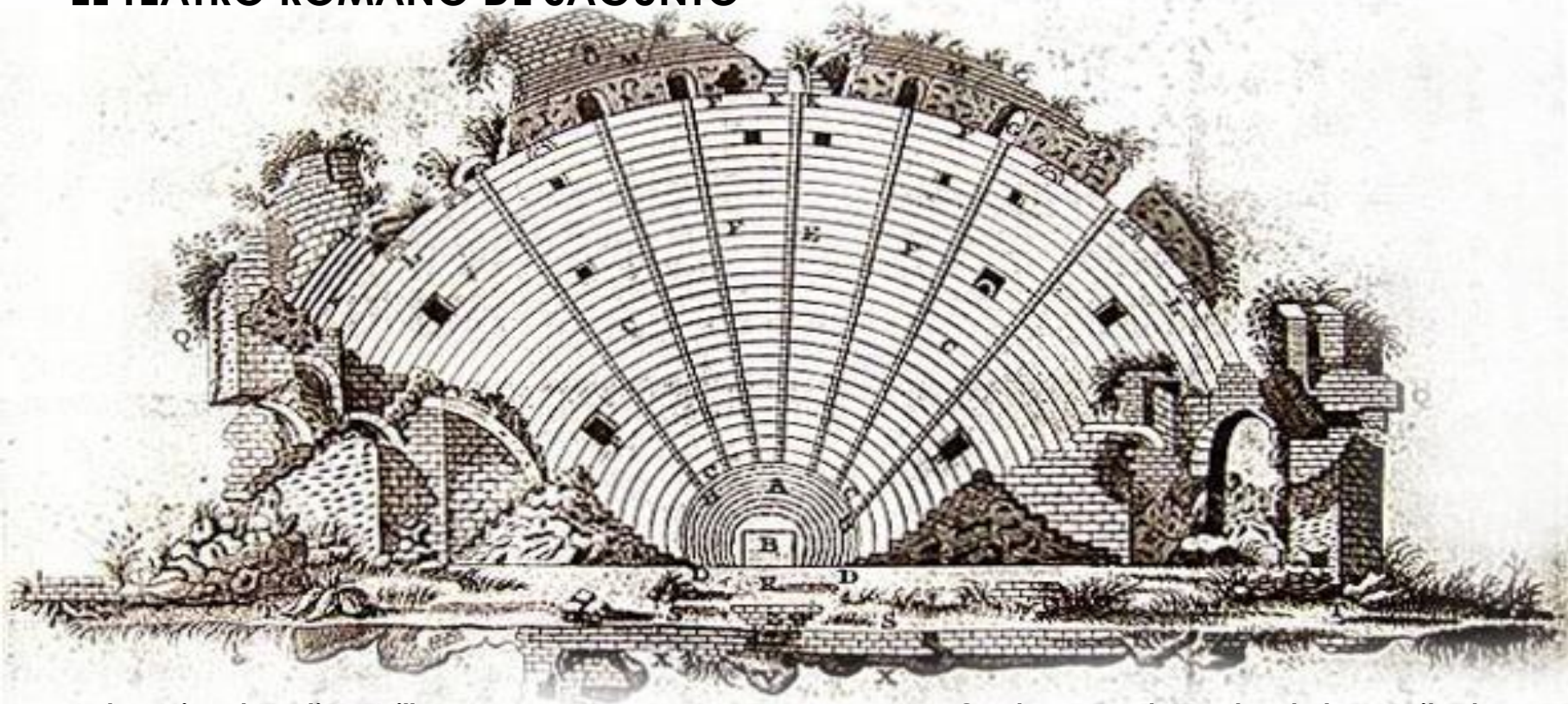


ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

MODELADO BIM DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PARA LA INTERVENCIÓN: EL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO



Autor: Miguel Martinez Villa
Tutor: Francisco Juan Vidal
Valencia 2017/2018

Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Trabajo Final de Grado

MODELADO BIM DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PARA LA INTERVENCIÓN: EL TEATRO ROMANO DE SAGUNO

Autor: Miguel Martínez Villa

Tutor: Francisco Juan Vidal

Trabajo Final de Grado

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

Universitat Politècnica de València

Escola Tècnica Superior D'Arquitectura



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

RESUMEN

El desarrollo de la metodología BIM para la realización de proyectos de rehabilitación e intervención en el patrimonio ha supuesto un gran avance en el proceso proyecto-construcción que, implementándola con la herramienta de nube de puntos, permite obtener numerosas ventajas en cuanto a fiabilidad y veracidad del modelo con respecto a la realidad. Esto nos permitirá un levantamiento del modelo menos arduo y con mejores resultados.

Sin embargo, al ser una herramienta relativamente nueva, se encuentra en constante evolución. En este trabajo se expondrá el desarrollo de dichas herramientas así como sus ventajas, con el fin de establecer una comparativa con las metodologías empleadas hasta la fecha.

El programa Revit de Autodesk es uno de los principales software que trabajan con BIM, por ello se utilizará en este trabajo para desarrollar un modelo 3D que nos permita obtener y evaluar la situación actual del edificio para su posterior intervención. Dicho edificio será el teatro romano de Sagunto.

PALABRAS CLAVE

H-BIM, Revit, nube de puntos, patrimonio, teatro romano.

RESUM

El desenvolupament de la metodologia BIM per a la realització de projectes de rehabilitació i intervenció en el patrimoni ha suposat un gran avanç en el procés projecte-construcció que, emprant la ferramenta "Nuba de Puntós", ens permet obtenir nombrosos avantatges en fiabilitat i veracitat del model menys complexos i amb millors resultats.

No obstant això, al ser una ferramenta prou nova, es troba en constant evolució. En aquest treball s'exposarà el desenvolupament d'aquestes ferramentes així com els seus avantatges, per tal d'establir una comparativa entre les metodologies emprades fins ara.

El programa Revit de Autodesk és un dels principals softwares que treballen amb BIM, per això s'emprarà en aquest treball per desenvolupar un model 3D que ens permetrà obtindre i avaluar la situació actual de l'edifici per a la seua posterior intervenció. Aquest edifici serà el teatre romà de Sagunt.

PARAULES CLAU

H-BIM, Revit, nuba de puntós, patrimoni, teatre romà

ABSTRACT

The development of the BIM methodology for the realization of projects of rehabilitation and intervention in the historic heritage has meant a great advance in the project-construction process that, implementing it with the point cloud tool, allows us to obtain numerous advantages in terms of reliability and veracity of the model with respect to reality. This will allow a less arduous model lift and with better results.

However, as it is a relatively new tool, it is in constant evolution. In this paper we will explain the development of these tools as well as their advantages, in order to establish a comparison with the methodologies used to date.

The Revit program of Autodesk is one of the main software that works with BIM, for that reason it will be used in this work to develop a 3D model that allows us to obtain and evaluate the current situation of the building for its subsequent intervention. That building will be the Roman theatre of Sagunto.

KEY WORDS

H-BIM, Revit, Point cloud, heritage, roman theatre.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 METODOLOGÍA.....	19
2. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM).....	23
2.1 PRECURSORES DEL BIM.....	25
2.2 ¿QUÉ ES BIM?	27
2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA METODOLOGÍA BIM	28
2.3.1 MODELO CENTRALIZADO	28
2.3.2 BIDIRECCIONALIDAD	30
2.3.3 PARAMETRIZACIÓN.....	30
2.3.4 VISUALIZACIÓN DEL MODELO	32
3. HERITAGE – BUILDING INFORMATION MODELING (H - BIM)	33
3.1 UN VISTAZO A LA HISTÓRIA	35
3.2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE H-BIM	36
3.2.1 PATRIMÓNIO.....	36
3.2.2 NUEVAS TECNOLOGÍAS H-BIM.....	38

3.3 CAPTURA Y GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN	41
3.3.1 FOTOGRAMETRÍA 3D	41
3.3.2 TÉCNICA DE ESCANEADO LÁSER	43
3.4 NUBE DE PUNTOS.....	47
3.4.1 MODELADO SEMI-AUTOMÁTICO	47
3.4.2 MODELADO AUTOMÁTICO.....	48
3.5 BIM PARA EDIFICIOS DEL PATRIMONIO CULTURAL	51
3.5.1 SOFTWARES BIM: GRUPOS.....	53
3.5.1.1 Modeladores 3D	54
3.5.1.2 Visualizadores 3D	56
3.5.1.3 Analizadores	57
3.6 CONCEPTO "HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING"	58
3.6.1 FLUJO DE TRABAJO H-BIM.....	59
4. EL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO	65
4.1 TEATROS ROMANOS EN ESPAÑA	67
4.2 ORÍGENES DEL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO	69
4.3 INTERVENCIONES EN EL TEATRO ROMANO	71

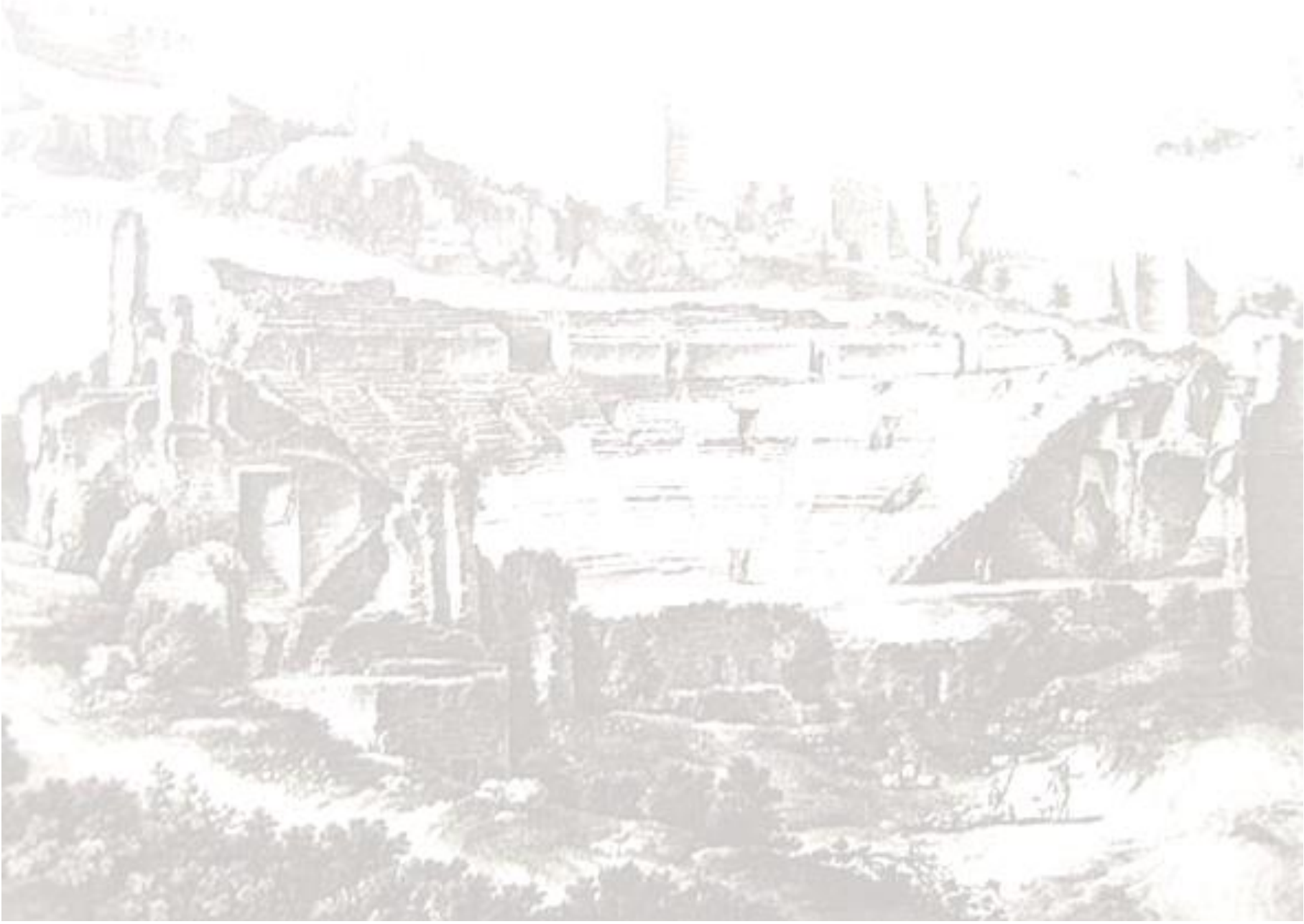
4.3.1 RESTAURACION DE GIORGIO GRASSI Y MANUEL PORTACELI (1984 – 1993)	72
5. DESARROLLO Y ELABORACIÓN DE UN PROYECTO DE INTERVENCIÓN EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO	75
5.1 GESTIÓN DEL MODELO Y PASOS PREVIOS	77
5.1.1 INFORMACIÓN PREVIA.....	78
5.1.2 LOCALIZACIÓN Y GEOGRAFÍA	81
5.1.3 NUBE DE PUNTOS Y PLANOS	84
5.1.4 FASES DE PROYECTO	87
5.1.5 PLANOS DE REFERENCIA: NIVELES Y REJILLAS	89
5.1.6 ARCHIVOS VINCULADOS	91
5.2 MODELADO ARQUITECTÓNICO	94
5.2.1 MASA Y EMPLAZAMIENTO: PLATAFORMAS DE CONSTRUCCIÓN.....	95
5.2.2 SUELOS.....	97
5.2.3 MUROS.....	101
5.2.5 RAMPAS Y ESCALERAS.....	104
5.2.4 PILARES Y VIGAS	107
5.2.5 CERCHAS	109

5.2.6 HUECOS Y CARPINTERÍAS	111
5.2.7 BARANDILLAS.....	113
5.2.8 MODELOS GENÉRICOS.....	115
5.3 VISUALIZACIÓN 3D DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN.....	121
5.3.1 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO	123
5.3.2 IMÁGENES COMPARATIVAS	147
6. CONCLUSIONES.....	163
7. BIBLIOGRAFÍA.....	169
8. REFERENCIA DE IMÁGENES	173

Modelado BIM del patrimonio arquitectónico para la intervención: El teatro romano de Sagunto

1. INTRODUCCIÓN





1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la emergente tecnología H-BIM en el ámbito de la restauración arquitectónica, ya sea obra construida o patrimonio. Se trata de una nueva metodología de trabajo revolucionaria que está cambiando la gestión de proyectos arquitectónicos. Para comprender este cambio, será necesario analizar su evolución y funcionamiento en una fase previa hasta centrarnos en el campo de la restauración. Para ello, se plantea una serie de objetivos secundarios tales como:

- Dar a conocer la evolución de la tecnología BIM focalizada en la rehabilitación e intervención en patrimonio y compararla con las distintas metodologías de trabajo empleadas hasta la fecha.
- Comprender el uso del H-BIM y de la nube de puntos para optimizar resultados.
- Conocer la herramienta de trabajo Revit de Autodesk.
- Poner en práctica dicha metodología mediante la elaboración de un modelo con Revit del teatro romano de Sagunto.
- Obtener un modelo fiel a la realidad con el que poder intervenir una vez realizado.

1.2 METODOLOGÍA

Para establecer un seguimiento y cumplir con los objetivos planteados, se han seguido unos pasos tanto para la búsqueda de información como para la elaboración del modelo. El trabajo constará de dos partes diferentes: una correspondiente a la parte teórica del tema a tratar y la otra, la visión práctica del mismo. A su vez, dichos temas se subdividen en dos más, la primera se compondrá del marco teórico sobre la metodología BIM y una breve explicación del teatro romano de Sagunto; y la segunda estará la fase de elaboración del modelo en Revit y las correspondientes conclusiones tras su levantamiento. A continuación, se describirá detalladamente toda la metodología empleada para abordar el trabajo de investigación.

En primer lugar, antes de comenzar con el modelado y su búsqueda de información, se solicita al tutor Francisco Juan Vidal las ayudas necesarias para la creación del modelo virtual, a saber: planos, archivos vectoriales, revistas y libros, y como no el archivo que contiene la nube de puntos que nos ayudará en la elaboración de la parte práctica de este trabajo. El edificio patrimonial elegido para la realización del trabajo será el rehabilitado teatro romano de Sagunto, localizado en la ladera norte de la montaña situada al sur de Sagunto.

Posteriormente se procederá a la búsqueda de información en textos, tesis, páginas webs, podcasts, libros, artículos, etc, siendo toda esta información muy relevante a la hora de realizar la parte teórica del trabajo. Tras su lectura, estudio y comprensión, se esquematizará la información en apartados para su mejor entendimiento de los conceptos claves del trabajo.

Atendiendo al índice del trabajo, se explicará un primer punto de marco teórico correspondiente a la metodología BIM, donde se detallará cómo ha evolucionado esta forma de trabajo y el nacimiento de H-BIM para la elaboración de proyectos de restauración del patrimonio histórico. Y en el siguiente punto se dará una breve explicación del teatro romano, sus orígenes y como le ha afectado el paso del tiempo desde el punto de vista arquitectónico y de restauración.

Para la parte práctica es necesario poseer un nivel avanzado de Revit (el software con el que se elaborará el modelo, que trabaja mediante la metodología BIM), del cual se ha obtenido el conocimiento a través de cursos, guías oficiales e información encontrada en la web. Paralelamente con el trabajo, se han realizado prácticas de empresa que han aportado al alumno conocimientos y ayudas que facilitarán la elaboración de este trabajo y experiencia en el ámbito de BIM. La parte práctica se dividirá en tres bloques: en el primero se realizará la gestión del modelo virtual y comparación con los planos y datos facilitados; en el segundo se modelará el teatro romano atendiendo a la nube de puntos; y, en el tercero, se establecerán comparaciones del modelo con la realidad y se sacarán las correspondientes conclusiones tras su modelado.

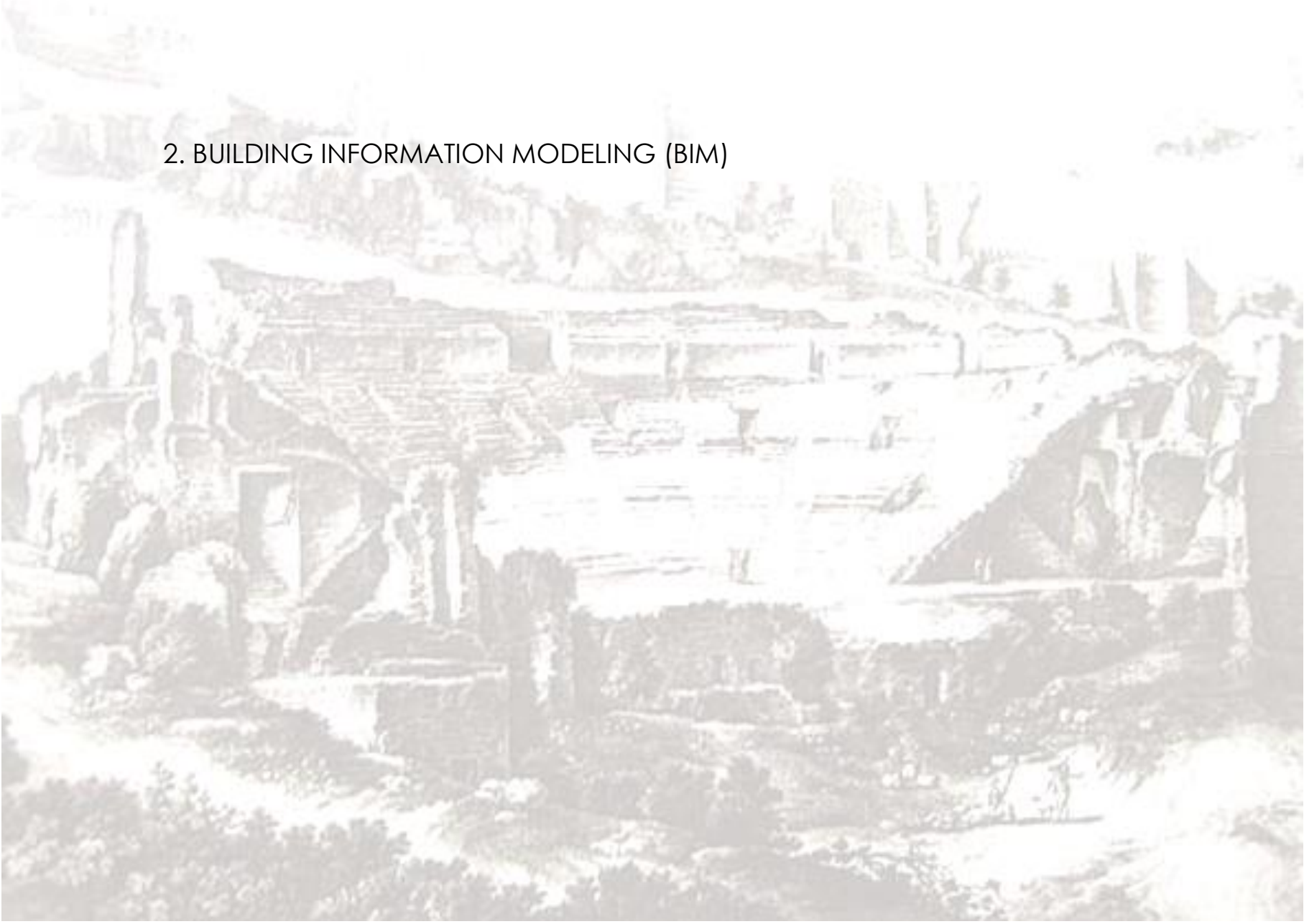
En relación al primer bloque de la parte práctica, tras obtener la información y archivos necesarios, se procederá a la elaboración del modelo realizando los pasos previos para su posterior levantamiento. Estos pasos engloban: estudio y análisis de los distintos documentos facilitados para el trabajo, limpieza de los archivos vectoriales, generación de topografía, distinción en fases de proyecto y fijar las guías que faciliten el posterior modelado. Se explicará detalladamente el uso de cada función y las ventajas que se pueden obtener de cada una.

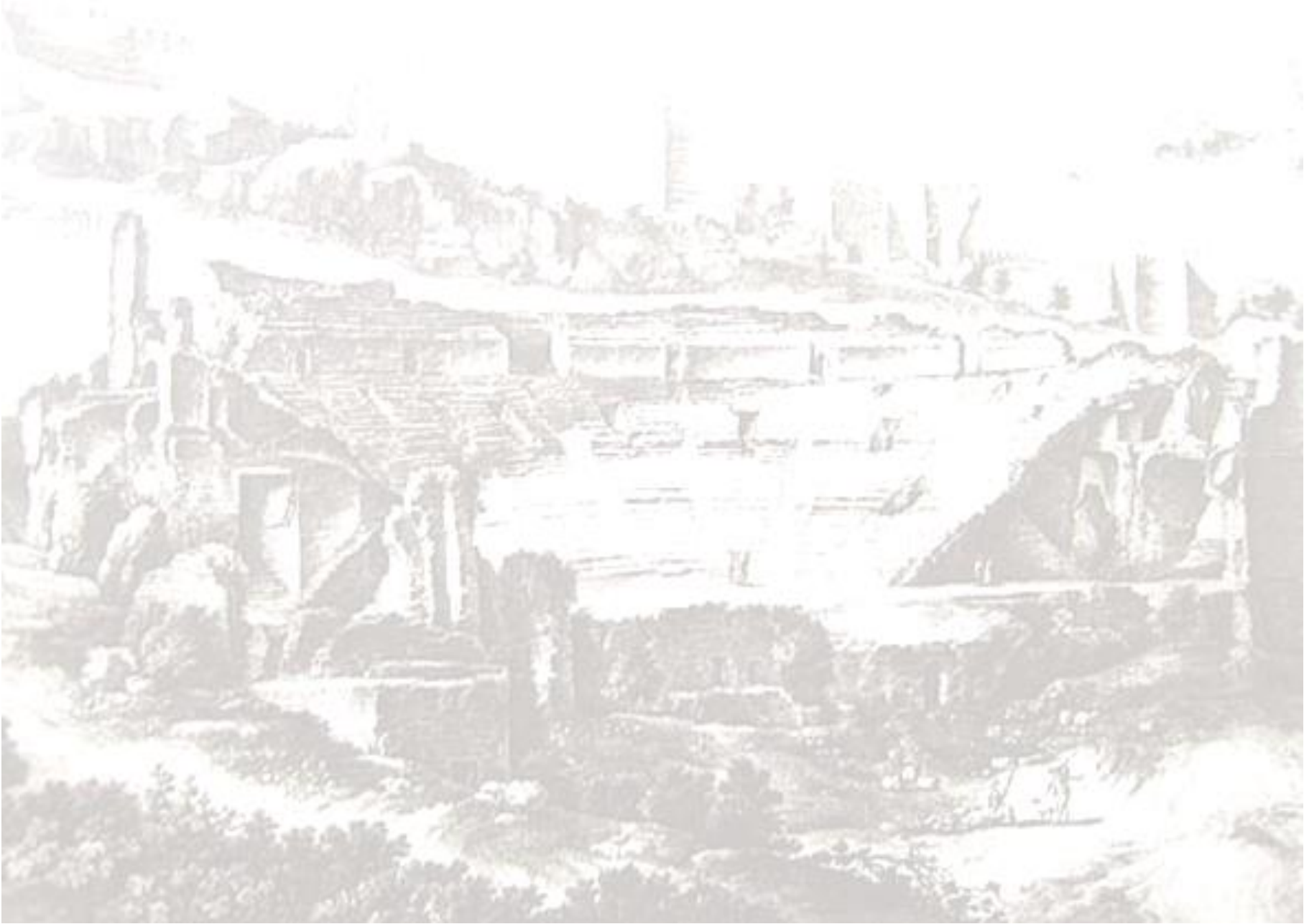
En el segundo bloque, es necesario concertar una visita al teatro romano con el fin de establecer una comparativa con la información obtenida y poder generar un modelo que, junto con la nube de puntos y planos obtenidos, sea fiel a la realidad. En este punto se tomarán varias fotografías que nos sirvan para contrastar y comparar el modelo virtual con el edificio histórico. Este bloque de la parte práctica ha sido el que más tiempo ha necesitado para su elaboración.

Referente al tercer bloque, se sacaran varias imágenes del modelo virtual para establecer una comparación con el estado actual del teatro romano y obtener unos resultados viables para, si en un momento dado, se quisiera proseguir con la restauración o el mantenimiento del edificio. Además, en este bloque, se redactarán las conclusiones tras haberse documentado con el marco teórico y realizado la puesta en práctica con el modelo virtual. Se establecerán de esta manera las ventajas y desventajas que presenta la utilización de la tecnología BIM en el campo de la restauración.

Por último, se elaborará un anexo gráfico que contenga todas las vistas del modelo, en las que se configurará las opciones de visualización para optimizar y poder presentar una propuesta posterior de restauración. Este anexo comprenderá vistas de planta, alzados, secciones, volumetrías, etc.

2. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)





2.1 PRECURSORES DEL BIM

Para poder entender la metodología BIM de trabajo, es necesario explicar los antecedentes de este. En el campo de la construcción existe esa búsqueda constante de mejora de la gestión y relación proyecto-construcción a través de nuevas herramientas, procesos, asociaciones y metodologías de trabajo. Para ello se han ido desarrollando:

- Contenedores de información como "Building Information Systems" cuyo objetivo será generar datos durante toda la vida del proyecto a partir de todos los elementos que participen en él.
- Asociaciones capaces de gestionar e implementar esta tecnología como BuildingSMART que pretende *"fomentar la eficacia en el sector de la construcción a través del uso de estándares abiertos de interoperabilidad sobre BIM para alcanzar nuevos niveles en reducción de costes y tiempos de ejecución y aumento de la calidad."*¹
- Formatos de archivos que facilitan la utilización de los softwares BIM como los "Industry Foundation Class" (IFC) que favorecen la intercomunicación entre distintos programas en el sector de la construcción permitiendo así el intercambio de datos pertenecientes a un edificio durante todo su ciclo de vida.

¹ BuildingSMART Spanish Character

Estos avances tecnológicos y asociaciones han permitido elaborar una metodología de trabajo que reúna a los distintos activos que intervienen en el proceso proyecto-construcción y fomentar la interoperabilidad y el intercambio de información entre las distintas partes. A diferencia de las metodologías de trabajo anteriores, BIM permite trabajar desde un modelo central que permita a los distintos activos, arquitecto, técnicos, ingenieros, constructores, etc, participar y volcar la información correspondiente una vez realizada individualmente.

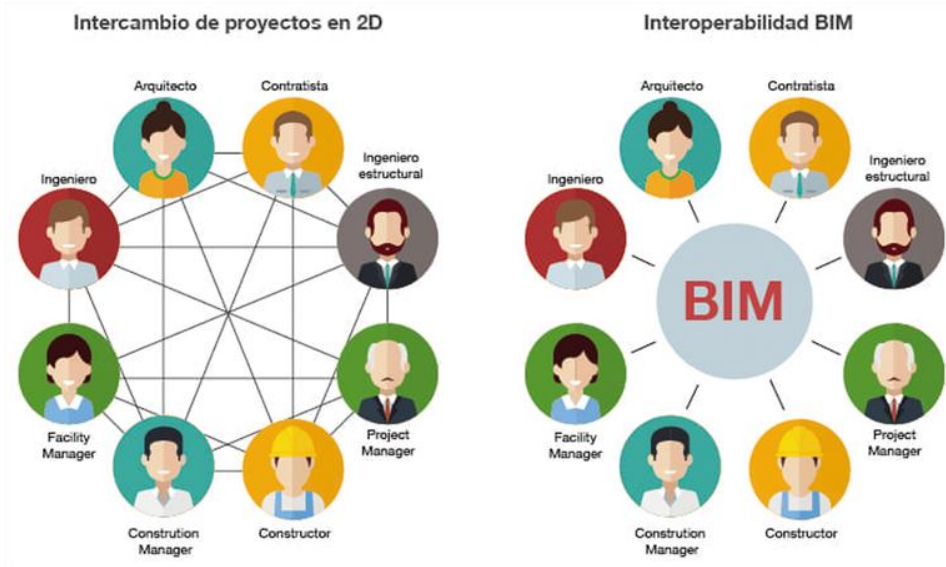


Figura 1: Esquema comparativo entre proyectos en 2D y en BIM.

2.2 ¿QUÉ ES BIM?

Las siglas BIM vienen de la abreviación de "Building Information Modeling" cuya traducción al castellano sería "Información del modelado en la construcción". El término nos define la idea principal de la metodología BIM, la cual es trabajar en el sector de la construcción mediante un modelo virtual que nos aporte información.

Dado el auge que está teniendo la metodología BIM encontramos numerosas definiciones en la web sobre qué es y no es BIM. Alberto Cerdán nos habla sobre su propia definición sobre el término:

*"BIM, Building Information Modeling o Modelado de la Información de la Construcción, es el proceso o metodología que nos sirve para crear, gestionar y almacenar de forma estructurada, información sobre las etapas y las distintas partes de la Construcción y las relaciones entre ellas."*²

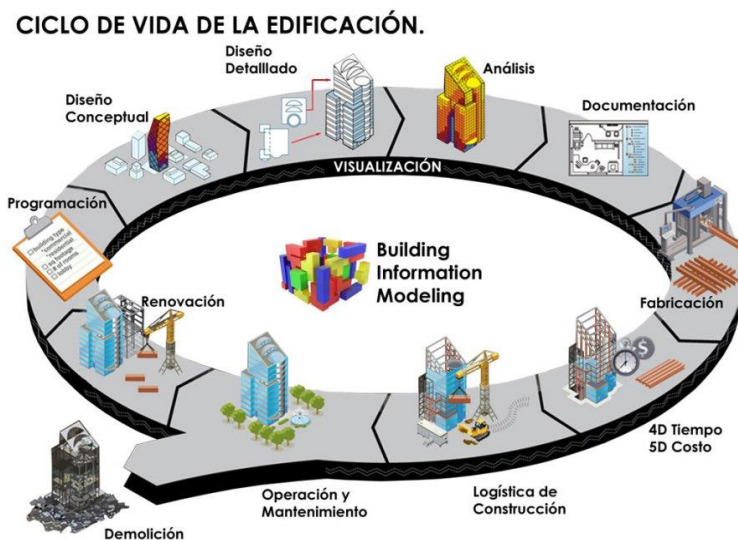


Figura 2: Control de obra a través de la metodología BIM

² Cerdán Castillo 2012a

2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA METODOLOGÍA BIM

Con la finalidad de establecer una metodología de trabajo totalmente distinta a la empleada hasta la fecha, la invención de una tecnología con la capacidad de clasificar y gestionar la información entre los distintos agentes que participan en el proceso proyecto-construcción ha llegado a revolucionar la industria de la construcción a nivel global. Esta metodología de trabajo se fundamenta en cuatro principios básicos de uso común en todos los softwares BIM: el uso de un modelo central, la bidireccionalidad, la parametrización y la visualización del modelo.³

2.3.1 MODELO CENTRALIZADO

El modelo centralizado se comporta como un contenedor de información virtual acerca de la construcción donde se vuelcan y actualizan los datos que los distintos agentes han ido desarrollando independientemente en sus propios modelos. Es decir, siempre que se genere nueva información sobre el modelo, se deberá introducir en este, coordinar y contrastar su validez con el resto de información.

³ Cerdán Castillo 2012b

Dado que todos estos procesos de adición y comprobación de información trabajan con grandes cantidades de datos, es necesario que intervengan procedimientos mecanizados mediante tecnología informática.



Figura 3: Interoperabilidad e intercambio de información entre los distintos agentes

2.3.2 BIDIRECCIONALIDAD

Se trata de una cualidad que poseen todos aquellos softwares que trabajan en la metodología BIM. Dichas aplicaciones tienen la capacidad de extraer información del modelo, gestionar dicha información e introducirla de nuevo en el modelo centralizado, coordinando y comprobando las relaciones que se establecen con la información ya existente. En el caso de que la aplicación elegida no fuese capaz de validar la información introducida con la información previa, se deberá introducir a mano la información para no perder la idea de trabajo con BIM.

Este avance tecnológico de poder trabajar paralelamente en las distintas etapas de un proceso proyecto-construcción ha agilizado el desarrollo de nuevos proyectos ya sean de nueva edificación o rehabilitaciones, y han reducido considerablemente el margen de error que puedan llegar a producirse durante la elaboración del proyecto. Esta cualidad es una de las principales diferencias con respecto a la elaboración de proyectos en 2D.

2.3.3 PARAMETRIZACIÓN

La importancia de BIM que le hace destacar por encima de algunas metodologías de trabajo utilizadas hasta la fecha, es la ventaja de poseer grandes cantidades de información sujetas a parámetros que dan lugar a una buena conectividad y acceso a la misma de manera sencilla.

Modelado BIM del patrimonio arquitectónico para la intervención: El teatro romano de Sagunto

Los modelos contienen información parametrizada y dentro de estos modelos, se encuentran otros componentes, los cuales también tienen sus propios parámetros. De esta manera se crea una red de información que va enlazando los parámetros del modelo con sus componentes. Estos parámetros deben aportar información útil al modelo, dándole valor al proyecto, estando presentes en toda la evolución del mismo. La información obtenida por los parámetros nos proporcionará datos de gran interés sobre nuestro proyecto, se podrán calcular volúmenes completos de un material concreto, metros cuadrados por superficie, metros lineales de materiales, etc.

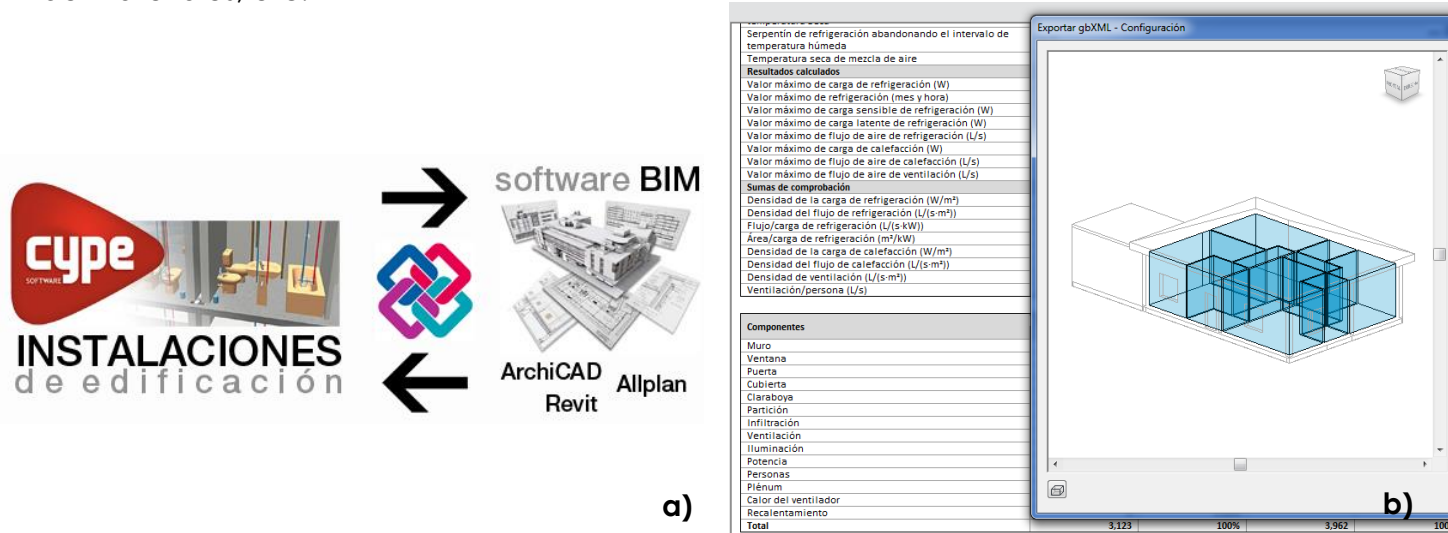


Figura 4: Proceso de bidireccionalidad (a) y parametrización de volúmenes (b)

2.3.4 VISUALIZACIÓN DEL MODELO

Anteriormente a la metodología BIM, el seguimiento de los procesos constructivos se realizaba mediante la representación de estos con métodos como elaboración de planos 2D, gráficas y tablas numéricas totalmente independiente entre ellas, etc; incluso se han realizado representaciones a partir de datos obtenidos de otras representaciones originales. El fallo de este sistema reside en que una vez se realicen modificaciones en el modelo, se tendrá que proceder a revisar todas las representaciones e ir corrigiendo todas aquellas que vayan a producir cambios en el modelo.

En cambio, mediante la tecnología BIM, no se hace uso de estas representaciones, sino que se basa en el análisis de la información contenida en el modelo central. Esto es lo que se denomina “visualización del modelo”, el poder acceder a toda la información de la construcción en cualquier momento y que esta vaya siendo actualizada a la vez que se realizan cambios en el modelo.

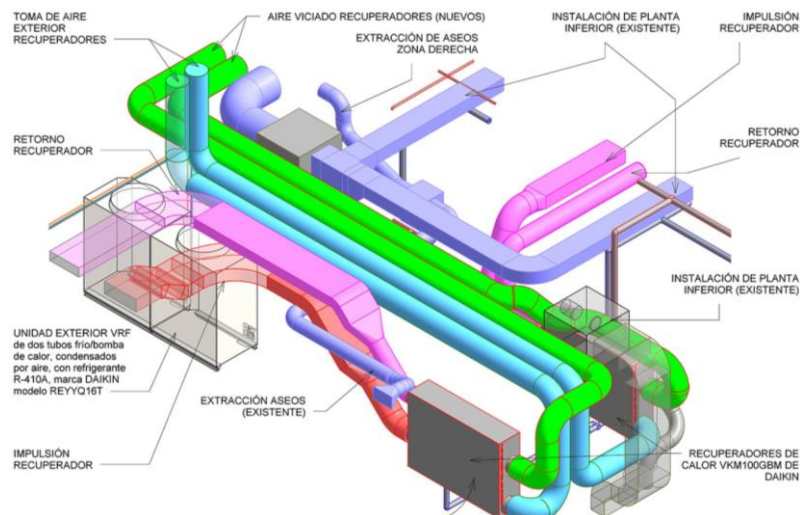
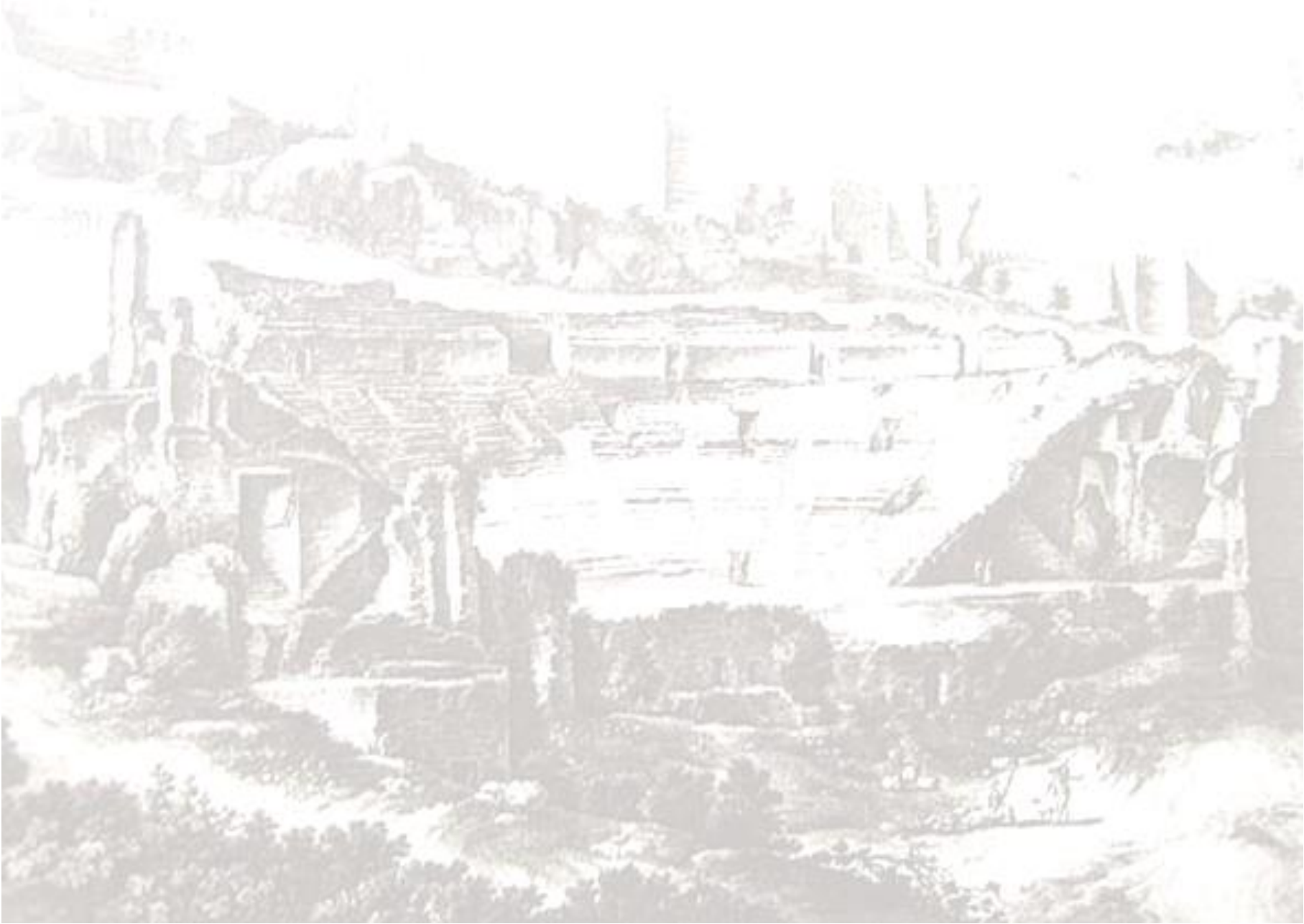


Figura 5: Coordinación perfectamente elaborada entre instalaciones

3. HERITAGE – BUILDING INFORMATION MODELING (H - BIM)





3.1 UN VISTAZO A LA HISTÓRIA

Tras una breve introducción sobre la metodología BIM donde se ha hablado de sus orígenes y las bases en las que se fundamenta para comprender los temas que a continuación se van a tratar. A partir de este punto, se procederá con el desarrollo del trabajo teórico en cuestión.

A lo largo de las últimas décadas, los proyectos relacionados con la protección, conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural han experimentado un gran avance debido al creciente interés, como una fuerza impulsora, del desarrollo socio-económico. La necesidad de conservación y rehabilitación de los edificios y monumentos históricos, ha despertado en los profesionales del ámbito de la restauración, el interés por desarrollar tecnologías y métodos de trabajo que faciliten la elaboración y la recopilación de datos, además, de la posibilidad de barajar distintas intervenciones desde el punto de vista digital.

Con todo ello, la existencia de modelos fiables y digitales tridimensionales que permiten la planificación y la gestión de estos proyectos de forma remota y descentralizada es actualmente una necesidad cada vez mayor. Por ello, el diseño complejo del patrimonio cultural a través de softwares BIM que persiguen el modelado de elementos arquitectónicos, lleva a la consideración de un nuevo concepto denominado "Heritage – Building Information Modeling" (H-BIM) cuya traducción al castellano sería "Información del modelado en la construcción del patrimonio".

Este nuevo concepto emergente pretende comprender, documentar, publicitar y prácticamente reconstruir el patrimonio histórico, despertando esa conciencia restauradora y conservadora.

3.2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE H-BIM

3.2.1 PATRIMONIO

Según la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad se divide en natural, cultural y subacuático. A su vez, el patrimonio cultural se divide en dos grandes categorías, el patrimonio cultural tangible e intangible. Todos ellos reflejan valores universales que deben ser un legado para las generaciones venideras. El patrimonio cultural tangible, concretamente los bienes inmuebles, son el tema a tratar con estas aplicaciones de nueva generación. Sin embargo, existe una falta de documentación e información técnica en muchos edificios históricos existentes. Esto puede resultar, en la gestión de proyectos, insuficiente, pérdida de tiempo e incluso el aumento de los costes de mantenimiento.

Por ello, se está poniendo en práctica el uso de modelos estructurados tridimensionales, como parte del proceso de mejora del patrimonio arquitectónico, siendo una tecnología necesaria, hoy en día, para la comprensión y el seguimiento de documentos, creando así una fuente de datos adecuada para ayudar en los proyectos de conservación y restauración del patrimonio.

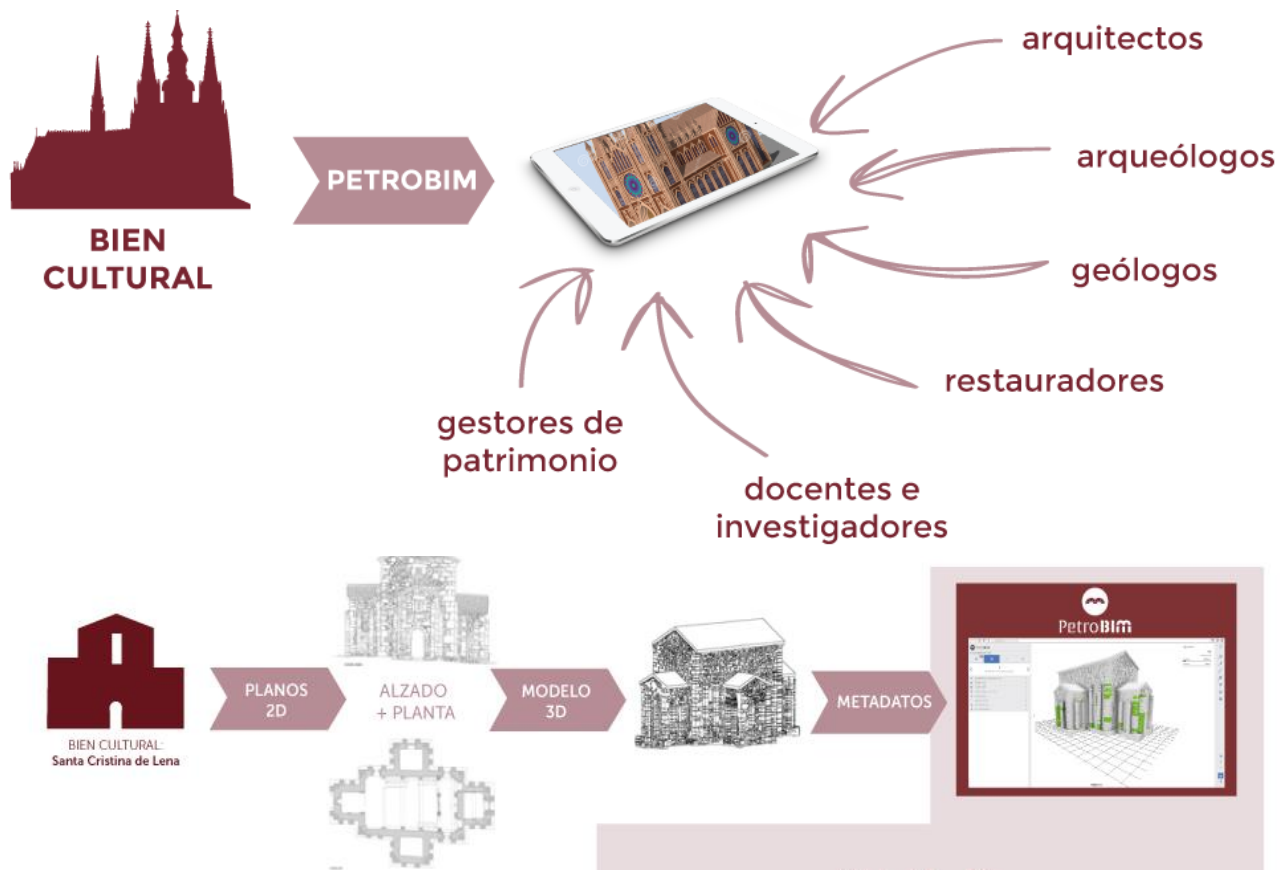


Figura 6: Software BIM, PetroBIM para la intervención en el patrimonio histórico

3.2.2 NUEVAS TECNOLOGÍAS H-BIM

Antes del nacimiento de la metodología BIM se desarrollaron una serie de aplicaciones que facilitaron la recogida y almacenamiento de datos históricos. La tecnología de análisis y fotogrametría 3D son particularmente relevantes para la aceleración de recogida de datos espaciales de los edificios existentes. Además, la aparición de los escáneres láser proporcionaría una reproducción geométrica precisa de objetos tridimensionales en un corto periodo de tiempo, en forma de millones de puntos que se organizan a partir de coordenadas geométricas (X, Y, Z).

Posteriormente, estas nuevas técnicas de trabajo se implementarían en los softwares BIM, siendo aceptadas por la comunidad de expertos y el sector de la construcción e ingeniería, como un paradigma para el diseño, documentación y gestión de edificios existentes, sobre todo los monumentos históricos.

Actualmente, se utilizan diferentes softwares que trabajan con BIM para elaborar modelos con los que poder visualizar y gestionar la documentación integral del patrimonio arquitectónico. Sin embargo, es importante señalar que las bibliotecas y herramientas de dichos softwares se centran en el diseño de nuevos edificios sencillos y regulares, y en objetos estandarizados.

Por esta razón, la reconstrucción virtual y detallada del patrimonio histórico-cultural ha puesto en manifiesto las limitaciones de los softwares BIM, como la falta de disponibilidad de bibliotecas históricas de objetos paramétricos, la falta de herramientas para la gestión de formas complejas e irregulares, y la incertidumbre que provocan las nubes de puntos.

Por otra parte, la obtención de modelos 3D paramétricos de los elementos construidos a partir de las nubes de puntos, se considera un proceso que requiere mucho tiempo. Por lo tanto, con la finalidad de reducir ese coste temporal, se deben almacenar en bibliotecas históricas virtuales, los objetos parametrizados una vez hayan sido modelados mediante la documentación gráfica obtenida por escáner laser⁴. De esta forma se dará origen al concepto de Heritage – Building Information Modeling (H-BIM).

Con estas nuevas bibliotecas H-BIM, que funcionarían como un plug-in para BIM, se pone de manifiesto el concepto de “Smart heritage” (patrimonio inteligente), permitiendo el diseño, rehabilitación, reconstrucción, gestión y mantenimiento del patrimonio arquitectónico, otorgándole la ventaja de ser un modelo virtual simple, limpio y rápido de usar durante el resto de su ciclo de vida.

La creciente necesidad de recuperar y representar digitalmente los edificios patrimoniales junto con las limitaciones de los softwares BIM para automatizar el proceso directo de la nube de puntos a componentes sólidos, ha llevado a los expertos a enfrentarse a la elección de diferentes softwares BIM utilizadas para la gestión y la implementación del diseño semi-automático y reconstrucción de modelos virtuales. Estos procesos son posibles gracias a la creación de archivos comunes mediante “Industry Foundation Classes (IFC)”, comentado anteriormente en el apartado “Precursores del BIM”.

⁴ Murphy (2009) y Volk (2014)

Cabe destacar, que la construcción semi-automática de modelos H-BIM es un tema actual en I + D. Esto se demuestra en el contexto de investigación "UE H2020", bajo dos proyectos principales: DURAARK (Conocimiento arquitectónico duradero) e INCEPTION (Introducción del patrimonio cultural en Europa a través del modelado 3D). INCEPTION, en particular, incluye un enfoque especial sobre el grafismo de H-BIM, su semántica e interoperabilidad topológica, reconociendo como objeto de investigación, la información gráfica de interés en patrimonio cultural, sus fuentes y proveedores, y las tecnologías y formatos empleados.



Figura 7: Logos DURAARK e INCEPTION.

3.3 CAPTURA Y GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

La revolución tecnológica emergente en las últimas décadas, trajo consigo nuevas tecnologías que han mejorado y acelerado las técnicas topográficas de adquisición de datos espaciales para generar modelos precisos. En esta sección, hablaremos sobre dos técnicas particulares, ya comentadas, que han permitido reducir el tiempo de elaboración de un modelo 3D para su estudio: la fotogrametría y el escáner laser terrestre.

3.3.1 FOTOGRAMETRÍA 3D

La fotogrametría es una técnica de medición 3D precisa, sin necesidad de contacto, que se basa en la obtención de varias imágenes de alta calidad que permiten recolectar datos semánticos y espaciales de un edificio u objeto de forma rápida. La fotogrametría es una herramienta basada en la triangulación, donde las líneas de visión de las cámaras, que se encuentran en varios lugares, se unen en un punto en común del objeto.

El post-procedimiento de la reconstrucción fotográfica trae consigo, en una primera estancia, una gran desventaja. Esto se debe a que es un proceso que requiere esfuerzo manual y pérdida de tiempo, sobre todo cuando al realizar la fotografía, la textura del objeto es pobre y su forma compleja⁵. Cabe añadir, que cuando se pretende utilizar dichas imágenes para el

⁵ Grussenmeyer (2008) y Furukawa (2009)

levantamiento de un modelo 2D o 3D de alta calidad, se requieren procesos de comparación de puntos comunes y de ajuste de escala que debe ser aplicado a cada captura. Además, cada imagen debe ser comprobada con mediciones topográficas tomadas “in-situ” que verifiquen la fiabilidad de la captura.

A pesar del reciente desarrollo de aplicaciones y herramientas virtuales, no es posible actualmente un proceso de automatización completa del modelado 3D. Sin embargo, la combinación de la fotogrametría con la visualización por ordenador, está empezando a dar resultados precisos en el modelado 3D para el patrimonio cultural. La accesibilidad en la web, a una multitud de datos fotográficos de calidad se está convirtiendo en una forma más rápida, barata y realista de captar información para reproducir prácticamente la totalidad de objetos y edificios. Es por ello, que se ha despertado el afán por desarrollar innumerables instrumentos y softwares para construir modelos tridimensionales a partir de imágenes.



Figura 8: Fotogrametría 3D de un edificio industrial en Cartagena (Murcia)

3.3.2 TÉCNICA DE ESCANEADO LÁSER

La tecnología de escáner laser surgió por su capacidad para acelerar la recogida de datos espaciales de los edificios existentes o superficies complejas, así como por la precisión y exactitud de los datos adquiridos. Los láseres escáner poseen dos áreas específicas de recogida de datos, la aérea y la terrestre, y cada uno tiene un alcance y precisión adecuada para el uso requerido.

La tecnología escáner láser o Laser Scanner Technologies (TLS) funciona a través de un haz de luces, originados en el láser, que se desplazan hacia el área que está siendo explorada y retorna al mismo, obteniendo mediciones de longitud y ángulos, milímetro a milímetro, con gran detalle y claridad. En este contexto, la TLS obtiene una reproducción geométrica tridimensional precisa y detallada de los objetos a través de millones de puntos, formando una nube, con coordenadas geométricas (X, Y, Z) en un corto periodo de tiempo y en un entorno digital con información tanto métrica como radiométrica.

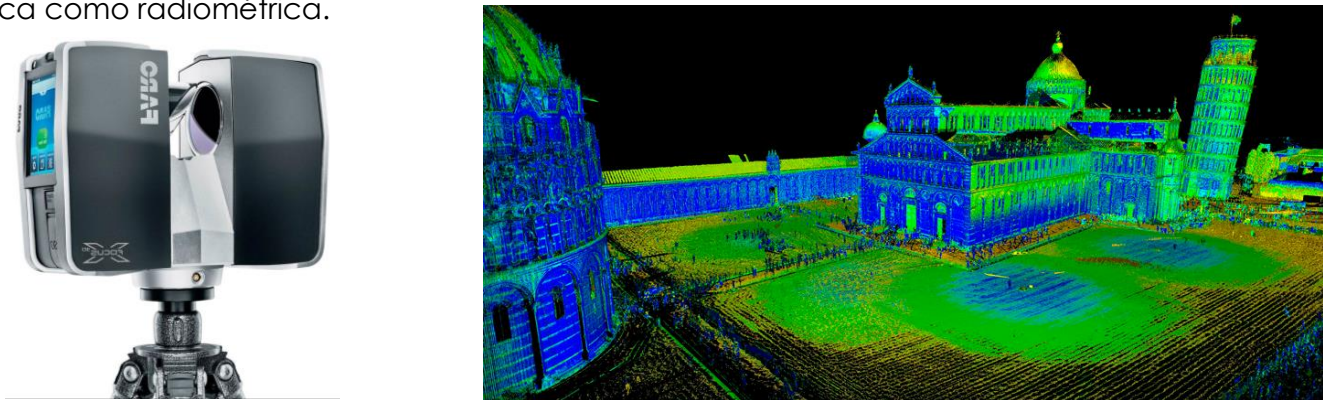


Figura 9: Escáner laser FARO y escaneado de la Catedral y Torre inclinada de Pisa

Podemos encontrar tres tipos diferentes de escáner láser que destacan, a saber, escáner por triangulación, por diferencia de fase y por tiempo de vuelo (Time of Flight, TOF). Cada uno de estos sistemas TLS son capaces de producir nubes de puntos de objetos. Sin embargo, la exactitud y densidad de la nube depende del tipo de escáner seleccionado, así como del número de estacionamientos tomados.

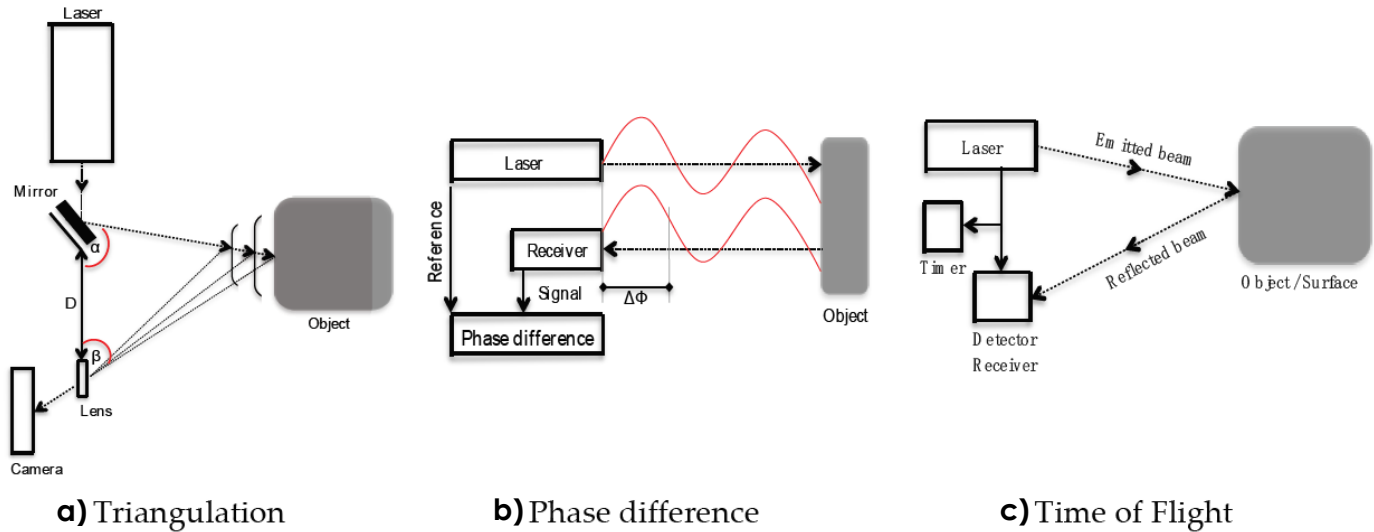


Figura 10: Sistemas de TLS, triangulación (a), diferencia de fase (b) y tiempo de vuelo (c)

Actualmente, el TLS juega un importante papel en el seguimiento de una intervención, en la detección de defectos y en la reproducción de los modelos 3D. Sin embargo, el coste de esta tecnología, la necesidad de un profesional que la utilice y la preparación que requieren puede considerarse como una desventaja.

Para la elaboración de un archivo global de nube de puntos, se debe tener en cuenta que no basta solo con unos pocos estacionamientos pues el escaneado puede verse obstaculizado por algún objeto o elemento arquitectónico, por ello, es necesario obtener un escáner desde diferentes posiciones. Estos distintos estacionamientos generan nubes de puntos parciales que se unirán para formar un único archivo global. Esta técnica es conocida como "el registro de la nube de puntos". Para realizar el registro es necesario que exista un solapamiento entre las series de puntos adyacentes del orden del 20-30% con la finalidad de poder identificar uniones comunes u objetos entre las nubes de puntos.

El registro de la nube de puntos se realiza mediante algoritmos que optimizan la alineación de puntos cercanos en común entre dos estacionamientos, ayudados por el usuario con la edición de datos 3D a través de softwares específicos. Posteriormente, para que la nube de puntos pueda ser utilizada correctamente, se tiene que proceder a la limpieza y filtrado del "ruido" de datos. Este proceso lo realiza un técnico competente mediante softwares específicos de manipulación de puntos que se encargan de limpiar el exceso de información obtenida en cada estacionamiento.

Por otro lado, encontramos la técnica del mallado espacial por superficies poligonales. Esta técnica consiste en elaborar una serie de superficies triangulares, generadas a partir de la nube de puntos, dando lugar a una malla espacial editable que permite facilitar y reducir el exceso de información en la nube, aligerando el modelo 3D y otorgándole mayor rigor y veracidad con respecto a la realidad.

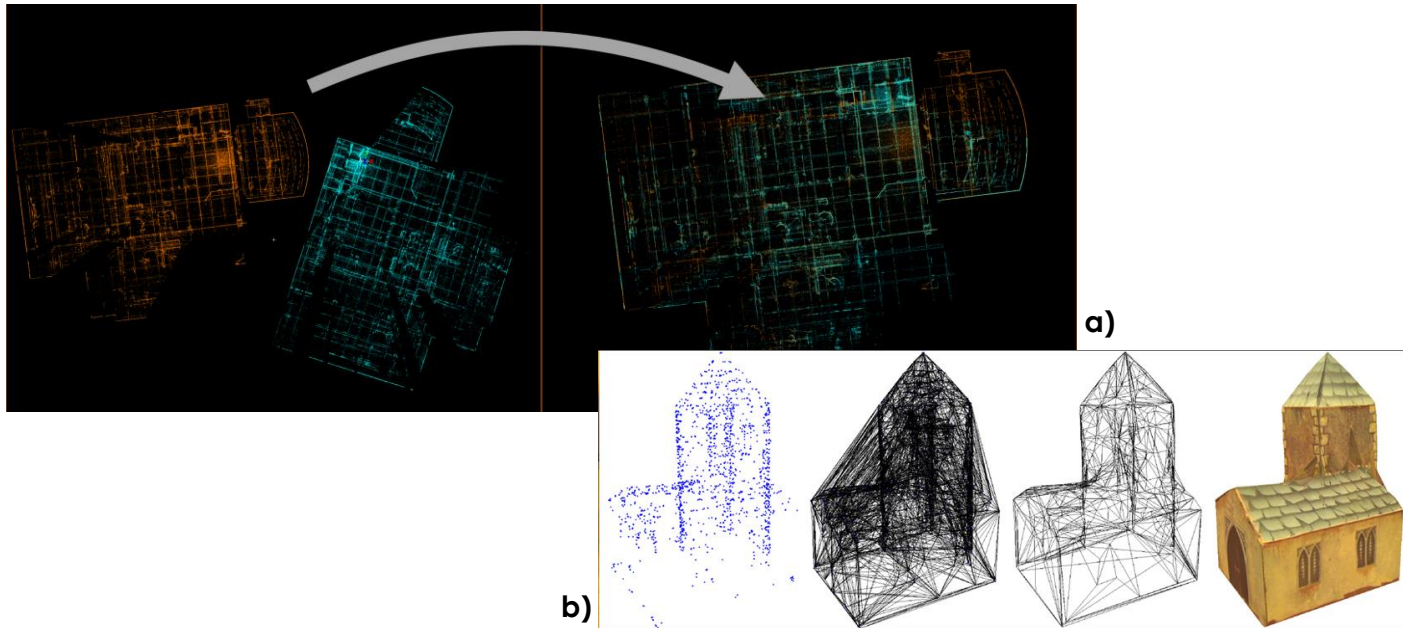


Figura 11: Montaje de nube de puntos global (a) y generación de volumen a partir del mallado espacial (b)

3.4 NUBE DE PUNTOS

La nube de puntos, una vez capturada y filtrada, describe con gran exactitud la superficie de los elementos escaneado. Sin embargo, estas nubes de puntos no aportan información adicional sobre los objetos sobre los cuales se ha realizado el escaneo. Por lo tanto, para obtener información sobre el objeto tridimensional es necesario producir modelos paramétricos a partir de dicha nube.

El reconocimiento y depuración de las nubes de puntos representan actualmente los pasos fundamentales para la identificación correcta y exacta de superficies, además de facilitar la localización y el posterior modelado de objetos paramétricos. Estos pasos pueden llevarse a cabo de forma semi-automática o totalmente automática a través de softwares BIM, así como de algoritmos digitales de reconocimiento de objetos y registro de la nube de puntos.

3.4.1 MODELADO SEMI-AUTOMÁTICO

En el modelado semi-automático se ve implicado el usuario competente en los procesos de ajuste, selección, extracción y extrusión de caras a partir de la nube de puntos. En principio, el proceso consiste en el uso de herramientas BIM de diseño para configurar una serie de niveles y secciones sobre los ejes X e Y, y coordenadas geométricas en altura sobre el eje Z, de forma que ayuden al modelado tridimensional. Los planos y vistas bidimensionales que se detallarán sobre la

geometría de los objetos, se obtienen gracias a estos niveles y secciones que se utilizarán como punto de inicio y final para cada geometría representada.

Este proceso es eficaz para documentar y difundir la información relacionada con los edificios existentes. No obstante, su introducción como herramienta de trabajo se ve acotada pues para lograr un modelo útil es necesario invertir mucho tiempo y contar con la ayuda de trabajadores cualificados. Estos problemas se deben, por un lado, a las limitaciones ortogonales presentes en la gran mayoría de softwares BIM, y por otro lado, por el proceso de parametrización de objetos pues requieren un gran número de pasos cuando se tratan de geometrías complejas.

3.4.2 MODELADO AUTOMÁTICO

En los últimos años, se han proyectado trabajos académicos y de investigación para el desarrollo de reconstrucciones de edificios existentes a través de un modelado totalmente automático basado en la nube de puntos. Esto es posible gracias a la creciente investigación de softwares BIM generada por las ventajas que presentan al trabajar con modelos paramétricos.

Desde un punto de vista académico, los métodos más consolidados se encuentran en las investigaciones de Jung, Hong, Zheliazkova, Wang⁶ y Liu⁷, quienes han experimentado con

⁶ Wang, C.; Cho, YK; Kim, C. Extracción automática BIM de componentes a partir de nubes de puntos de edificios existentes para aplicaciones de sostenibilidad. *Autom. Constr.* 2015, 56, 1-13.

⁷ Liu, Y. Segmentación robusto de nubes de puntos en superficies consistentes. *Sci. China Technol. Sci.* 2016, 59, 1156-1166.

lenguajes y algoritmos digitales para extraer automáticamente las características geométricas de los elementos a través de la selección y localización de objetos en la nube de puntos.

Las investigaciones de Liu y Wang, proponen algoritmos que se basen en planos-región que localicen agrupaciones de puntos que se encuentren en el mismo plano. Posteriormente, se introduce un algoritmo que detecte los límites y reconozca automáticamente la forma, tamaño y posición de las superficies generando en su lugar mallas poligonales.

Las investigaciones de Jung⁸ y Hong⁹ usan el algoritmo Random Sample Consensus (RANSAC) para optimizar la selección automática de planos verticales en la nube de puntos y extraer los componentes de cada superficie. Posteriormente, el algoritmo lleva a cabo un proceso de trazado de límites muy minucioso, el primero se hace para filtrar los puntos que no se encuentran en el mismo plano, y el segundo para modelar los límites de dichos planos.

El principal problema de la investigación de Zheliazkova¹⁰ reside en que utiliza softwares de código abierto como Meshlab[®] y Ball-Pivoting algorithm (BPA) para reconstruir mallas y superficies espaciales en la nube de puntos para generar un modelo 3D.

⁸ Jung, J .; Hong, S .; Jeong, S .; Kim, S .; Cho, H .; Hong, S .; Heo, J. Producción de modelados para el desarrollo de las estructuras interiores existentes de edificios BIM. Autom. Constr. 2014, 42, 68-77.

⁹ Hong, S .; Jung, J .; Kim, S .; Cho, H .; Lee, J .; Heo, J. Enfoque de mapeo de interiores semi-automatizado 3D de edificios BIM. Comput. Reinar. Syst urbano. 2015, 51, 34-46

¹⁰ Zheliazkova, M.; Naboni, R; Paoletti, I. Un método paramétrico asistido para la generación de modelos BIM 3D para el patrimonio construido. WIT Trans. Environ de edificio. 2015, 153, 693-704.

A pesar de los procesos realizados, estas investigaciones no terminan de automatizar todo el proceso "Scan to BIM" o "Del escaneado a BIM". Como resultado obtendremos meros modelos de superficie CAD 2D o 3D, que deben ser convertidos manualmente a modelos paramétricos BIM. Desde este punto de vista Volk¹¹ sostiene que la transformación automática de elementos arquitectónicos complejos en entidades volumétricas 3D se encuentra todavía en su más tierna infancia.

No obstante, las compañías comerciales de softwares siguen investigando y desarrollando nuevos complementos que evolucionen la automatización del proceso "Scan to BIM" a partir de las nubes de puntos. Autodesk Revit® se encuentra actualmente a la cabeza de estas investigaciones con aplicaciones como EdgeWise® y Scan-to-BIM® capaces de analizar, clasificar y separar agrupaciones de puntos que se encuentran en un mismo plano y generar modelos paramétricos mediante superficies extraídas de la geometría del objeto.

Lamentablemente, las limitaciones de las lecturas e interpretaciones de datos cualitativos de un espacio u objeto, es una tarea complicada para los ordenadores actuales pues todavía no se ha logrado perfeccionar un algoritmo inteligente capaz de realizar esta función.

¹¹ Volk, R.; Stengel, J.; modelado Schultmann, F. Building Information Modeling (BIM) para edificios existentes – Revisión de la literatura y las necesidades futuras. Autom. Constr. 2014, 38, 109-127.

3.5 BIM PARA EDIFICIOS DEL PATRIMONIO CULTURAL

Según Pauwels¹² y Logothetis¹³, la tecnología BIM nos permite documentar, generar, importar y manipular modelos tridimensionales utilizando información paramétrica a partir de dibujos técnicos detallados (2D), de propiedades geométricas en un modelo colaborativo (3D), de la programación temporal constructiva (4D), de la definición de cantidades y presupuestos (5D), de la sostenibilidad del proyecto (6D), y de la gestión del ciclo de mantenimiento y de vida del mismo (7D).

Hoy en día, la tecnología BIM ha evolucionado significativamente en el campo de la gestión y documentación del patrimonio cultural. Ahora se puede representar, en un entorno virtual, el estado de conservación de los edificios históricos. Sin embargo, el procedimiento de reconstrucción virtual del patrimonio histórico-cultural no es una tarea fácil, ya que los elementos a modelar poseen una geometría heterogénea, compleja e irregular que no se encuentran representadas en las bibliotecas de softwares BIM. Por ello, es necesario introducir este enfoque técnico de los edificios históricos en las plataformas BIM con el fin de generar una biblioteca H-BIM.

¹² Pauwels, P.; Verstraeten, R.; DeMeyer, R.; Van Campenhout, J BIM para la aplicación en el patrimonio virtual. En Actas de la Conferencia Internacional sobre sistemas virtuales y multimedia (VSMM), Brisbane, Australia, 23-26 de septiembre de 2008; pp. 18-23.

¹³ Logothetis, S; Delinasiou, A; Stylianidis, E. BIM para el patrimonio cultural: Una revisión. SIFT Ann. Photogramm. Sens remotas. Escupió. Inf. Sci. 2015, 2, 177-183

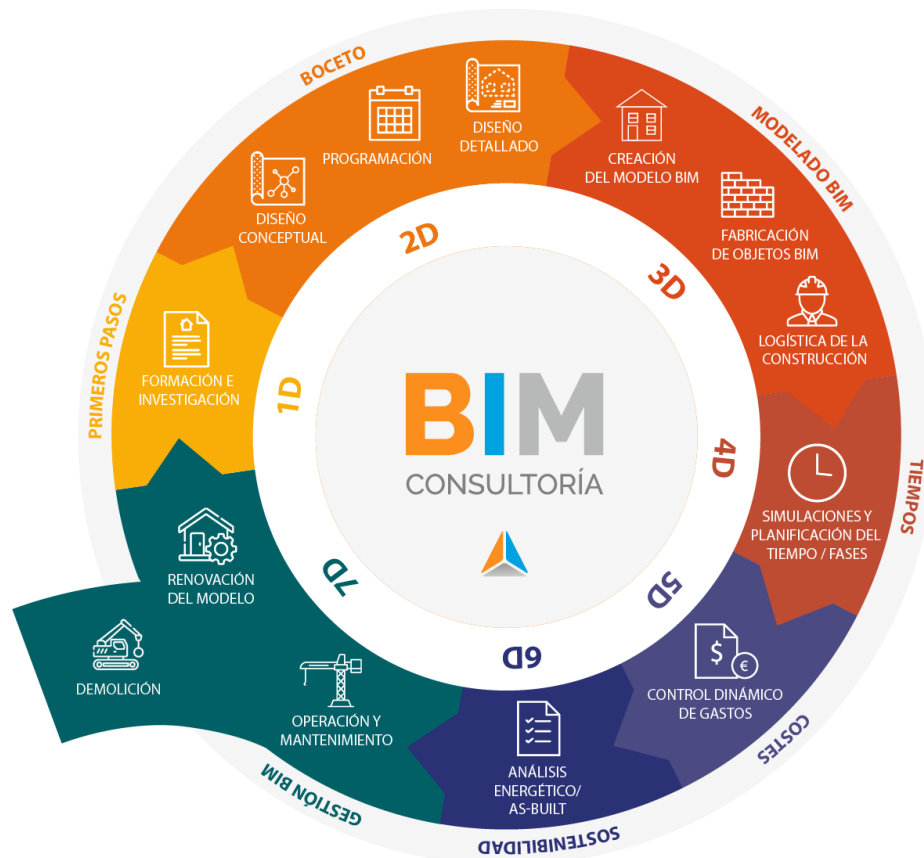


Figura 12: Dimensiones de la tecnología BIM.

3.5.1 SOFTWARES BIM: GRUPOS

En la práctica, los softwares BIM más especializados que se pueden utilizar para llevar a cabo el modelado, mantenimiento y rehabilitación del patrimonio arquitectónico, se clasifican en tres grandes grupos de herramientas diferentes:

- Modeladores 3D: Softwares para el diseño y representación de modelos paramétricos capaces de digitalizar un edificio real. Son las principales plataformas de la metodología BIM encargadas de reunir, gestionar y levantar los modelos 3D con el fin de poder tener la información contenida en un mismo archivo.
- Visualizadores 3D: Softwares para la visualización de modelos espaciales. Se encargan de transmitir la información obtenida de los modelos al público.
- Analizadores: Softwares auxiliares de los programas BIM, encargados de analizar y gestionar los archivos 3D.

A continuación, se expondrán algunos de los principales softwares BIM más representativos en la elaboración, gestión y seguimiento de modelos virtuales del patrimonio histórico-cultural.

3.5.1.1 Modeladores 3D

1. **ArchiCad (Graphisoft):** se trata de un software BIM que permite trabajar a los usuarios con objetos y modelos paramétricos. Además, el uso de un lenguaje abierto de programación "Geometric Description Lenguaje (GDL)" o "Lenguaje de Descripción Geométrica" que posibilita la creación de cualquier objeto y el almacenamiento de estos en las bibliotecas internas del programa, lo que permite su reutilización futura. Esta plataforma no solo exporta archivos en extensiones DWG, DXF y para SketchUp, sino que también proporciona interoperabilidad con otros softwares BIM mediante el uso de IFC (Industry Foundation Classes).
2. **Tekla Structures:** Esta herramienta virtual se utiliza para el diseño detallado, reproducción, fabricación y montaje de todo tipo de estructuras para la construcción de modelos 3D de alta complejidad, permitiendo crearlas y gestionarlas en tiempo real. Además, este software puede generar modelos de importación para otras aplicaciones BIM utilizando archivos IFC, siendo también compatible con archivos DWG, DNG, DXF, CIS/2, DTSV y SDNF.



Figura 13: Logo ArchiCad y logo Tekla structure.

3. **Bentley Systems:** Este programa se utiliza para tratar todos los aspectos del ámbito de la construcción. El software Bentley está formado por un conjunto de aplicaciones y servicios basados en software de lenguaje abierto, proporcionando soluciones para todo el ciclo de vida de las infraestructuras. Admite archivos DWG, DGN, DXF y PDF. Además puede trabajar con importaciones de nubes de puntos.
4. **Autodesk Revit:** Se trata de un software BIM ideal para modelar con precisión superficies regulares e irregulares. Este software trabaja mediante elementos paramétricos que permiten construir y gestionar el modelo 3D de forma rápida. Por otra parte, Autodesk Revit obtiene modelos tridimensionales de alta calidad y flexibilidad debido a su interoperabilidad con otras aplicaciones de la misma compañía Autodesk mediante archivos IFC. Admite extensiones de archivos DWG, DGN, DXF, SAT y archivos de SketchUp, siendo también admisible la importación y manipulación de nubes de puntos.



Figura 14: Logo Bentley Systems y logo Autodesk Revit.

3.5.1.2 Visualizadores 3D

1. **Tekla BIMsight:** Esta aplicación BIM se utiliza como herramienta para comunicarse y colaborar en proyectos de construcción. Permite a los agentes que participan en el proyecto visualizar el modelo completo, controlar el riesgo de accidentes, e identificar y resolver problemas internos del proyecto. Así mismo, garantiza la recogida de datos y el uso compartido de los mismos en las plataformas BIM gracias al uso de archivos IFC.
2. **Navisworks Freedom:** Se trata de una herramienta virtual que permite la coordinación, simulación y optimización de los procesos de construcción de edificios. Navisworks Freedom gestiona y transmite modelos multidisciplinares, incluyendo todo tipo de información, prototipos y diseños digitales compatibles con otras plataformas BIM.
3. **SketchUp:** Se trata de un programa destinado al diseño gráfico y modelado 3D. SketchUp está muy integrado entre los agentes del campo de la construcción por su simplicidad y precisión. Este software no está considerado como una plataforma BIM pero proporciona interoperabilidad entre otras plataformas debido a que trabaja con datos IFC.



Figura 15: Logo Tekla BIMsight, logo Navisworks Freedom y logo SketchUp.

3.5.1.3 Analizadores

1. **Ecotect Analysis:** Este software permite crear, visualizar y simular proyectos sostenibles con un alto rendimiento energético. Recoge la información energética sobre el rendimiento, uso e integración de materiales, agua y energía. Esta herramienta de trabajo permite a los arquitectos e ingenieros visualizar y trabajar fácilmente en 3D, utilizando todos los elementos necesarios para un análisis eficiente de edificios sostenibles. Ecotect Analysis es compatible con el software Autodesk Revit®, integrando funciones similares a las familias de este último programa.
2. **DAYSIM:** Se trata de un motor de simulación destinado a la sexta dimensión de la tecnología BIM, la sostenibilidad. Se encarga de analizar y calcular la disponibilidad de luz natural y el uso energético de la iluminación interior en los proyectos de construcción. Además, es compatible con Ecotect, Rhinoceros y SketchUp.
3. **Energy Plus:** Simulador de energía que permite a los profesionales de ámbito de la construcción, analizar el consumo de energía para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, etc., de los edificios. Además, se trata de un software abierto que permite la interoperabilidad con otras plataformas.



Figura 16: Logo Ecotect Analysis, logo DAYSIM y logo Energy Plus.

3.6 CONCEPTO “HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING”

El concepto H-BIM fue utilizado por primera vez en el trabajo expuesto de Murphy¹⁴ en el Instituto Tecnológico de Dublín. Según Murphy y Dore, *“H-BIM persigue el modelado y documentación de los elementos arquitectónicos, de acuerdo con las tipologías artísticas, históricas y constructivas”*¹⁵.

Por otro lado, H-BIM está considerado como una biblioteca de objetos paramétricos, diseñados específicamente para preservar y administrar el patrimonio cultural desde el punto de vista del “Smart Heritage”. Generalmente, estas bibliotecas de familias se modelan a partir de manuscritos y documentación arquitectónica de edificios históricos, de escaneos láser, fotogrametrías 3D y otro análisis físicos obtenidos del edificio en cuestión.

Una vez elaborada la biblioteca H-BIM, esta funcionaría como un plug-in en las plataformas BIM, como carga y descarga de datos, de forma que agilizaran y facilitarían el trabajo de concebir proyectos para la intervención de edificios de patrimonio cultural.

¹⁴ Murphy, M.; McGovern, E.; Pavia, S. H-BIM - Encuestas a base de láser y de imagen. SIFT Int Arch. Photogramm. Sens remotas. Escupió. Inf. Sci. 2011, 3816, 1-7.

¹⁵ Dore, C.; Murphy, M. La integración de HBIM 3D y SIG para el modelado del patrimonio cultural. En Actas de la Conferencia Internacional de Documentación Digital, Edimburgo, Escocia, 22-23 de Octubre de 2012.

3.6.1 FLUJO DE TRABAJO H-BIM

1. **Conocimiento y recopilación de información:**

En primer lugar, encontramos el proceso de reunir información a través de estudios gráficos, semánticos y tipológicos. La información gráfica se obtiene a partir de los métodos de escáner laser y de fotogrametría 3D. Estos métodos pueden proporcionar un archivo de nube de puntos con el que poder visualizar las superficies del edificio u objeto a analizar. En cuanto a los datos semánticos y tipológicos, se obtienen a partir del análisis técnico del edificio y por medio de manuscritos y documentación histórica. Esta información permitirá descubrir los sistemas constructivos tradicionales y sus materiales correspondientes, así como las últimas intervenciones que pudieran haber experimentado el edificio.

De acuerdo con Quattrini y Baleani¹⁶, el uso de datos históricos para modelar componentes de la biblioteca H-BIM presentan la oportunidad de desarrollar datos que se almacenen detrás de la superficie de los objetos paramétricos en cuanto a sus materiales constructivos, sus memorias culturales e históricas, así como su estado de conservación y mantenimiento. Además, es posible introducir datos paramétricos temporales para representar los eventos que ocurrieron a lo largo de toda la vida útil del edificio.

¹⁶ Quattrini, R.; Baleani, E. Marco teórico y el análisis histórico para el modelo de reconstrucción 3D. Villa Thiene en Cicogna. *J. Cult. Patrimonio* 2015, 16, 119-125.

Por lo tanto, los componentes que conforman esta nueva biblioteca, proporcionan una mejor lectura de los monumentos, así como permiten generar modelos 3D y documentación técnica para proyectos de conservación (plantas, alzados y secciones, detalles, perspectivas, etc.) de forma semi-automática. Por otro lado, los objetos paramétricos creados para estas bibliotecas H-BIM, admiten modificaciones de forma rápida, lo que habilita a generar modelos virtuales en 3D de cualquier proyecto que posea un carácter similar y estilo arquitectónico.

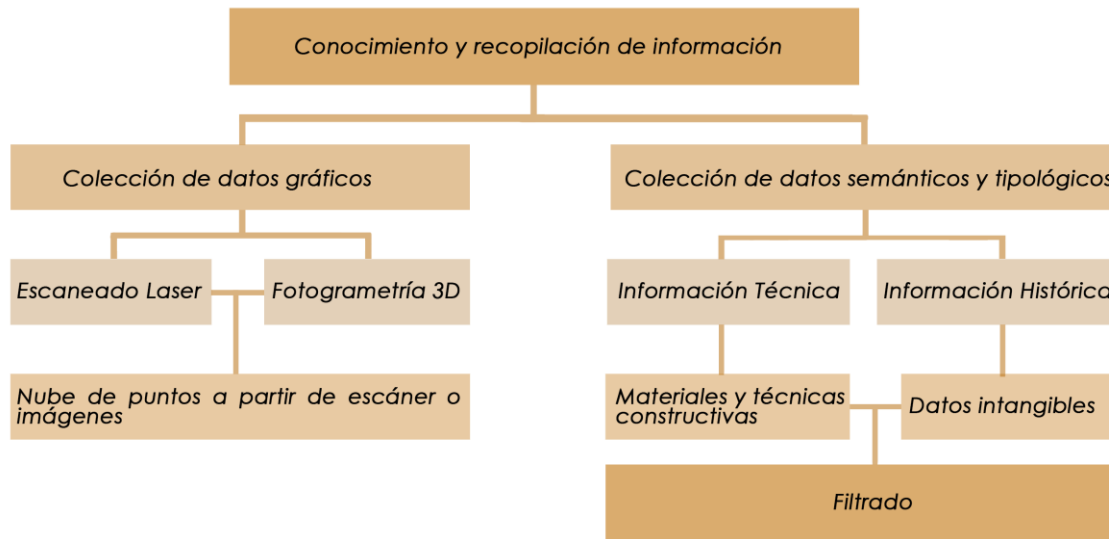


Figura 17: Esquema de flujo de trabajo H-BIM, Primer Paso

2. **Filtering o Filtrado:**

El segundo paso es un proceso ontológico, que se crea para ser utilizado como una base de conocimiento de toda la información obtenida. La ontología se puede representar mediante objetos tridimensionales a través de plantillas IFC o directamente con software BIM.

Paralelamente, las nubes de puntos deben someterse a una serie de procesos de alineado, depurado y filtrado de puntos para facilitar su manipulación. Posteriormente, se somete la nube a dos métodos, automático o semi-automático, para poder modelar objetos tridimensionales con la propia nube, lo que se conoce como "Scan-to-BIM".

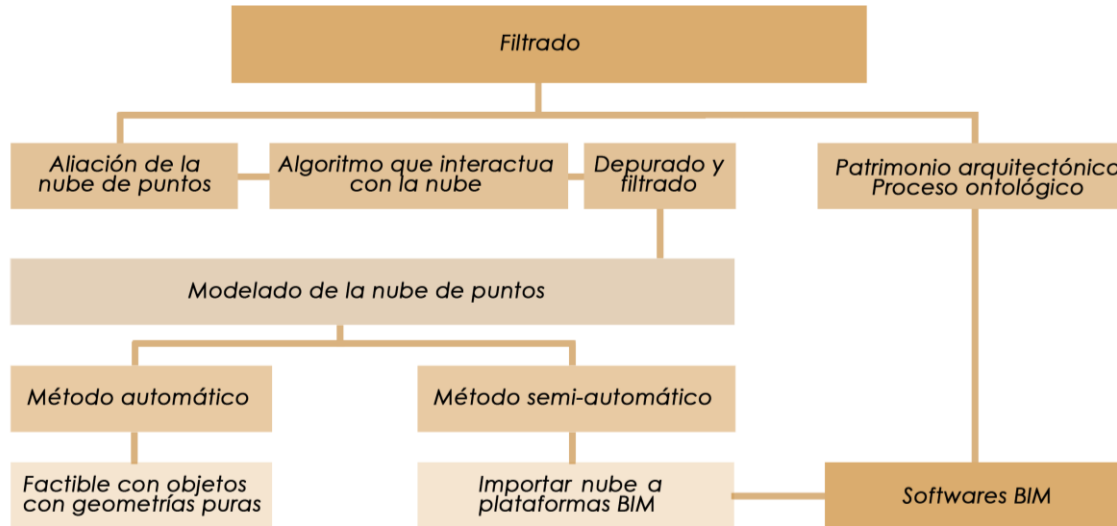


Figura 18: Esquema de flujo de trabajo H-BIM, Segundo Paso

3. **Modelado paramétrico 3D:**

Si el método automático de levantamiento geométrico a partir de la nube de puntos genera problemas, entonces se procede con el siguiente método semi-automático que consiste en insertar la nube de puntos en la plataforma BIM para el modelado paramétrico, complementando la correspondiente falta de información con los datos históricos y con la biblioteca H-BIM existente.

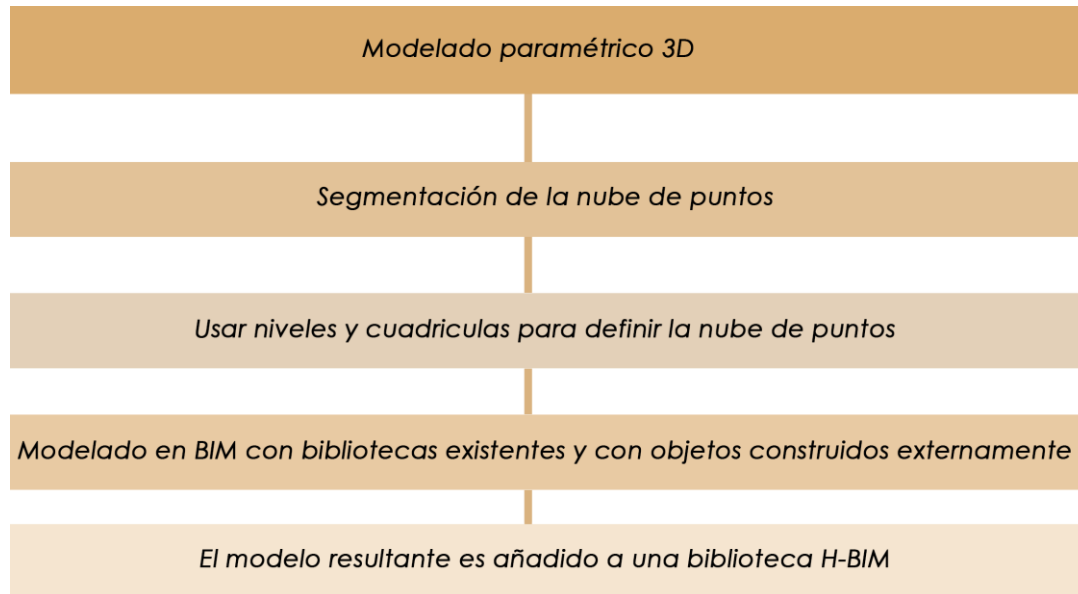


Figura 19: Esquema de flujo de trabajo H-BIM, Tercer Paso

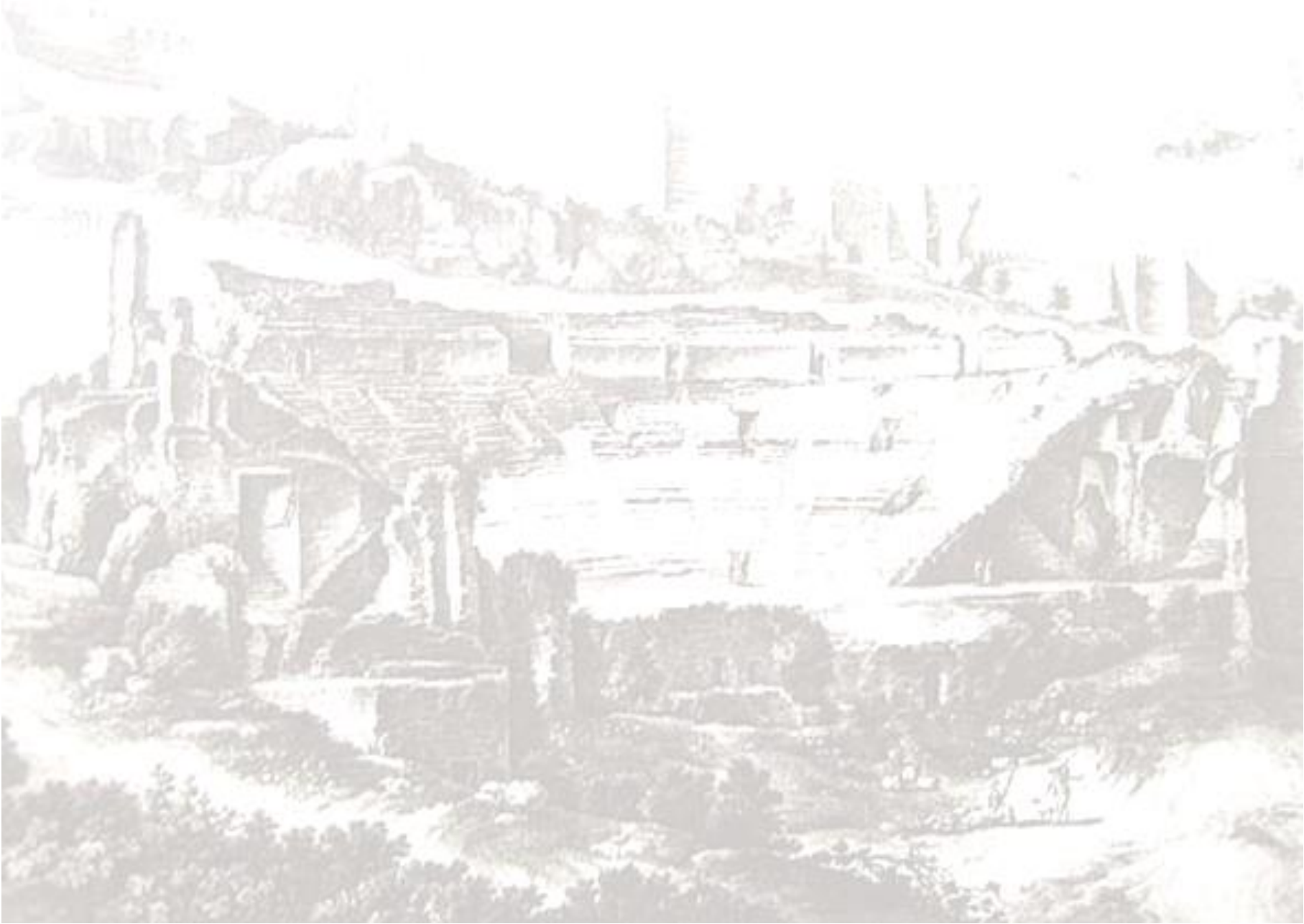
El objeto resultante se adjunta en una biblioteca H-BIM para registrar el modelo paramétrico y poderlo utilizar en edificios arquitectónicos pertenecientes a un mismo periodo histórico. Las bibliotecas H-BIM servirán como base para la gestión e intercambio de información con otras fuentes de datos, gracias a la interoperabilidad entre los softwares BIM. Estas bibliotecas aportan datos que facilitan el análisis histórico de la estructura, la simulación del consumo energético y temporal, los cálculos del presupuesto de intervención y otras funciones que mejorarán la gestión de los procesos de restauración y mantenimiento del edificio estudiado. Además, gracias a las bibliotecas H-BIM es posible conocer los materiales y técnicas de construcción, así como la posibilidad de restaurar o reconstruir edificios del patrimonio cultural que ya no existen o que no están documentados.

Algunas fuentes relevantes sobre la investigación H-BIM ponen en manifiesto una serie de preguntas sin respuesta sobre el empleo de estas bibliotecas H-BIM en proyectos de intervención. De acuerdo con estos trabajos de investigación, en cierto modo se encuentran todavía dificultades para que la metodología BIM pueda adaptarse en el modelado de edificios históricos debido a sus características particulares e irrepetibles.

Por todo ello, es necesario tomar medidas para desarrollar un compromiso fiable entre la precisión a la hora de modelar y el esfuerzo y tiempo empleado en realizar dicho trabajo.

4. EL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO





4.1 TEATROS ROMANOS EN ESPAÑA

A lo largo de toda la Península ibérica, encontramos más de 20 teatros romanos descubiertos hasta la fecha (Figura 20). Muchos de ellos fueron restaurados durante el siglo XX, por lo que se puede asumir que las intervenciones son, en casi su totalidad, contemporáneas. No obstante, estos proyectos de intervención en los teatros han manifestado un grave problema. La falta de comunicación y unanimidad en las decisiones tomadas a la hora de asumir criterios y responsabilidades en las intervenciones les ha llevado a no tener una metodología de intervención unificada.

Los teatros fueron erigidos atendiendo a la obra de Vitrubio, "Los diez libros de Arquitectura", concretándose su construcción desde el desembarco de Escipión en Tarragona hasta la invasión de los pueblos godos (Siglos III – V a.C). Tras la caída del Imperio Romano, muchos de estos teatros caerían en el olvido y serían víctimas de la destrucción y el expolio, exceptuando Sagunto del que conocemos una amplia documentación histórico-artística. En la actualidad, tras la intervención de los arquitectos Giorgio Grassi y Manuel Portaceli, el teatro es utilizado para la realización de festivales y otros actos culturales.

Entre los años 20 y 30 del siglo XX, se realizaron a cabo operaciones de excavación y diversas actuaciones de anastilosis, sin embargo fue en los años 80 cuando G. Grassi y M. Portaceli

impusieron su criterio de Restauración Crítica basándose en la reinterpretación moderna de la imagen a partir de un conocimiento general, recuperando la unidad formal¹⁷.

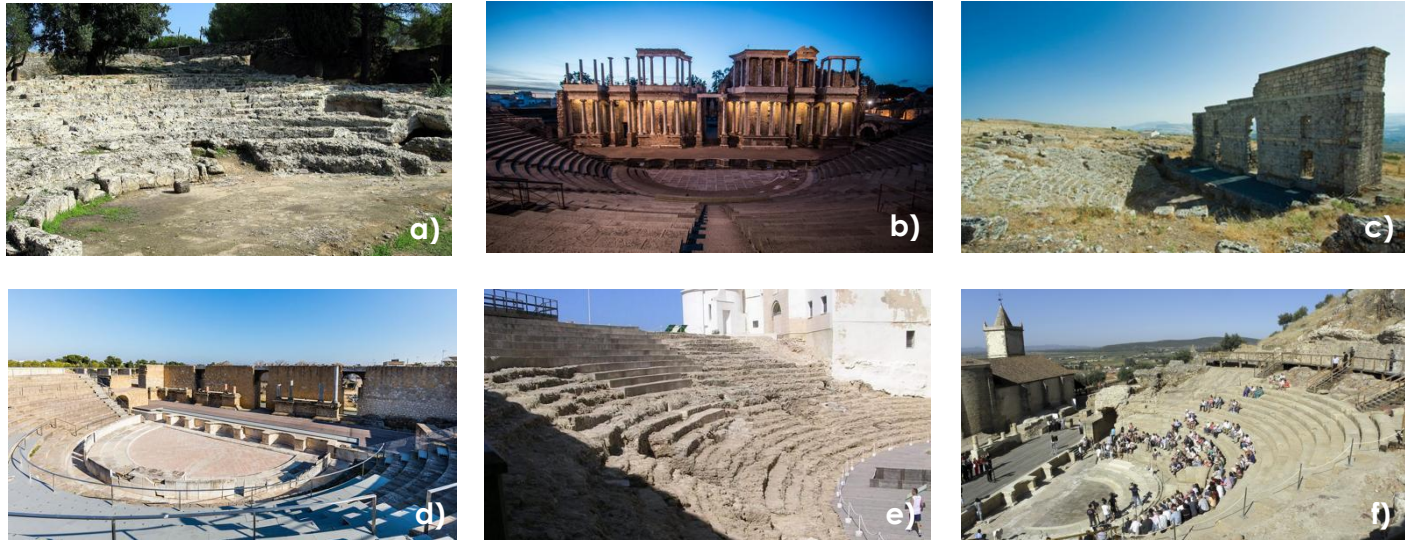


Figura 20: a) Teatro de Pollentia, Mallorca; b) Teatro de Mérida, Badajoz; c) Teatro de Acinipo, Málaga; d) Teatro de Itálica, Sevilla; e) Teatro de Cádiz, Cádiz; f) Teatro de Metellinum, Badajoz

¹⁷ Noguera Giménez, Juan Francisco; «Teatros romanos de Hispania: introducción a su estado de conservación y criterios de restauración», Arche, Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV, 6 y 7, 2011 y 2012, pp. 383-390

4.2 ORÍGENES DEL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO

Tras la llegada del Imperio Romano a la Península ibérica, Sagunto se convierte en una de las principales provincias portuarias de *Hispania*, concediéndole pleno derecho el Emperador Augusto en los años 4 - 3 a.C. A partir de este momento, dado que será una ciudad con una clara estructura política y organización municipal, comienzan a construirse monumentos de carácter público.

El puerto de Sagunto permitió una gran actividad comercial a través del Mar Mediterráneo, conocido por los romanos como *Mare Nostrum*, durante los siglos III – V d.C. De igual manera, existía una gran red de vías de comercio terrestre, siendo la principal la *Vía Augusta* que recorre toda la costa del Levante peninsular, pero debido a la importancia que tomó la ciudad se originaron vías transversales a la *Vía Augusta*, que permitían la comunicación de las ciudades costeras con el interior de la Península. Debido a este gran comercio marítimo y terrestre presente en la zona, llegaron a Sagunto monedas griegas y púnicas. Este comercio fomentó el acuñamiento de una moneda propia saguntina que tomo gran importancia desde el siglo IV a.C hasta Tiberio, a mediados del siglo I d.C.

La extensión de la ciudad de *Saguntum* en el siglo I, reunía la superficie comprendida entre el río Palancia y el pequeño relieve montañoso situado más al sur de este. Es en la ladera de esta montaña donde se decide construir el teatro debido a su situación estratégica a modo de bastión que cercaba la entrada del conjunto monumental situado en lo alto de la colina, siendo visible incluso desde la *Vía Augusta*.

El teatro romano de Saguntum o Sagunto, comenzó a construirse a mediados del siglo I d.C con el propósito de reflejar el poder político y social de la ciudad portuaria, aprovechando el escarpe de la colina para situar el graderío. Las características originales del edificio lo designan como un teatro latino de tipología clásica, análogo a otros existentes en toda la cuenca mediterránea como el teatro de Arausio (Francia) o el teatro de Corintio (Grecia).

En sus orígenes, el edificio constaba de una escena clásica con tres puertas, con un foso para la *orchestra* y entradas laterales para los espectadores (*Aditus Maximus*). El espacio del graderío o *cavea*, separado de la orquesta por un *biselium*, constaba de dos grupos de gradas: unas primeras llamas senatoriales donde se sentaban los magistrados de la ciudad a contemplar la representación y bajo la cual discurre el desagüe principal del edificio, llamado *cloaca maxima*; y tres órdenes superiores, "*ima, media y summa cavea*", donde se situaba al resto de ciudadanos en un orden jerarquizado, indicando su clase social. Se calcula que en época romana este teatro podría haber albergado a unos 4.000 espectadores.

En el *proscenio* es donde tiene lugar la representación de la obra, mientras que debajo de este se encontraba el telón, que se alzaba solo en algunas representaciones. El cuerpo escénico, cubierto por un techo de madera, tenía una altura igual a la del graderío, dividida por columnas, siguiendo una organización de dimensiones decrecientes.

4.3 INTERVENCIONES EN EL TEATRO ROMANO

El teatro romano de Sagunto fue declarado Monumento Nacional en 1896 (Figura 21). Muchos historiadores han hablado y redactado documentos acerca de los orígenes y arquitectura del teatro hasta la fecha, algunos conocidos como Joseph Ortiz, Antonio Chabret, Miguel Beltrán Lloris, etc. No obstante, el documento más antiguo, perteneciente al siglo X, viene firmado por el árabe Ahmad Benmohamed Ar-Razi donde relata las crónicas sobre esta construcción.

Desde sus primeras interpretaciones, el teatro ha sufrido numerosas intervenciones y restauraciones, muchas de ellas han deteriorado la construcción hasta el punto de no poder distinguir la original, así mismo, el expolio y la reutilización de materiales en otras construcciones han ido menoscabando lo que en tiempos pasados pudo ser.

No se ha encontrado documentación de intervenciones antes del siglo XVIII, que fue cuando J. Ortiz menciona en sus escritos que Enrique Palos y Navarro excavó por primera vez los escombros de la *orchestra*. A. Laborde redacta el

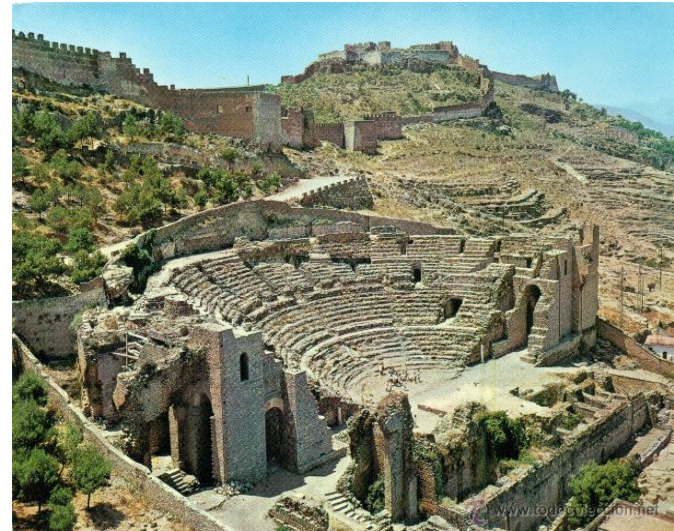


Figura 21: Teatro romano de Sagunto en el siglo XX

mal estado en el que se encontraba el teatro a principios del siglo XX. Durante el siglo XIX, el teatro sufre su mayor destrucción a causa de las Guerras Napoleónicas pues en 1811 para resistir la invasión de las tropas francesas, se toma la decisión de utilizar el Castillo como fortaleza, ejecutándose la orden de eliminar los restos de la escena y la parte alta del graderío pues dificultaba las operaciones militares. Esta acción provocaría que las Cortes de Cádiz tomaran bajo su protección el teatro saguntino de Murviedro, considerándose el primer acto de nombramiento como Monumento Nacional. Pese a estas medidas, fue inevitable que se llevara a cabo su destrucción.

Fue en 1917 cuando el arquitecto Don Luis Ferreres entregó al Ministerio de Instrucción Pública un proyecto de restauración del teatro el cual no se llegó a realizar. No obstante, en 1955 se llevaría a cabo una restauración a cargo de D. Leopoldo Blanco Mora, al que se le exige que lleve a cabo dicha tarea respetando el edificio original, mimetizando los nuevos materiales con los antiguos. La participación de D. Antonio Almagro Gorbea se limitó al levantamiento fotogramétrico, finalizando en 1979. De éste último arquitecto se han tomado prestados algunos documentos gráficos para elaborar la parte práctica de este trabajo de fin de grado.

4.3.1 RESTAURACION DE GIORGIO GRASSI Y MANUEL PORTACELI (1984 – 1993)

La rehabilitación del teatro romano de Sagunto ha tenido una breve pero accidentada historia. El proyecto original de los arquitectos G. Grassi y M. Portaceli, data de 1984, pero no fue definitivamente aprobada por el consistorio saguntino hasta junio de 1989, concluyendo en 1993.



Figura 22: Estado actual del teatro romano de Sagunto

En esta intervención, Portaceli nos indica que se trataba de desarrollar la unidad potencial para alcanzar el monumento original. El primer objetivo del proyecto era la restitución del espacio teatral para, en segundo lugar, recuperar la esencia (Figura 22). Sin embargo, en 2003, el Tribunal Superior de Justicia de la Comunitat Valenciana dictó la sentencia de que la obra debía ser derruida.

Antes de esta intervención, el teatro romano de Sagunto se encontraba en estado de ruina. Pero el proyecto de Grassi y Portaceli actuó como una reconstrucción hipotética, moderna e idealizada inspirada en otros teatros romanos conocidos. Sin embargo, con

la intervención no se previó su reversibilidad, la cual debe poseer todo restaurador.

No obstante, la destrucción de la obra de Portaceli ha generado debate y hay quienes se vuelcan a favor y en contra de dicha sentencia. A pesar de ello, todavía no se ha ideado una solución para que la reversión del estado anterior del edificio no ocasione daños graves al documento histórico.

5. DESARROLLO Y ELABORACIÓN DE UN PROYECTO DE INTERVENCIÓN EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO





5.1 GESTIÓN DEL MODELO Y PASOS PREVIOS

5.1.1 INFORMACIÓN PREVIA

En primer lugar, me gustaría hacer constancia de que en este trabajo se utilizará una herramienta relativamente nueva como es la nube de puntos con el software informático Revit, la cual está todavía en desarrollo pero que no deja de dar unos resultados coherentes y fieles a la realidad. Este trabajo ha sido posible por la toma en 2016 de la nube de puntos mediante escáner laser y fotogrametría con sistema SfM, y registrada por la estudiante de la Universidad de Bolonia, Eleonora Grilli, durante una movilidad en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV.

Para el desarrollo del trabajo y en sus primeras etapas de elaboración se buscará una serie de datos gráficos sobre el teatro romano en archivos vectoriales y escritos digitales, que serán tomados de tesis doctorales, revistas, libros y publicaciones sobre el mismo. Se obtendrá información de sus orígenes y evolución en el tiempo con sus distintas intervenciones hasta el estado en el que se encuentra actualmente, tras la última intervención de los arquitectos Giorgio Grassi y Manuel Portaceli.

Esta información será de gran utilidad dado que permitirán contrastar la nube de puntos y otorgarle al modelo un orden de magnitud, gracias a las unidades antiguas romanas como son el palmo y el pie romano equivalentes a 0.0739 m y 0.2957 m respectivamente.

Además de la nube de puntos del teatro, facilitada por el tutor Francisco Juan y elaborada con tres estacionamientos exteriores y seis interiores; se tomarán prestados algunos planos de Don Antonio Almagro Gorbea (Figura 23) cuya intervención abarcó los años 1977-1979 y que permitirán entender y modelar los distintos corredores y vomitorios bajo la cavea, antes de la última intervención, donde no ha podido llegar la nube de puntos. También se tomarán planos actuales (Figura 24) de la rehabilitación del teatro para actividades culturales.

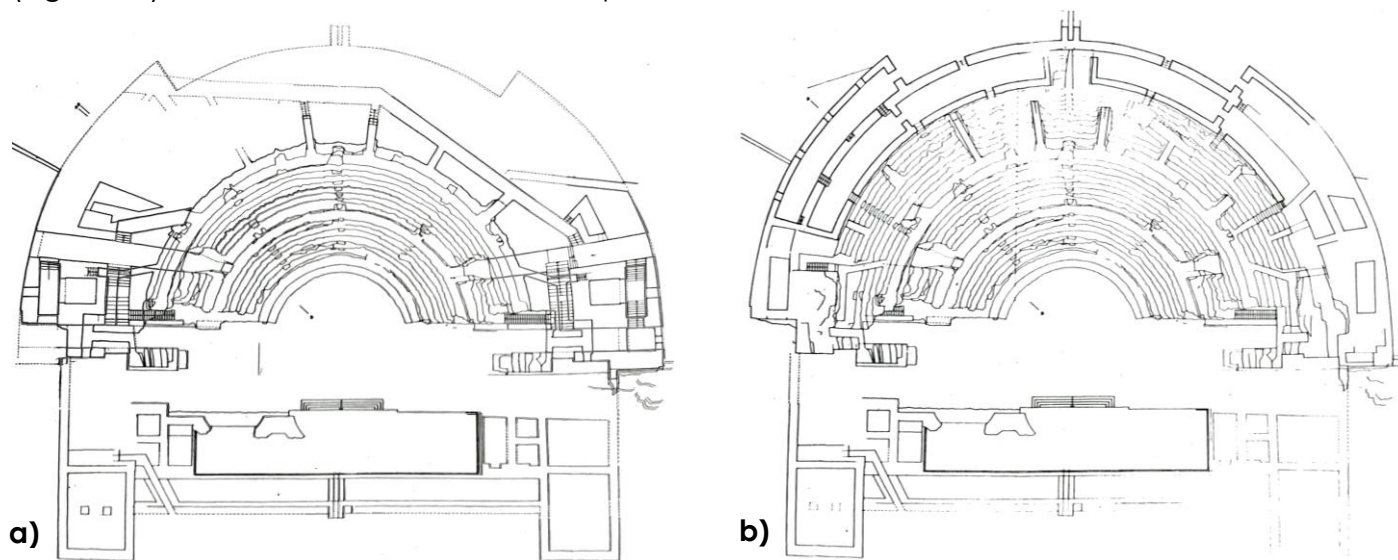


Figura 23: Planos de D. A. Almagro obtenidos por fotogrametría donde observamos los corredores y estancias bajo la cavea (a) y la estructura porticada que cierra el semicírculo del gradería (b).

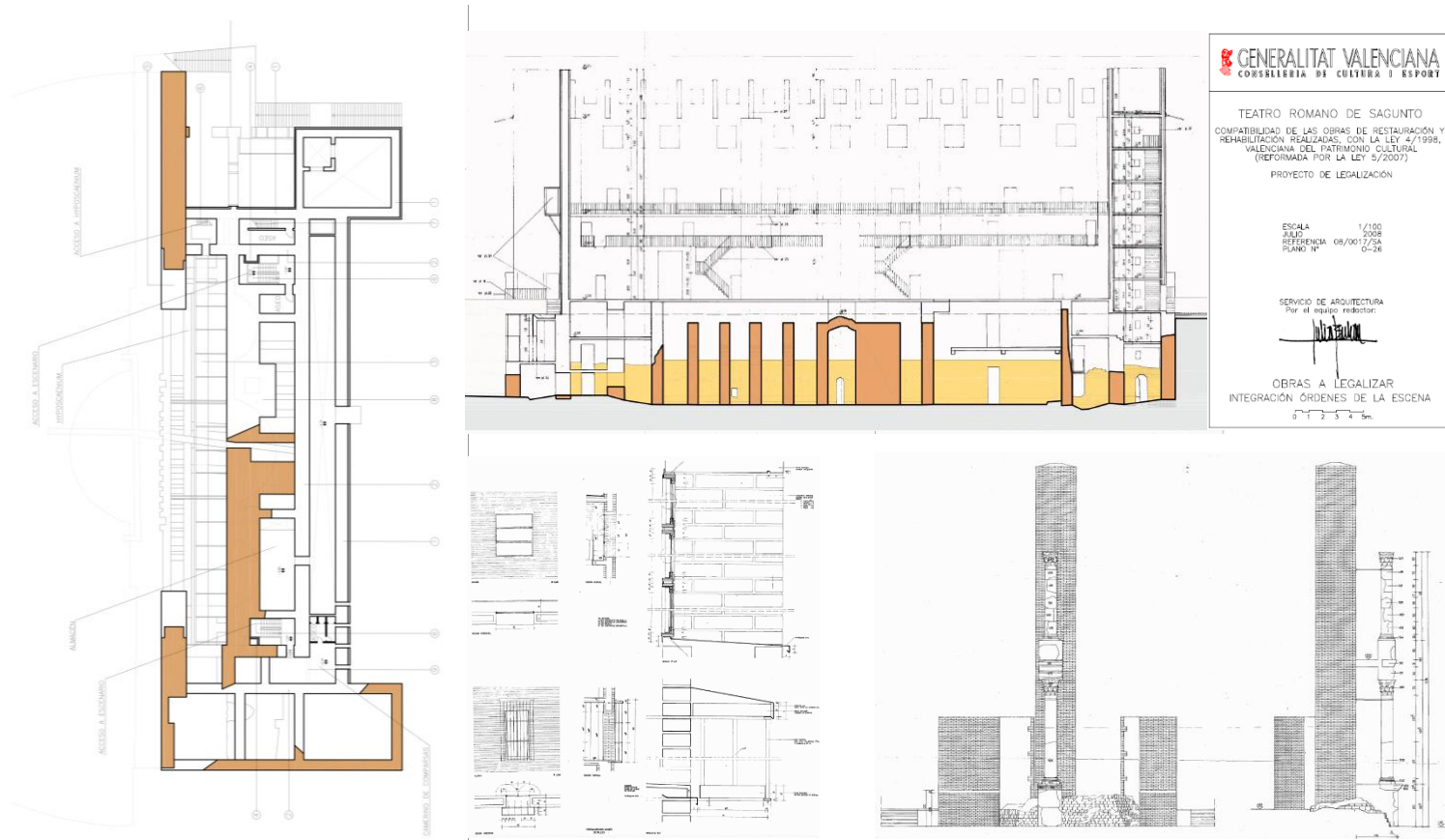


Figura 24: Plantas, secciones, alzados y detalles del último proyecto de intervención en el teatro romano de Sagunto.

5.1.2 LOCALIZACIÓN Y GEOGRAFÍA

Para la generación de la superficie topográfica del modelo de Revit, se realizará un análisis topográfico de la zona mediante varias herramientas digitales como son AutoCad, catastro de Sagunto, Google Earth y algunas mediciones en el lugar, para disponer de las curvas de nivel que posteriormente generarán la malla donde irá el futuro modelo del teatro romano.

En cuanto a la importación de las curvas en el modelo de Revit, se partirá de un archivo de AutoCad que contiene el catastro y las correspondientes curvas de nivel. Mediante el parámetro "Elevación" que poseen las polilíneas. Se introducirán las cotas de nivel correspondientes a cada una de las polilíneas dibujadas con el fin de crear un plano topográfico 2D que exportar a Revit para poder generar la topografía de la ladera donde se encuentra el teatro romano de Sagunto.

Una vez vinculado al modelo el archivo de AutoCad (Figura 25), mediante la serie de comandos en Revit: "Superficie topográfica" >> "Crear desde importación" >> "Seleccionar ejemplar de importación", se ha generado la superficie topográfica donde poder trabajar posteriormente (Figura 26).



Figura 25: Archivo tomado del catastro de Sagunto para posicionar el origen de coordenadas del modelo.

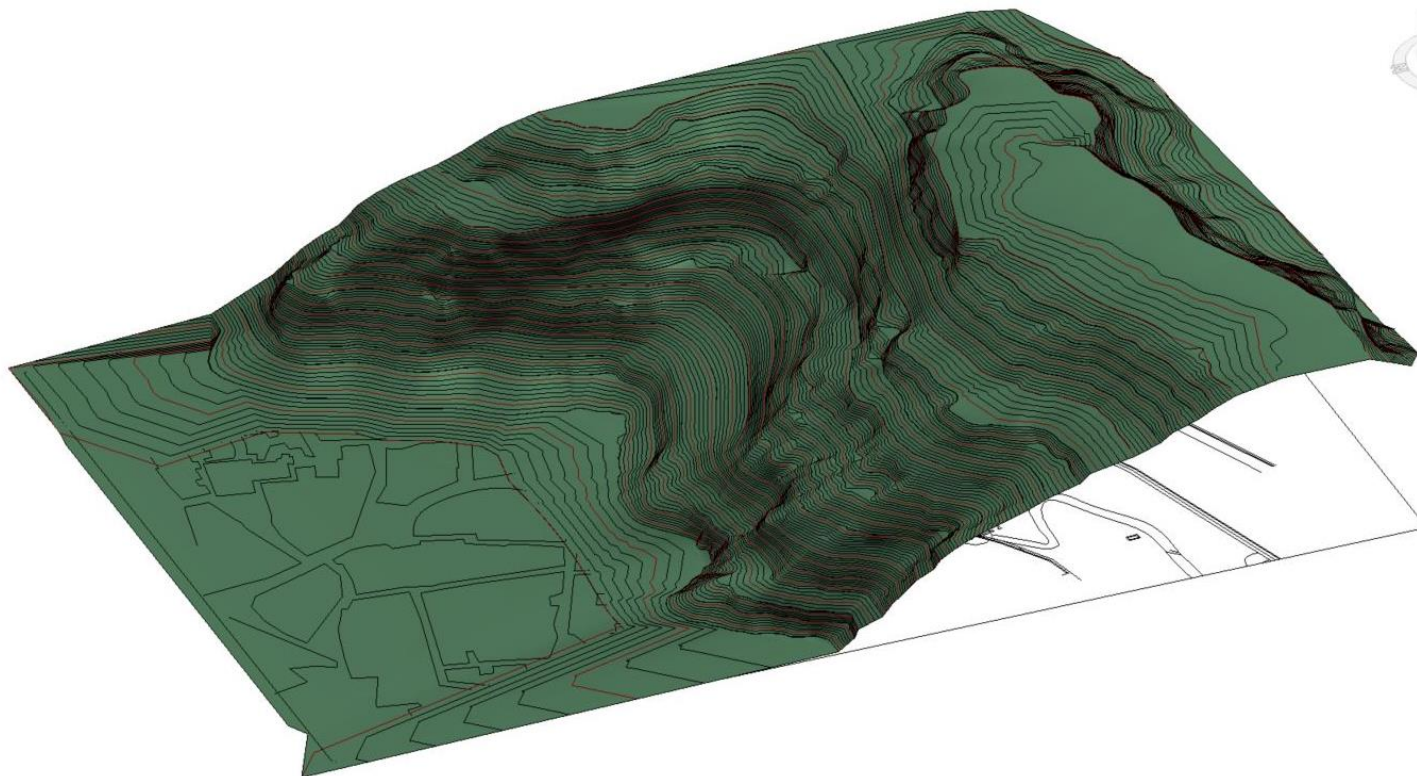


Figura 26: Topografía 3D generada a partir de las curvas de nivel.

5.1.3 NUBE DE PUNTOS Y PLANOS

Una vez geolocalizada y referenciada la superficie topográfica, se vinculará al modelo de Revit un archivo de nube de puntos, escáner previamente tomado del teatro, en el espacio de trabajo (Figura 27). Después de la vinculación, se escalará y ajustará al emplazamiento comparándolo con el archivo anteriormente mencionado de AutoCad para proceder a su levantamiento.

Paralelamente y dado que la nube de puntos escasea de información debido a que los estacionamientos son exteriores, se vincularán planos antiguos, concretamente de A. Almagro de 1979, que nos den la información necesaria para poder modelar con facilidad los diferentes corredores y vomitorios que se encuentran bajo la cavea.

Haciendo un inciso, durante esta etapa de comparación de la nube de puntos con los planos de A. Almagro, se ha llegado a la conclusión de que estos planos, tomados muy anteriormente a la tecnología de la nube de puntos y de los softwares informáticos específicos de arquitectura e ingeniería, se ha comprobado que son muy fieles a la realidad (Figura 28).

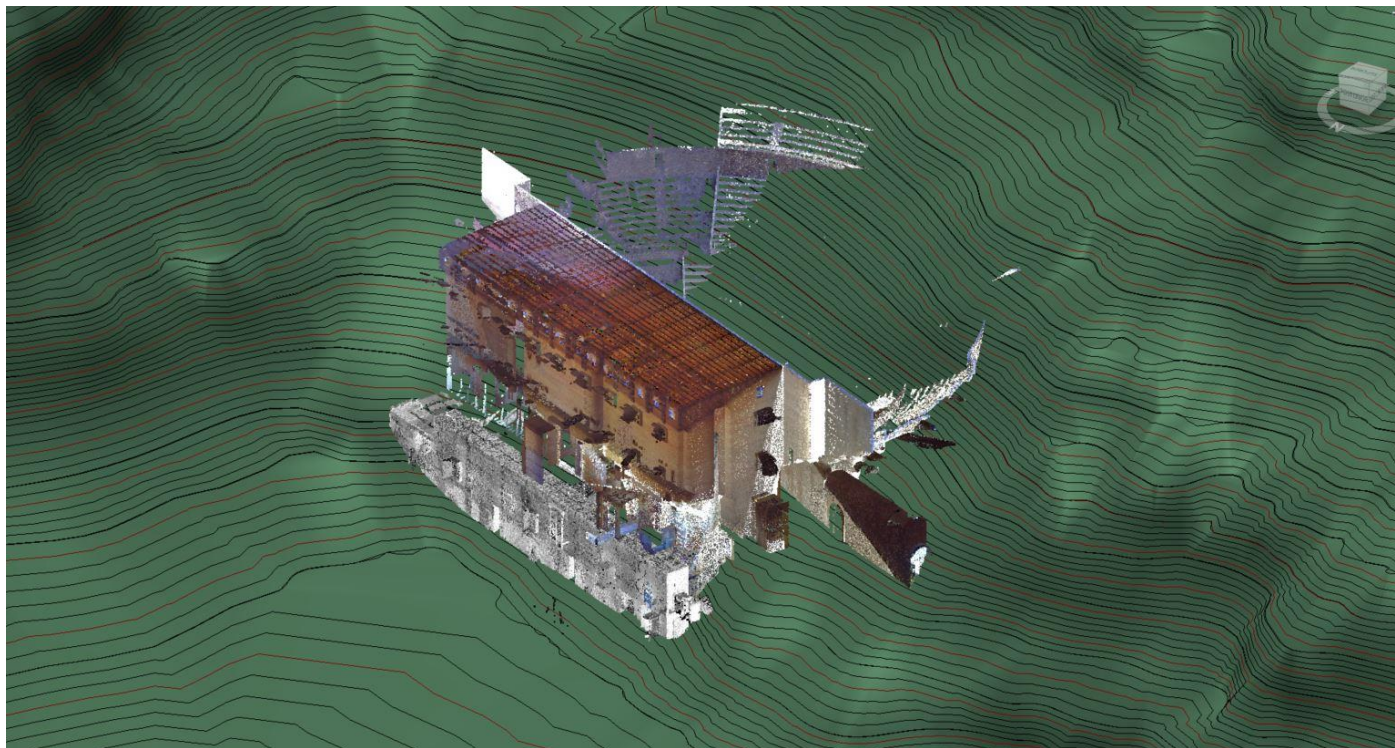


Figura 27: Importación de la nube de puntos posicionada sobre la topografía.

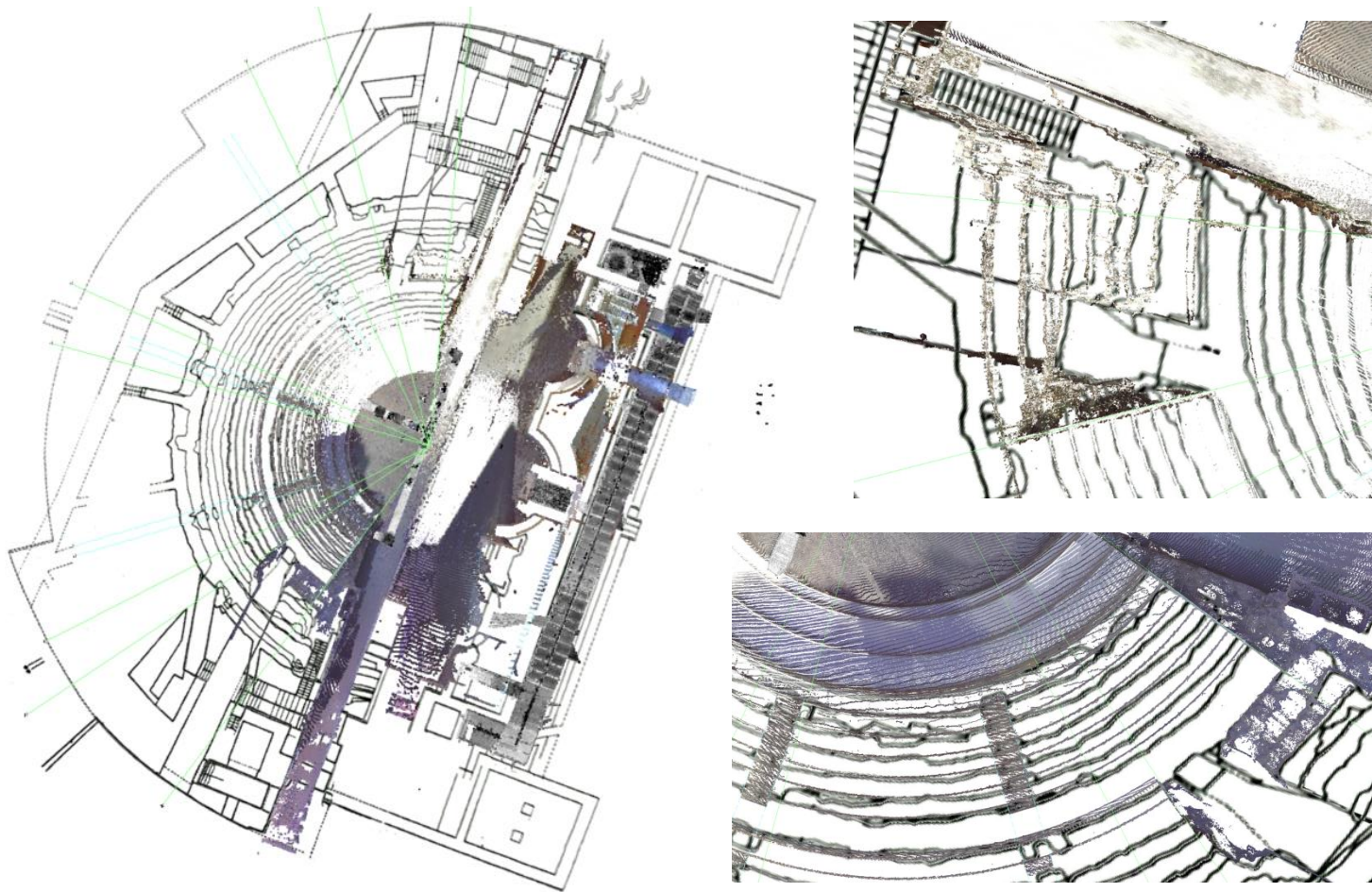


Figura 28: Comparación entre la nube de puntos con los planos antiguos de D. A. Almagro (1979).

5.1.4 FASES DE PROYECTO

Antes de proceder al levantamiento del teatro romano, se administrará el modelo para su mayor comprensión y agilidad. Se generarán dos fases de proyecto distintas con el fin de diferenciar las partes que contiene el teatro a saber: una primera fase de “estado anterior” y una segunda fase de la intervención de G. Grassi y M. Portaceli (Figuras 29 y 30).

Esta gestión en fases permitirá separar la ruina de la intervención dándonos a simple vista una distinción entre ellas gracias al parámetro de “Filtro de fases”.

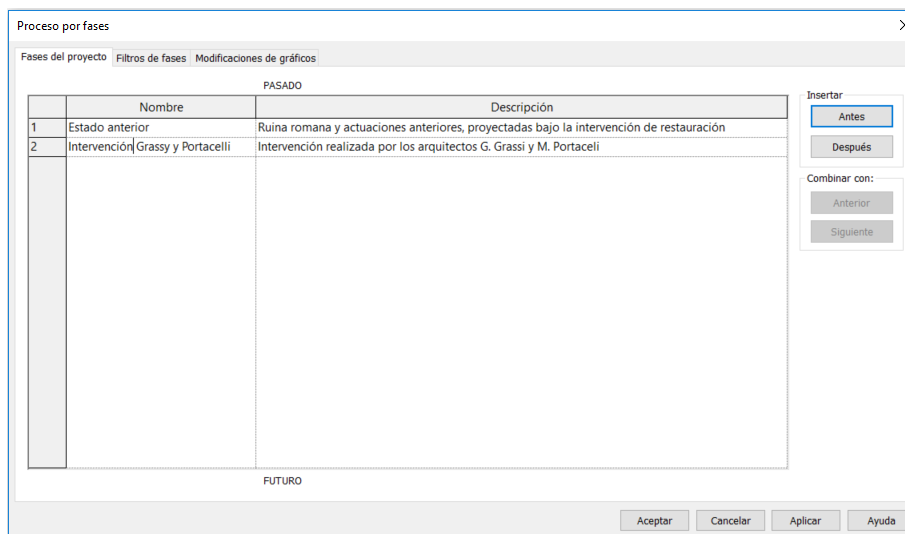


Figura 29: Cuadro de procesos por fases.

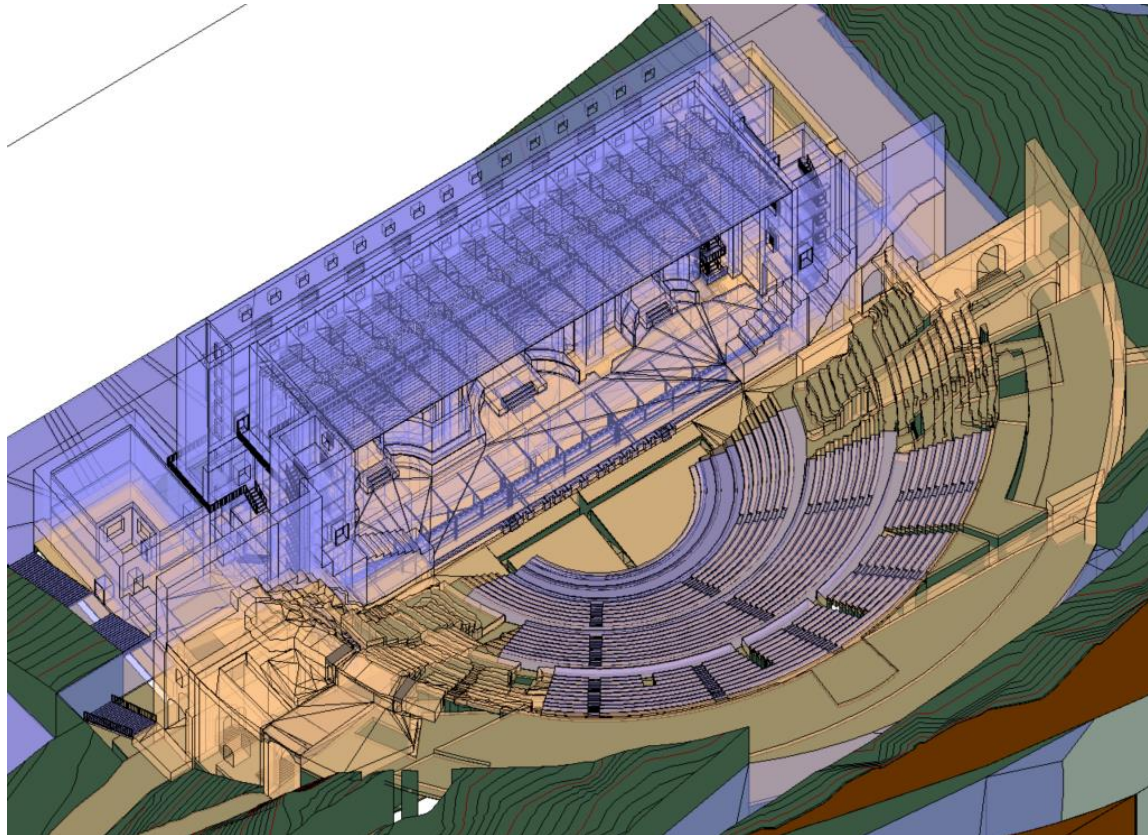


Figura 30: En azul se representan las partes correspondientes a la restauración y en naranja las romanas.

5.1.5 PLANOS DE REFERENCIA: NIVELES Y REJILLAS

Tras un estudio del estado actual comparándolo con sus antiguas intervenciones, y con la intención de agilizar y facilitar el modelado, se referenciarán los niveles, mediante el comando “Nivel”, que conforman cada una de las partes del teatro desglosados en escena, orquesta y cavea, incluyendo en esta última todos los niveles necesarios para el modelado de *ima*, *media*, *summa* y los correspondientes *praecinctios* (Figura 31a).

Del mismo modo, se trazarán las líneas maestras que conforman los segmentos de la cavea romana, sus escalones de acceso y distribución, así como los que forman parte de la restauración de G. Grassi y M. Portaceli (Figura 31b). El comando utilizado es el de “Rejillas” en la ficha de arquitectura en el grupo “Referencias”.

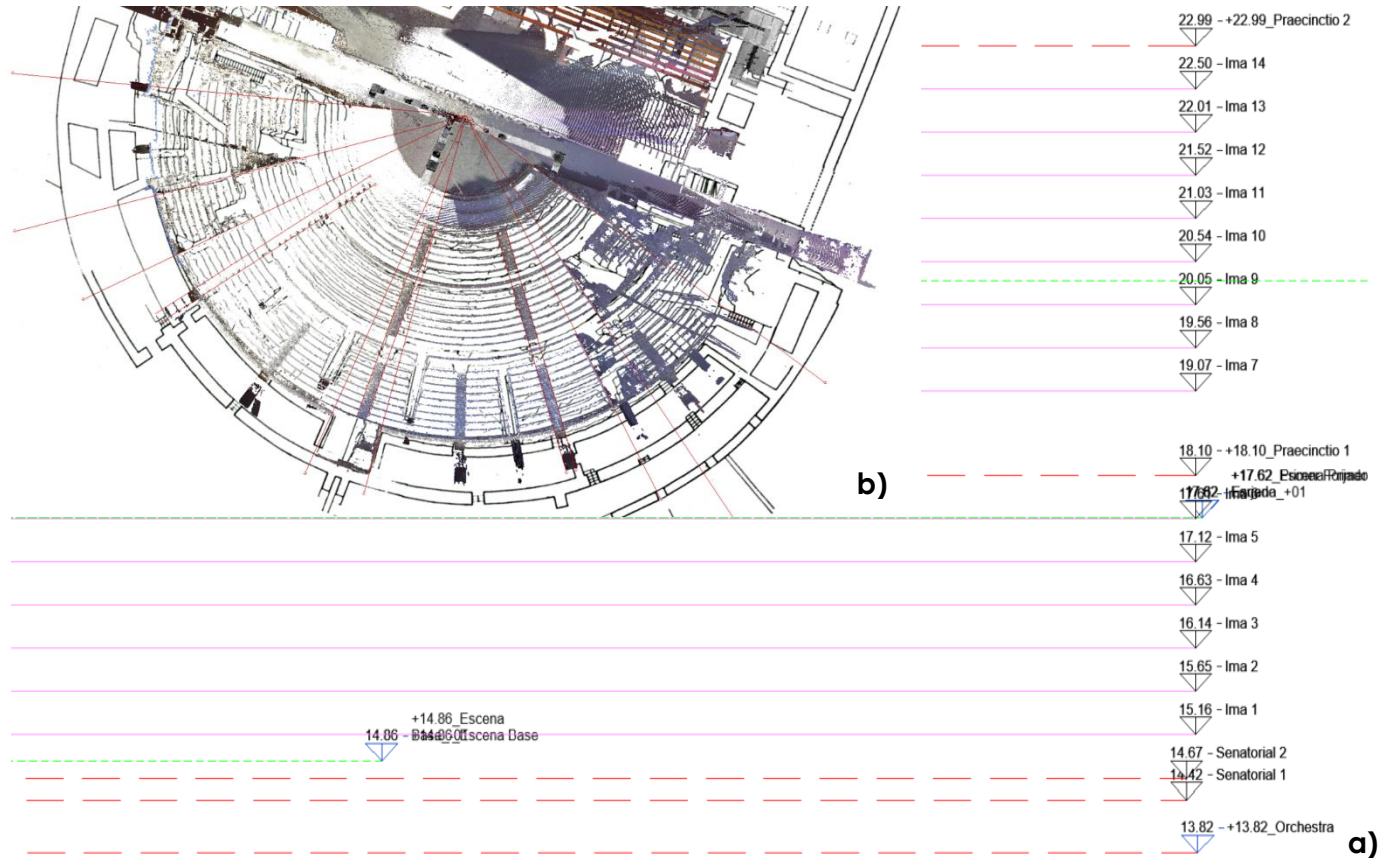


Figura 31: Cada uno de los niveles utilizados para el modelado de la escena y la cavea (a) y las rejillas que sirven de apoyo para diferenciar los sectores y accesos de la cavea (b).

5.1.6 ARCHIVOS VINCULADOS

Con la finalidad de poder trabajar con un modelo único cómodamente y que no resulte laborioso el procedimiento de modelado, se generarán dos archivos paralelos sobre los cuales se irá desarrollando la totalidad del modelado. En un primer archivo se encontrarán los modelos genéricos, suelos y muros correspondientes a la cavea, incluyendo los corredores y vomitorios bajo ésta, y los accesos principales (Aditus Maximus) que cierran el semicírculo del teatro. Además, este archivo será el que contenga la topografía del entorno de la montaña (Figura 32).

Por otro lado, se generará otro archivo que contenga todo lo referente a la escena y sus alrededores. En este modelo se levantará el cuerpo escénico reconstruido por los arquitectos G. Grassi y M. Portaceli, modelizando cada una de las plantas, escaleras y cámaras que la componen (Figura 33).

En última estancia, cuando el modelado haya concluido, estos archivos se vincularán mediante la herramienta; "Insertar" >> "Vincular un Revit", para generar un único modelo con el que almacenar toda la información relevante y poder generar vistas y planos para su posterior comprensión.

Dicha forma de trabajo es muy útil cuando se pretende trabajar con modelos seriadados o, como es el caso, que contengan una gran cantidad de información, dado que reduce el tiempo de gestión que necesita el programa para analizar tanta información centrándose únicamente en el archivo abierto y obteniendo solo información visual del archivo vinculado.

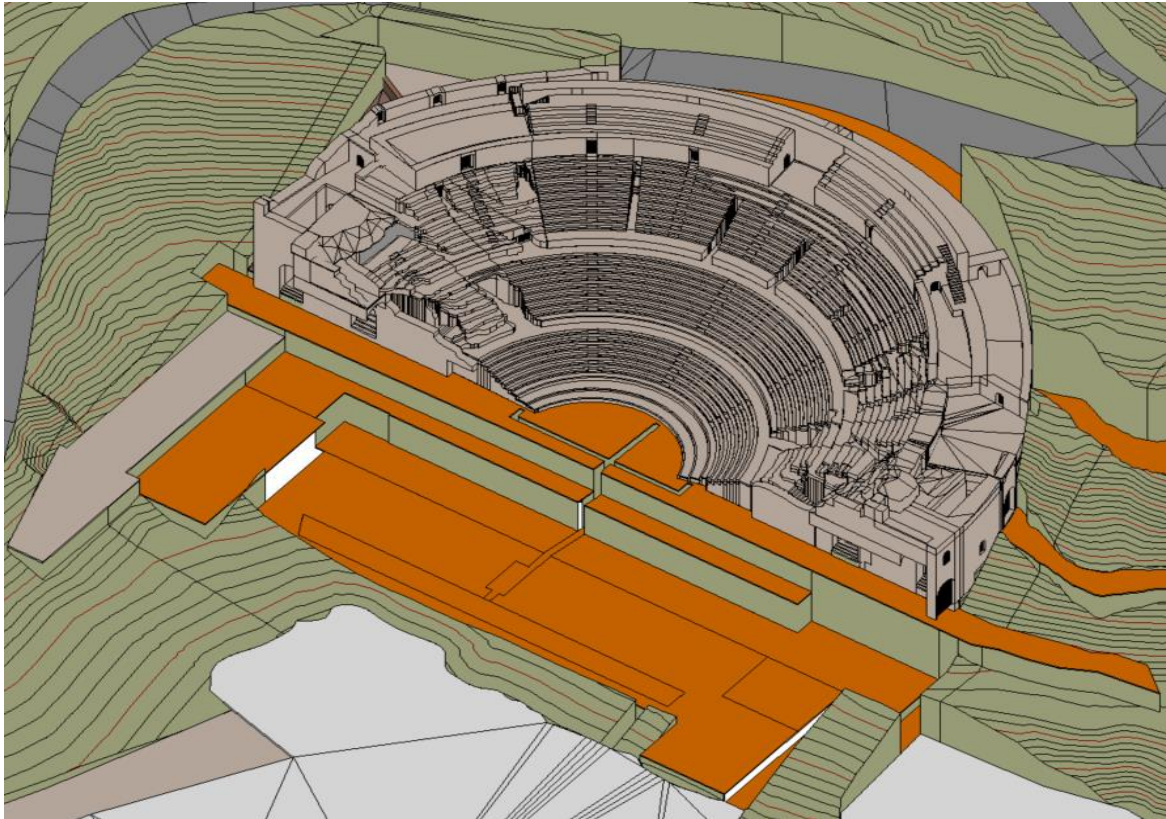


Figura 32: Primer archivo que contiene la totalidad de la cavea y la topografía.

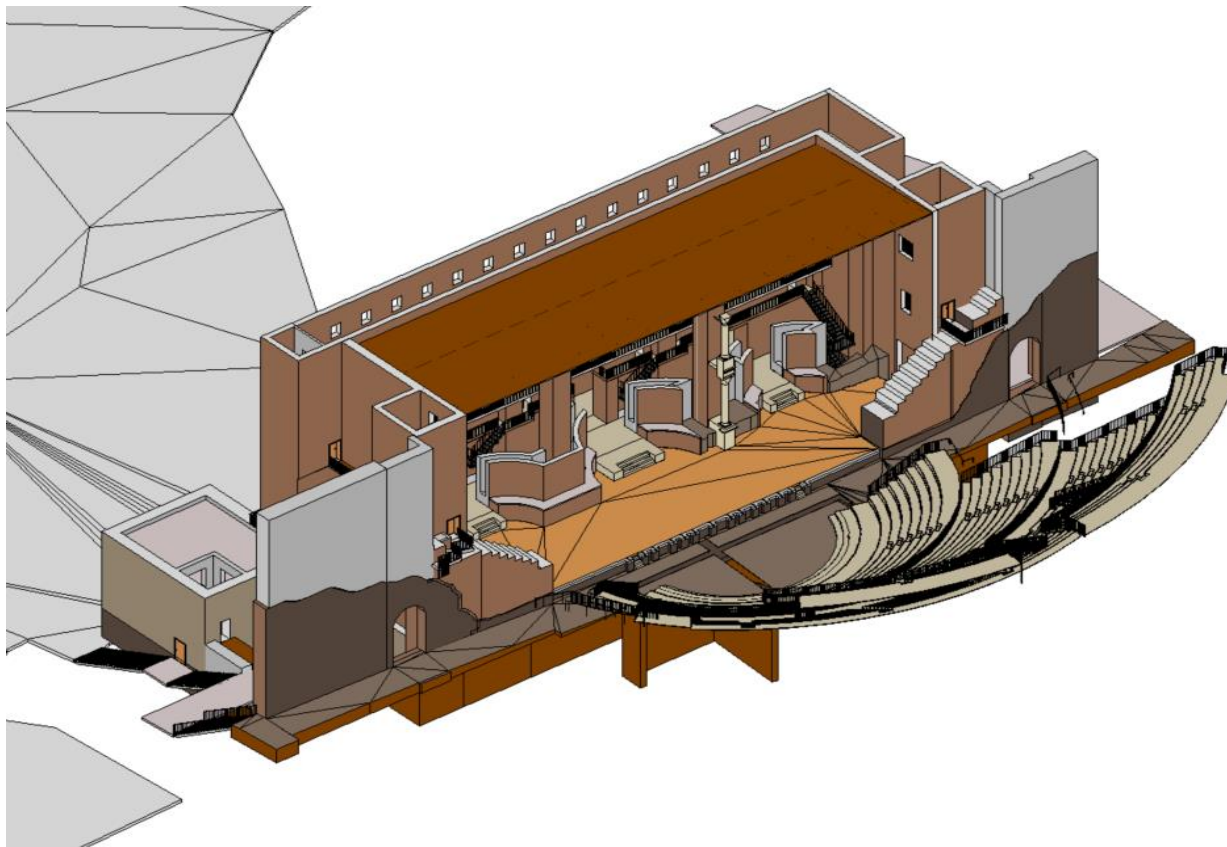


Figura 33: Segundo archivo con el modelo del cuerpo escénico y el revestimiento del graderío de la intervención.

5.2 MODELADO ARQUITECTÓNICO

5.2.1 MASA Y EMPLAZAMIENTO: PLATAFORMAS DE CONSTRUCCIÓN

Llegados a este punto, se procederá al levantamiento como tal del teatro. Con el fin de llevar el modelo virtual a su máxima aproximación con la realidad, se tomará la decisión de construir tanto las distintas partes de la cavea, recorridos y accesos, escena y galerías internas, con el comando de "Masa y emplazamiento" >> "Plataformas de construcción", lo que nos permitirá ir excavando en la superficie topográfica virtual las distintas partes del teatro romano (Figura 34).

La complejidad de esta parte reside en que cada uno de los peldaños, escalones, recorridos, escaleras, etc, se modelarán con este comando mencionado. Sin embargo, las limitaciones de Revit no permiten que dichas plataformas se solapen o superpongan entre ellas, lo que ha dificultado su levantamiento cuando se ha querido modelar los recorridos debajo de la cavea y los asientos de dicha cavea.

En el lugar donde se han generado esos conflictos, se sustituirán las plataformas de construcción por suelos y muros de la misma materialidad y tamaño que las plataformas con el fin de seguir siendo fieles a la realidad.

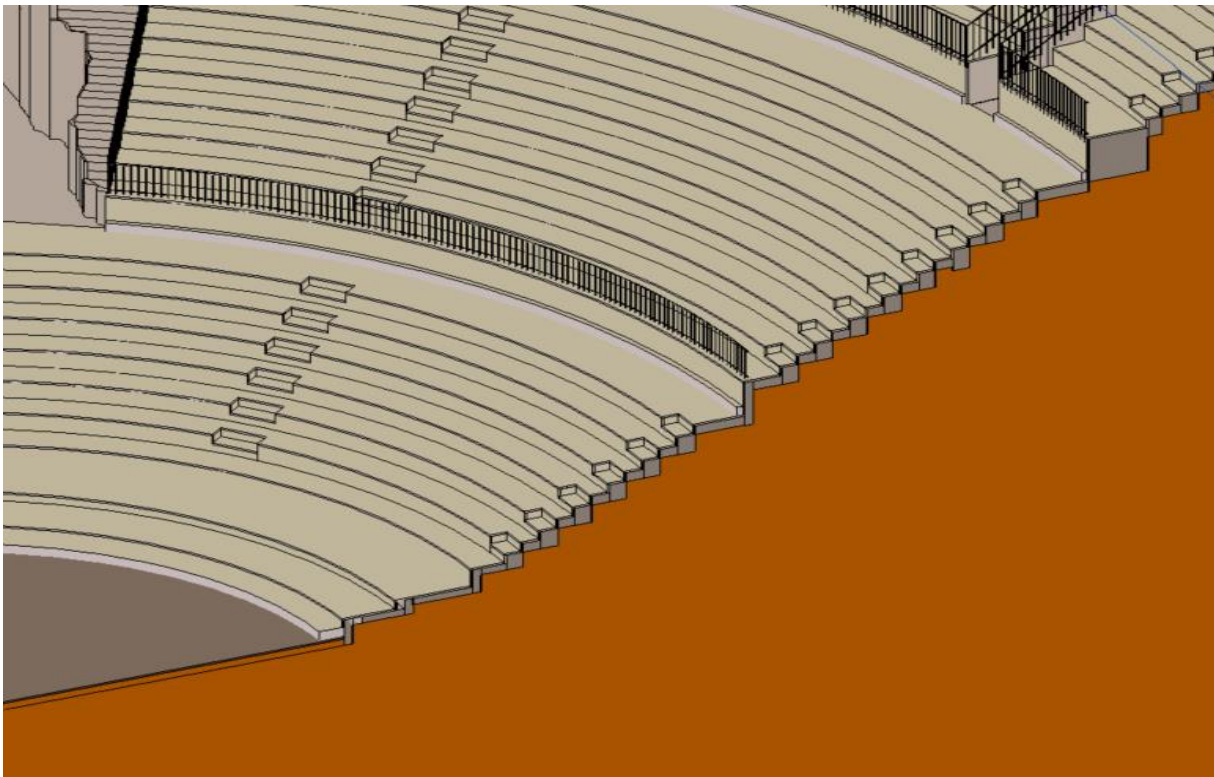


Figura 34: Corte transversal del teatro para poder ver la excavación de la cavea en la topografía virtual de modelo.

5.2.2 SUELOS

Para una representación fiel de la realidad, la familia "suelo", al tratarse de un elemento más fácil de manipular, nos permitirá modelar aquellas zonas donde no se ha podido por las limitaciones de las plataformas de construcción. Estos suelos se dividirán en dos grupos:

Un primer grupo donde los suelos serán, en su mayoría, componentes ligados a las plataformas de construcción, creándolos en aquellas zonas donde no se han podido modelar éstas últimas (Figura 35). Esto nos dará una visualización del modelo más amplia y acorde con lo que se desea representar. Estos suelos serán de un material único ya sea de piedra o de tierra de relleno (Figura 36a). Incluimos en este grupo los pavimentos horizontales de piedra, mármol y madera que corresponden al edificio original y a su rehabilitación.

Por otro lado, un segundo grupo de sección variable. Los suelos poseen la característica de poder definirles, a una parte de su estructura, un material de sección variable (Figura 36b). Esto nos permitirá llegar a aquellas zonas irregulares del terreno y de los correspondientes pavimentos que no poseen un relieve homogéneo (Figura 37).

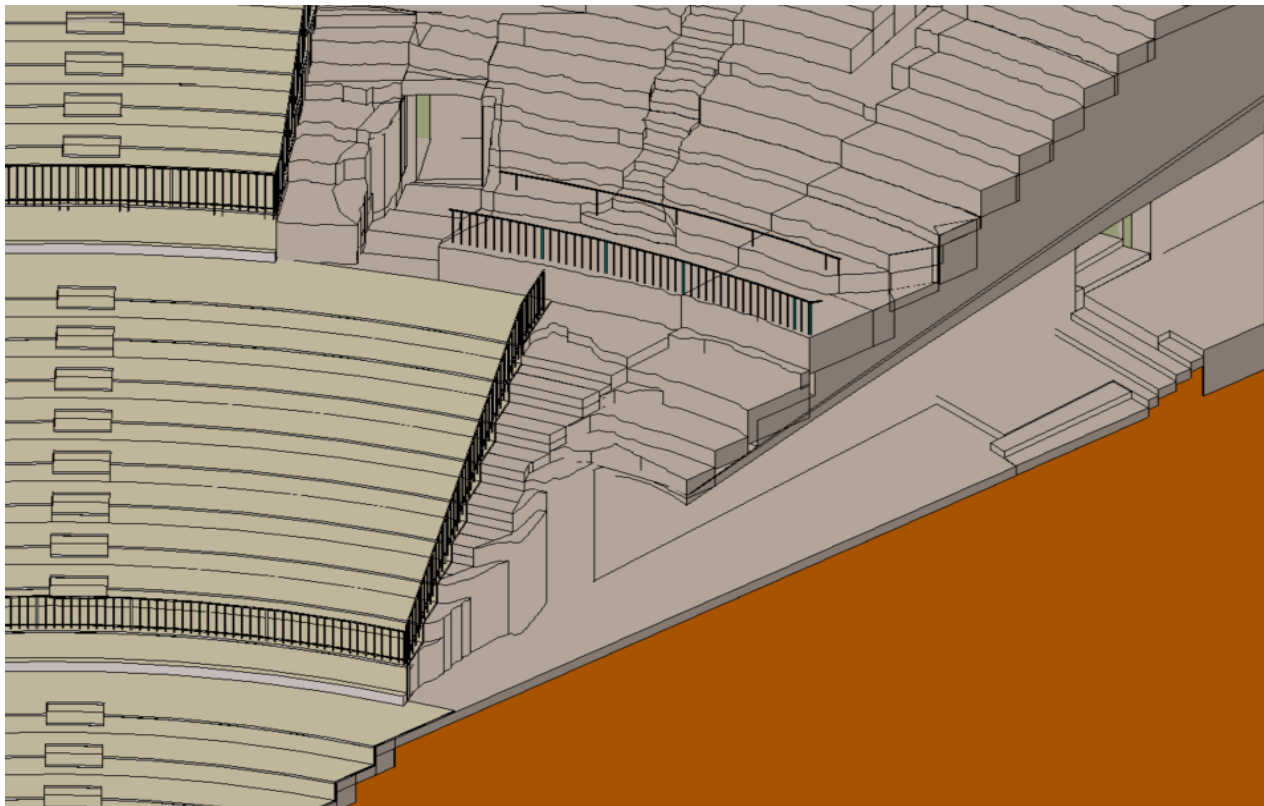
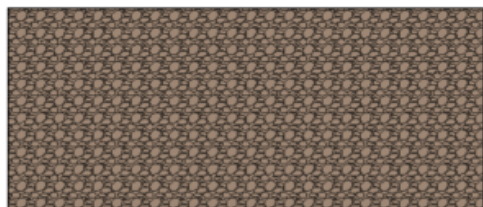


Figura 35: Representación del graderío modelado con suelo y bajo este, la plataforma de construcción de uno de los accesos a la cavea.



	Función	Material	Grosor	Envoltentes	Material estructural	Variable
1	Contorno del nú	Capas de envolv	0.0000			
2	Estructura [1]	Piedra, sardine	0.5200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Contorno del nú	Capas de envolv	0.0000			

Insertar Suprimir Arriba Abajo

a)



	Función	Material	Grosor	Envoltentes	Material estructural	Variable
1	Contorno del núcl	Capas de envolve	0.0000			
2	Estructura [1]	Piedra, sardinel	0.0200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Contorno del núcl	Capas de envolve	0.0000			
4	Substrato [2]	Tierra	0.1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Insertar Suprimir Arriba Abajo

b)

Figura 36: Tipologías de muros empleadas: suelos con materiales únicos (a) y suelos con sección variable (b).

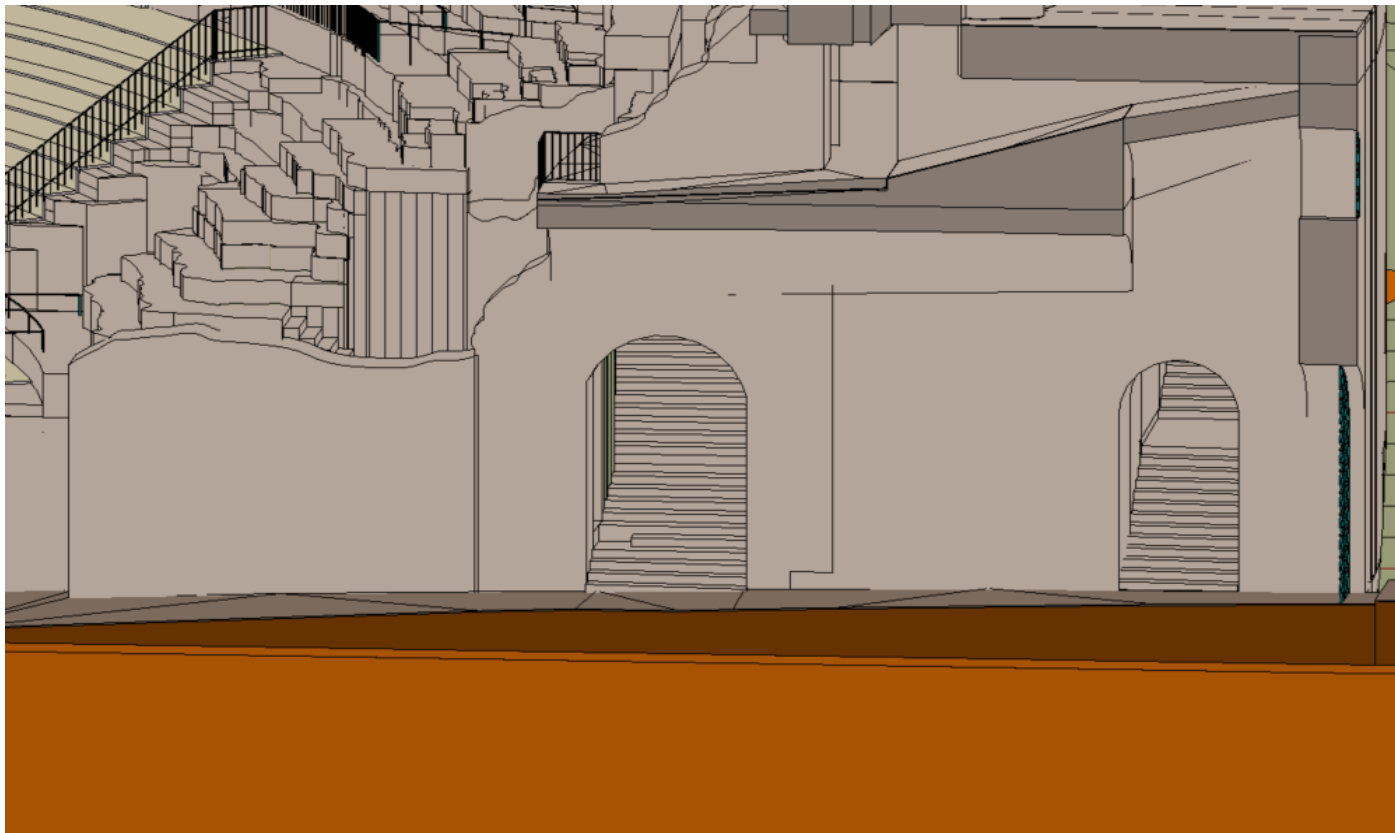


Figura 37: Suelo de sección variable, a modo de rampa que va tomando forma a partir de la nube de puntos.

5.2.3 MUROS

De manera similar se han introducido los muros dentro del proyecto. Los muros comprenderán las partes verticales descubiertas de las gradas y los correspondientes muros de ladrillo y piedra de todo el graderío incluyendo sus corredores y vomitorios. Además, se modelarán las diferentes tipologías de muros y particiones interiores correspondientes al cuerpo escénico.

Con la finalidad de representar un modelo 3D lo más parecido al edificio teatral y poder entender esa mimetización e irreversibilidad del proyecto de intervención de Grassi y Portaceli, los muros se solaparan adquiriendo secciones complejas gracias al comando de "Editar perfil" que poseen las familias de muros (Figura 38).

Para este proyecto de intervención se utilizarán una serie de muros, desde los muros de ladrillo y piedra con secciones comprendidas desde los 30 cm hasta los 2 m, pasando por revestimientos de piedra, y como no las nuevas tipologías de muros localizadas en el volumen escénico (Figura 39).

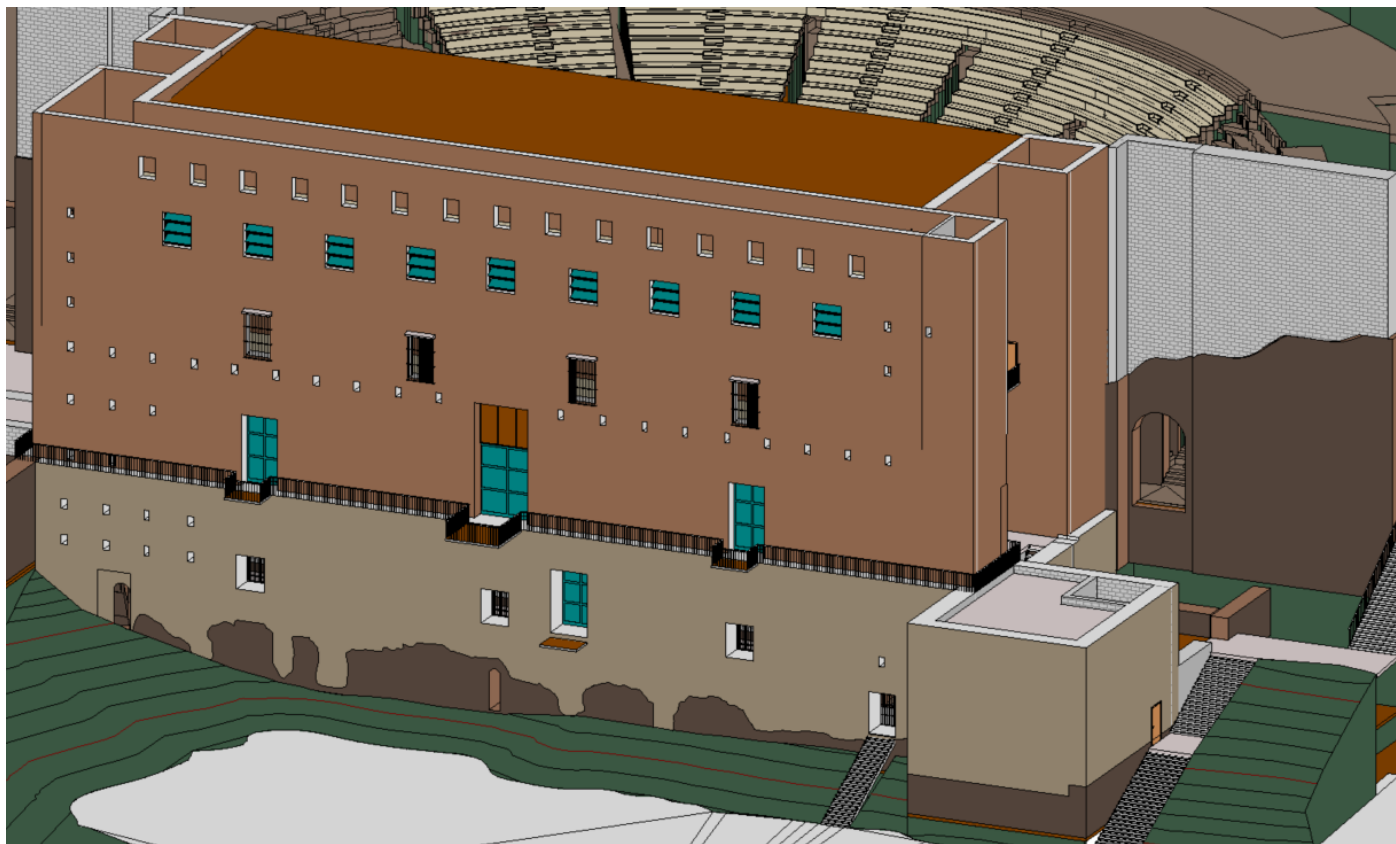


Figura 38: Solapamiento de los muros romanos con los muros propuestos en la intervención.

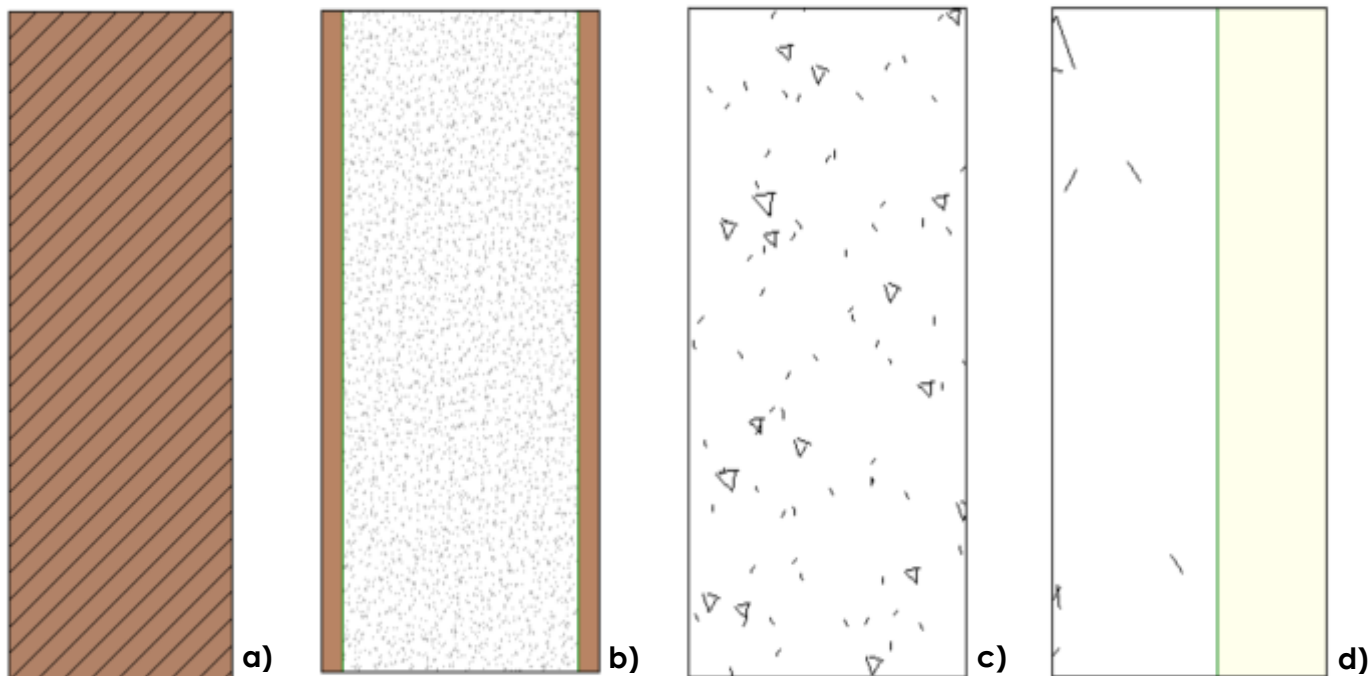


Figura 39: Muro de ladrillo o piedra (a); muro de hormigón con encofrado perdido de ladrillo (b); muro de hormigón (c); y muro de hormigón revestido con mármol (d).

5.2.5 RAMPAS Y ESCALERAS

Muy pocas han sido las rampas que se han necesitado para este modelo pues, como ya se ha comentado, para salvar pequeños desniveles que requerían el uso de rampa en su momento, en su lugar se ha preferido introducir suelos de sección variable. No obstante, alguna que otra rampa se ha necesitado sobre todo para modelizar la rehabilitación dedicada a la accesibilidad de ciertas partes del teatro romano.

Por otro lado, encontramos las escaleras. Para su mejor comprensión, se dividirán en dos grupos en los cuales cada escalera desempeña una función específica.

1. Escaleras empotradas

Este grupo de escaleras tiene una desventaja puesto que no se han modelado con el comando "Escalera" que posee el software sino que se han creado a partir de plataformas de construcción cuyo material será la piedra.

Dado que los romanos excavaban el graderío en la ladera de la montaña, los accesos y comunicaciones verticales de la cavea también se tallaron en la roca. Por tanto, para representar la realidad, se han modelado uno a uno cada peldaño en la topografía del terreno (Figura 40).

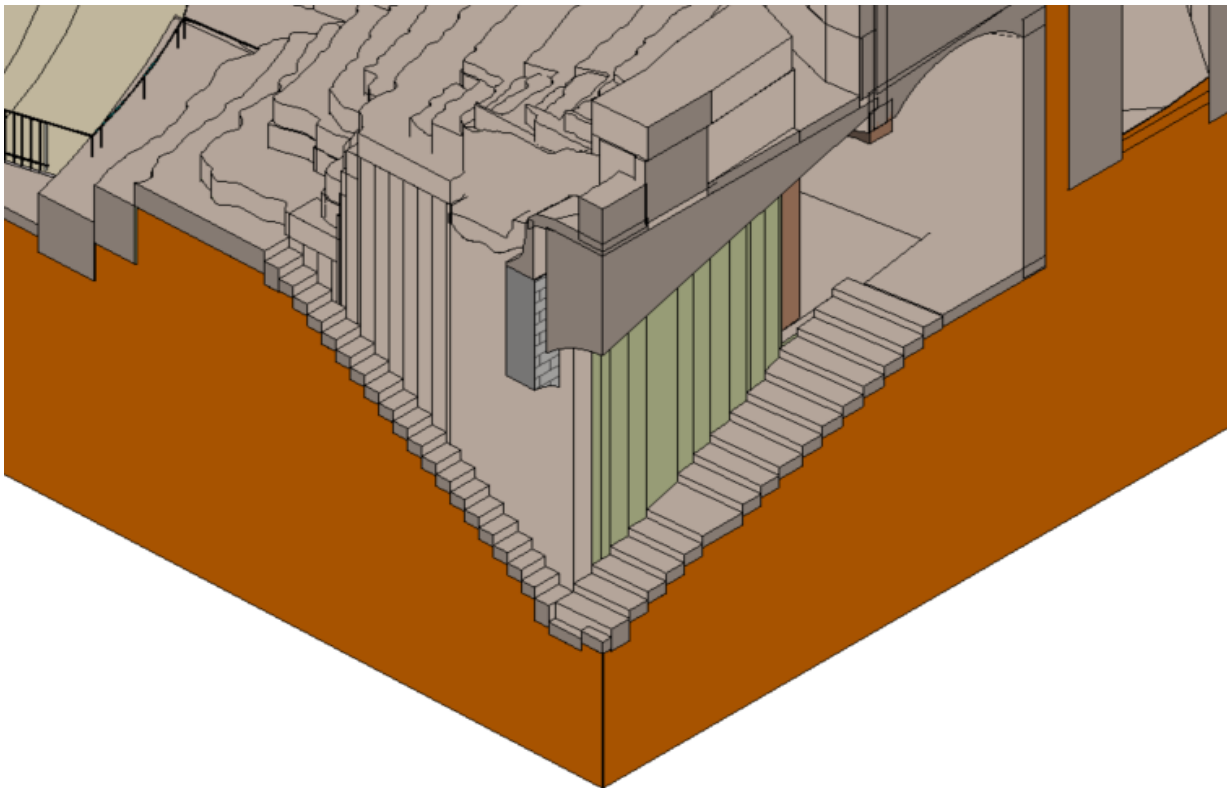


Figura 40: Escalera en uno de los accesos a la cavea y otra que asciende hasta el corredor superior.

2. Escaleras de nueva construcción

Mediante el comando "Escalera" facilitado por el software Revit, se modelará la comunicación vertical del cuerpo escénico. Este grupo recoge las escaleras proyectadas tanto en la parte inferior de la escena que ascienden desde la ruina romana hasta el espacio de representación (Figura 41a); como las escaleras que comunican los dos volúmenes rectangulares que cierran el espacio de representación y que separan el semicírculo del graderío del volumen escénico (Figura 41b).

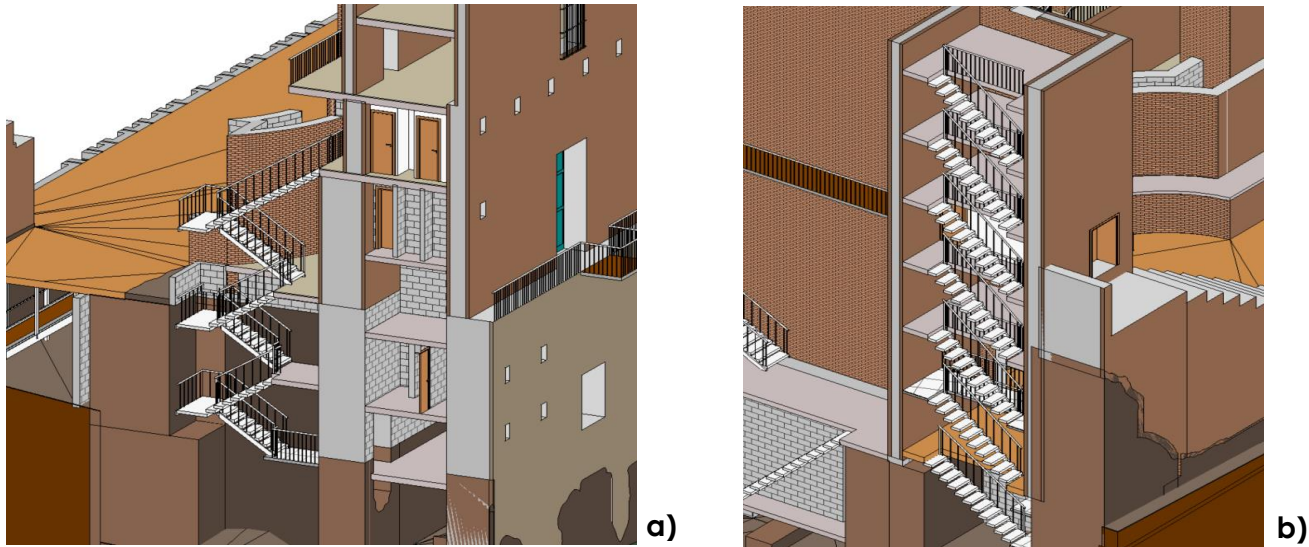


Figura 41: Escalera de acceso a la escena procedente de las ruinas (a) y escalera en una de las torres (b).

5.2.4 PILARES Y VIGAS

Bajo el espacio de representación, se encuentra una sala denominada *Hyposcaenium* que según investigaciones históricas era el espacio que quedaba por debajo del *proscenium*, desde donde podían salir los personajes que representaban las almas de los difuntos. En ocasiones, era utilizado como almacén, vestuario y para instalar, oculta a la *cavea*, parte de la tramoya teatral¹⁸.

En el proyecto de intervención de Grassi y Portaceli, se decide construir un sistema de pilares y vigas metálicas con la finalidad de separar la ruina romana y también como parte de la estructura que sostiene el pavimento escénico. Mediante los comandos "Pilares" y "Vigas" se han modelado dicha estructura (Figura 42).

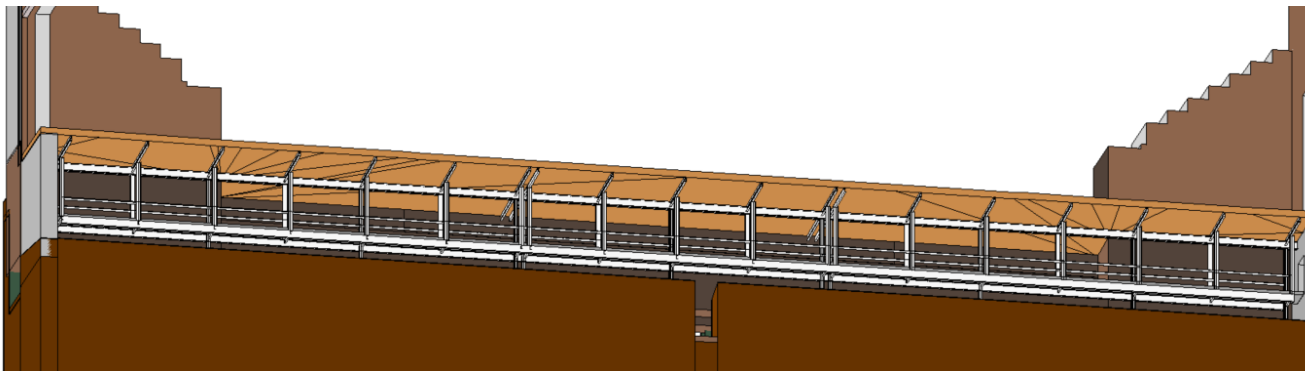


Figura 42: Plataforma construida en el *Hyposcaenium* bajo la escena. Estructura formada por pilares y vigas metálicas.

¹⁸ Tesoros del Patrimonio Cultural de España (2018)

Por otro lado, encontramos los gruesos pilares que sujetan la cercha de la cubierta de la escena, que ascienden desde la cabeza de los muros romanos que se encuentran bajo el pavimento de la escena. Estos pilares se han modelado de hormigón armado y revestidos de ladrillo visto que se utilizó como encofrado perdido en la restauración (Figura 43).

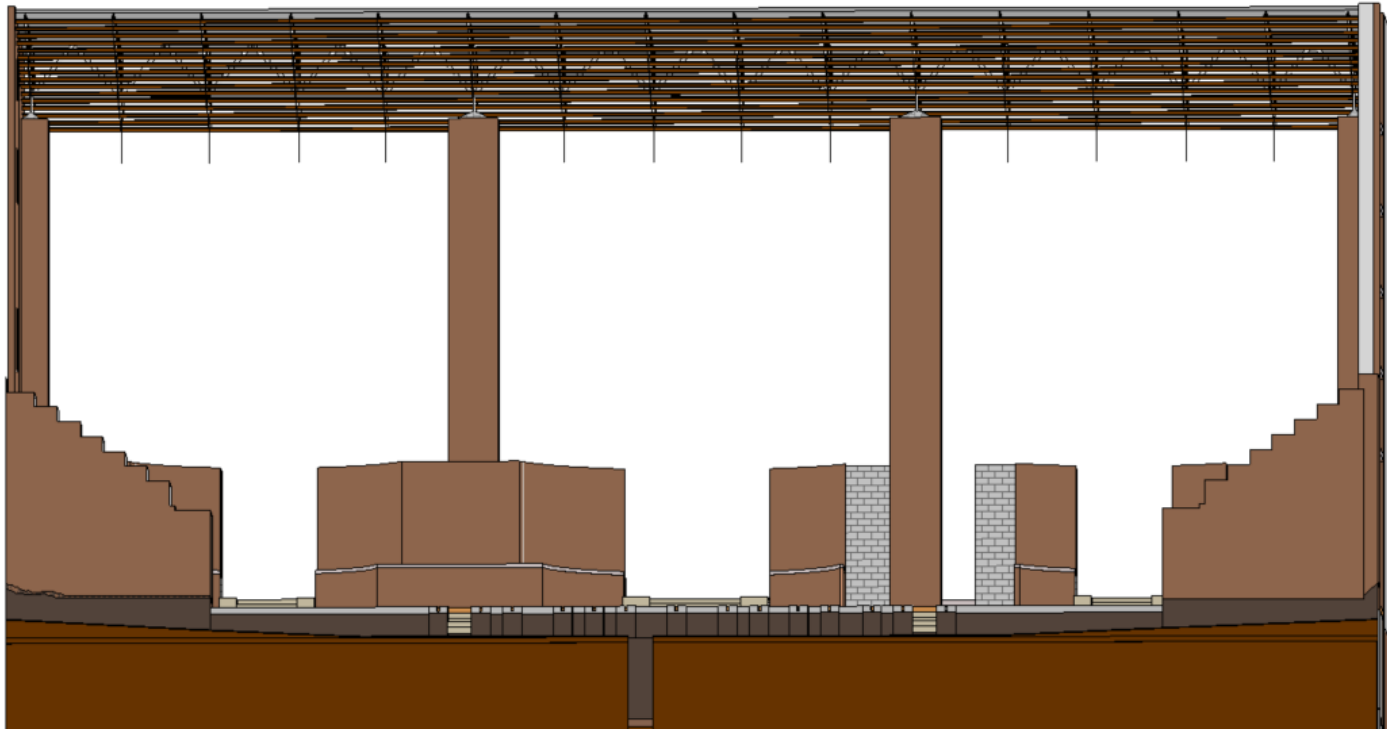


Figura 43: Pilares estructurales que sostienen la cercha de cubierta.

5.2.5 CERCHAS

Con ayuda de los planos de detalles (Figura 44) facilitados por el tutor Francisco Juan Vidal y apoyándose en fotografías tomadas en el lugar, se podrá modelar la correspondiente cercha que sostiene la cubierta del cuerpo escénico.

Se trata de una cercha de sección variable que se compone de una serie de perfiles normalizados siendo la mayoría perfiles en "L" cuyo tamaño va variando a medida que la cercha necesita más o menos canto. Este modelado ha sido posible gracias al comando de Revit, "Cerchas", el cual tras insertar una familia de la misma, te permite modificar su perfil para adecuarlo a la representación que se desea conseguir (Figura 45). Además, para elegir los perfiles adecuados se han tenido que importar familias de la misma biblioteca 3D que posee Revit.

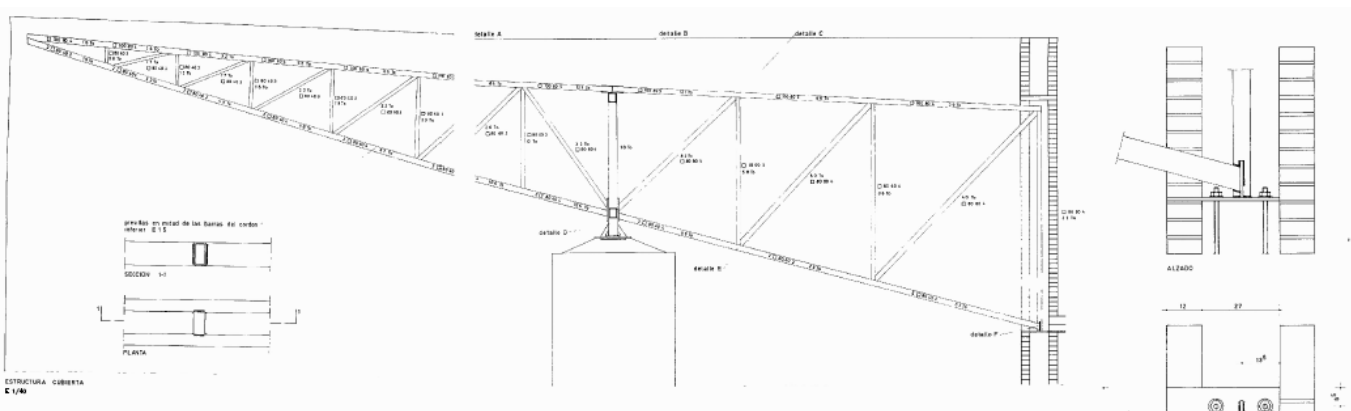


Figura 44: Detalle de la cercha empleado como base para el modelado de la misma.

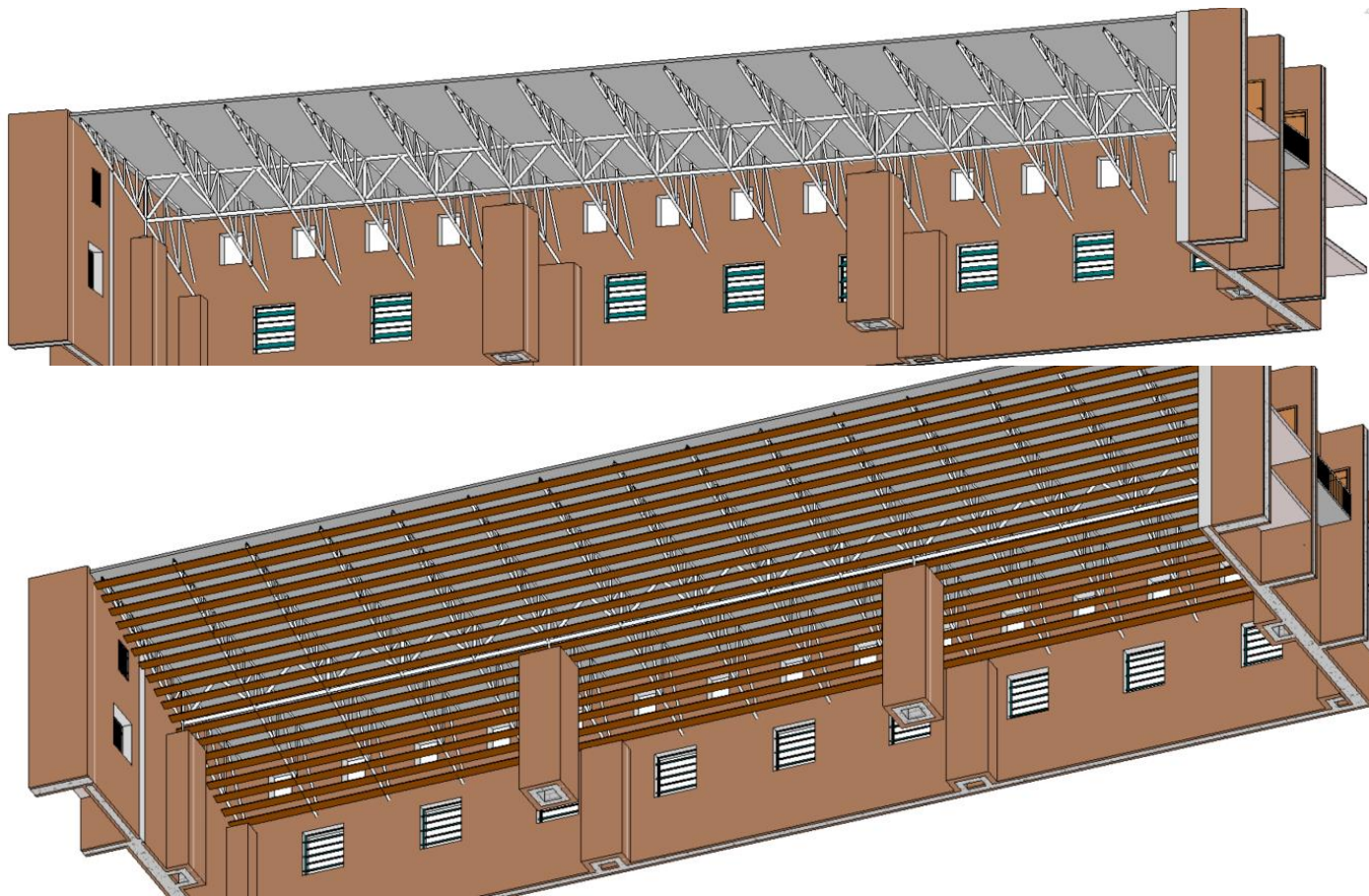


Figura 45: Modelado de cercha con y sin cubrición por los paneles de madera.

5.2.6 HUECOS Y CARPINTERÍAS

El siguiente paso para la construcción del modelo es el de introducir huecos y carpinterías, estas comprenderán las familias de puertas y ventanas. Estas familias, de forma diferente a otras, requieren de un componente llamado "anfitrión" donde poder insertarlas. Las puertas y ventanas se insertaran en los muros, y las claraboyas y trampillas en suelos o cubiertas.

El proceso de inserción tanto de huecos como de las carpinterías es bastante sencillo ya que la plantilla general de arquitectura que trae predeterminada Revit, ya posee cargadas algunas familias de puertas y ventanas. El resto que no estén incluidas en esta plantilla se deben importar desde una biblioteca 3D ya sea la que contiene Revit o de otra externa al software.

Otros comandos que ayuda a la generación de huecos en muros y cubiertas es el comando "Hueco de muro" o "Hueco de suelo", localizado en "Ficha arquitectura" >> "Grupo Hueco". Este comando ha facilitado el modelado de huecos donde no se ha requerido una ventana o una puerta. También encontramos la posibilidad de generar huecos en los muros modificando su perfil, mediante el mismo comando anteriormente mencionado de "Editar perfil".

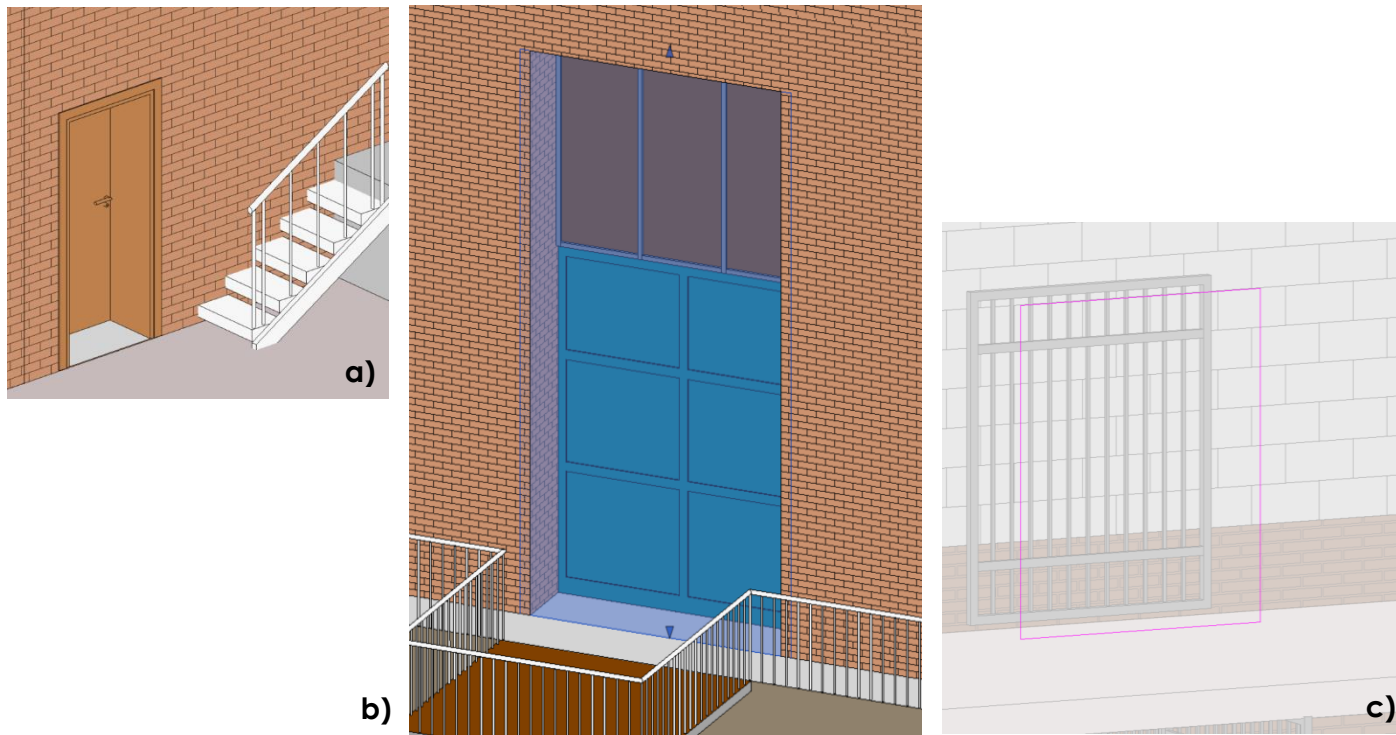


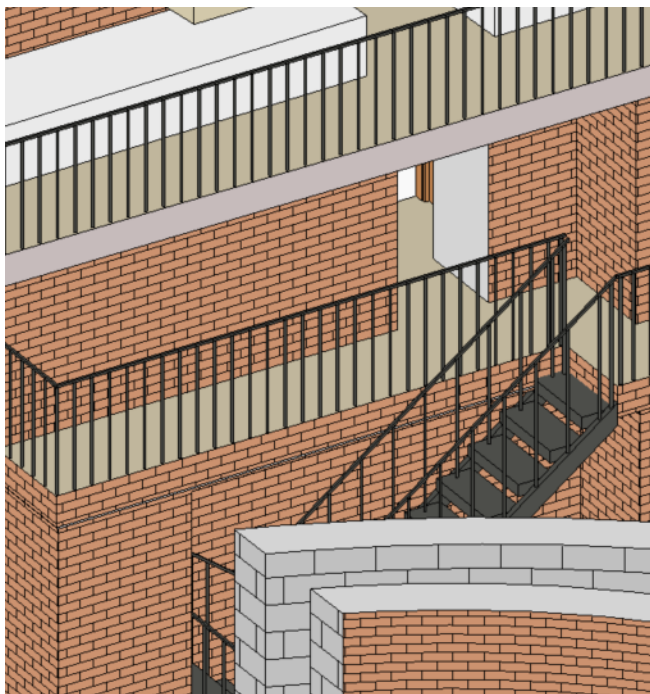
Figura 46: Puerta con anfitrión (a); hueco generado a partir del comando "Hueco" resaltado en azul (b); y hueco creado a través de la edición del perfil del muro (c).

5.2.7 BARANDILLAS

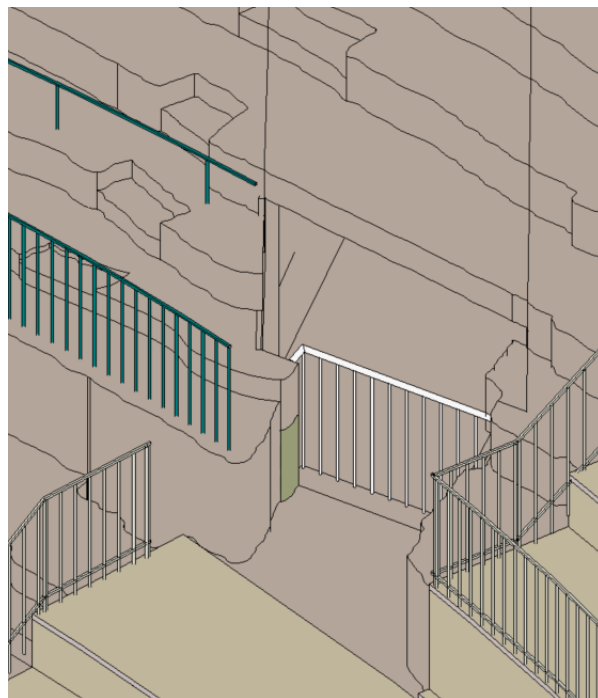
La colocación de las barandillas puede utilizarse en dos casos, ya sea para la protección de rampas y escaleras o para cubrir cambios importantes de nivel. En el caso de escaleras y rampas, las barandillas se colocan de forma automática, teniendo que elegir simplemente en el panel de propiedades, la familia de barandilla que se desea colocar. En cambio, si se quiere colocar una barandilla en un elemento que no sea ninguno de los dos mencionados, habrá que hacer uso de la opción “Barandilla”.

Esta opción te permite colocar la barandilla de dos formas distintas: “Colocar en anfitrión” y “Barandilla de camino”. La primera de ellas actúa de manera similar a la ya comentada, únicamente se tiene que seleccionar una escalera o una rampa para que se modele la barandilla. La otra opción te permite dibujar el recorrido de la barandilla mediante la herramienta de dibujo.

En este modelo se han tenido que crear dos barandillas relativamente similares pero con algunas modificaciones. Las barandillas se han colocado en las escaleras de nueva construcción y en el frente escénico (Figura 47a), además de las barandillas que acotan el espacio del graderío que fue rehabilitado (Figura 47b).



a)



b)

Figura 47: Barandilla del frente escénico (a) y múltiples barandillas de la cavea (b).

5.2.8 MODELOS GENÉRICOS

Por último y como cabía de esperar, dadas la heterogeneidad, irregularidad y complejidad del edificio arquitectónico se recurrirá a la herramienta del software Revit de "Modelado genérico" mediante los comandos de "Crear familia" y "Modelado in-situ".

Con este apartado se pone de manifiesto lo comentado en capítulos anteriores. Dado que H-BIM todavía es una tecnología emergente, no se han desarrollado por completo bibliotecas 3D que posean modelos paramétricos capaces de solventar los problemas de gestión y modelado que requieren los edificios del patrimonio histórico-cultural, debido a la complejidad y exclusividad que poseen estos edificios.

Mediante la creación de familias con modelos genéricos se podrá modelar aquellos elementos característicos del teatro romano de Sagunto, a saber: huecos, ventanas, cerrajería, panelado de la cubierta, formas complejas de relleno del terreno, bóvedas, etc. A continuación, se expondrán una serie de imágenes donde poder hacerse una idea de los modelos creados mediante este comando.

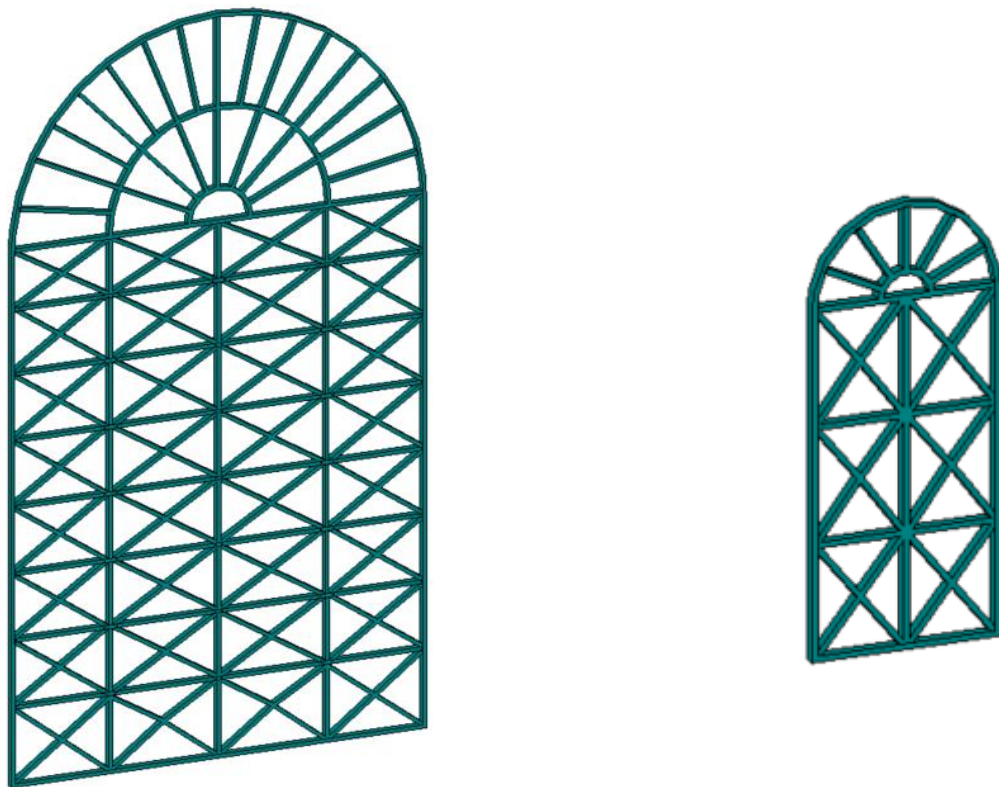


Figura 48: Cerrajería puerta acceso principal lateral (a) y cerrajería de las ventanas (b)

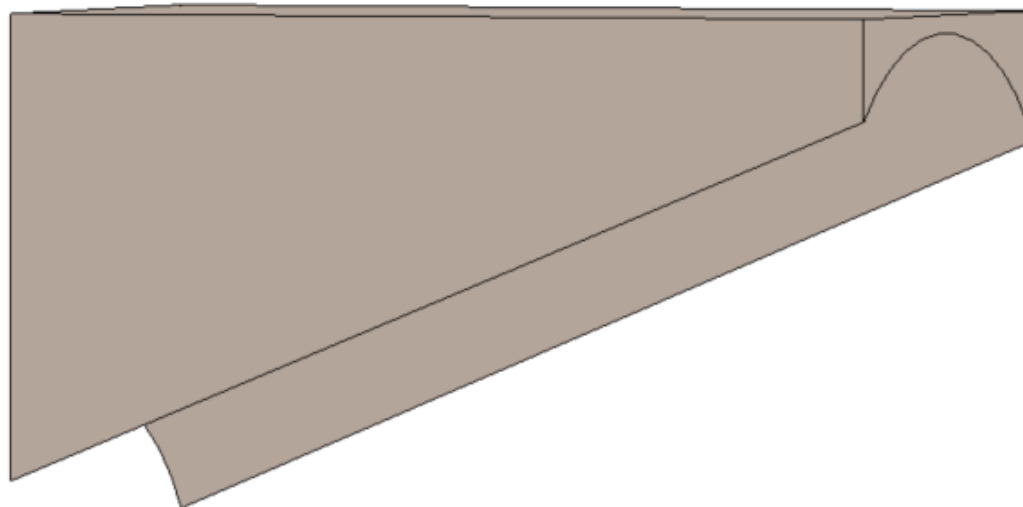


Figura 49: Modelo genérico para la creación de una de las bóvedas de los accesos a los praecinctios.

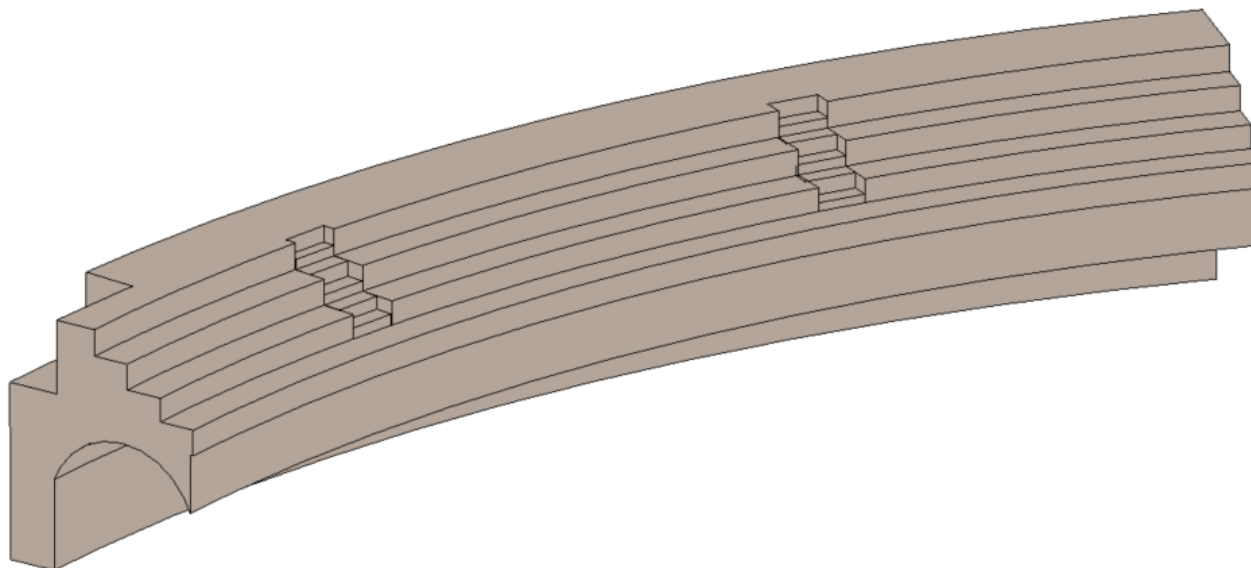


Figura 50: Masa de relleno bajo el graderío del pórtico superior y su cámara abovedada.

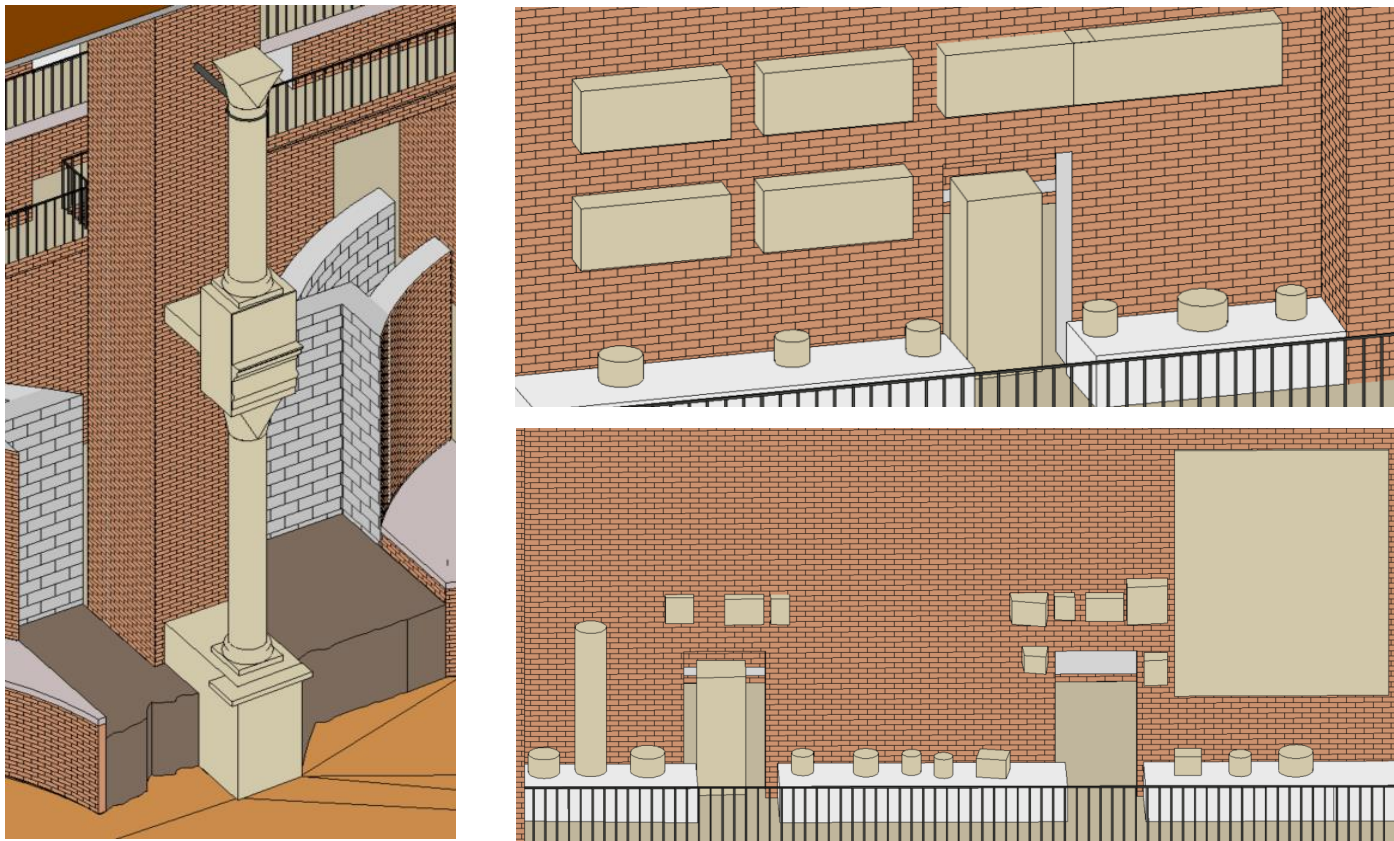


Figura 51: Cada uno de los elementos que componen el anticuario expuesto en el volumen escénico.



Figura 52: Cerrajería, ventanas y Puerta Regia localizados en la fachada norte del teatro.

5.3 VISUALIZACIÓN 3D DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN

5.3.1 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO



Figura 53

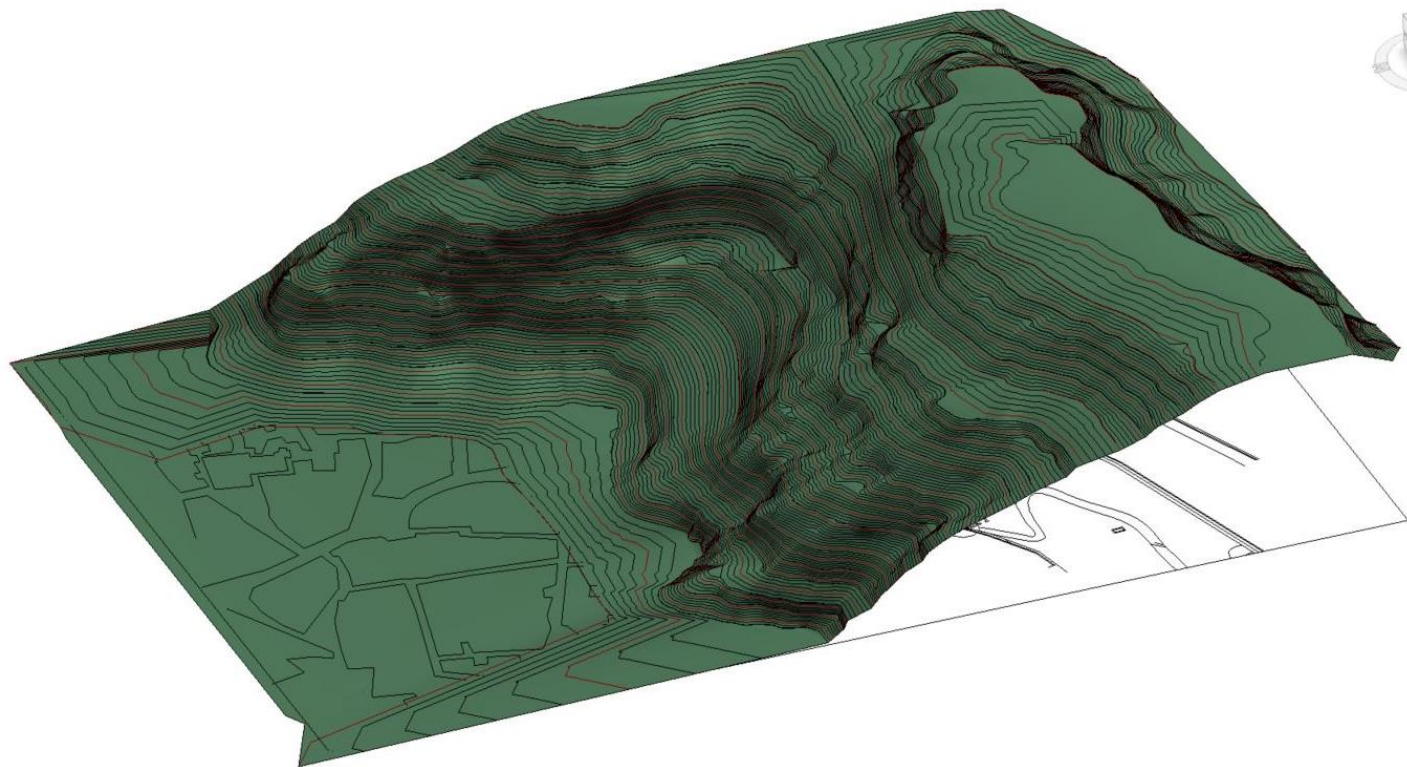


Figura 54

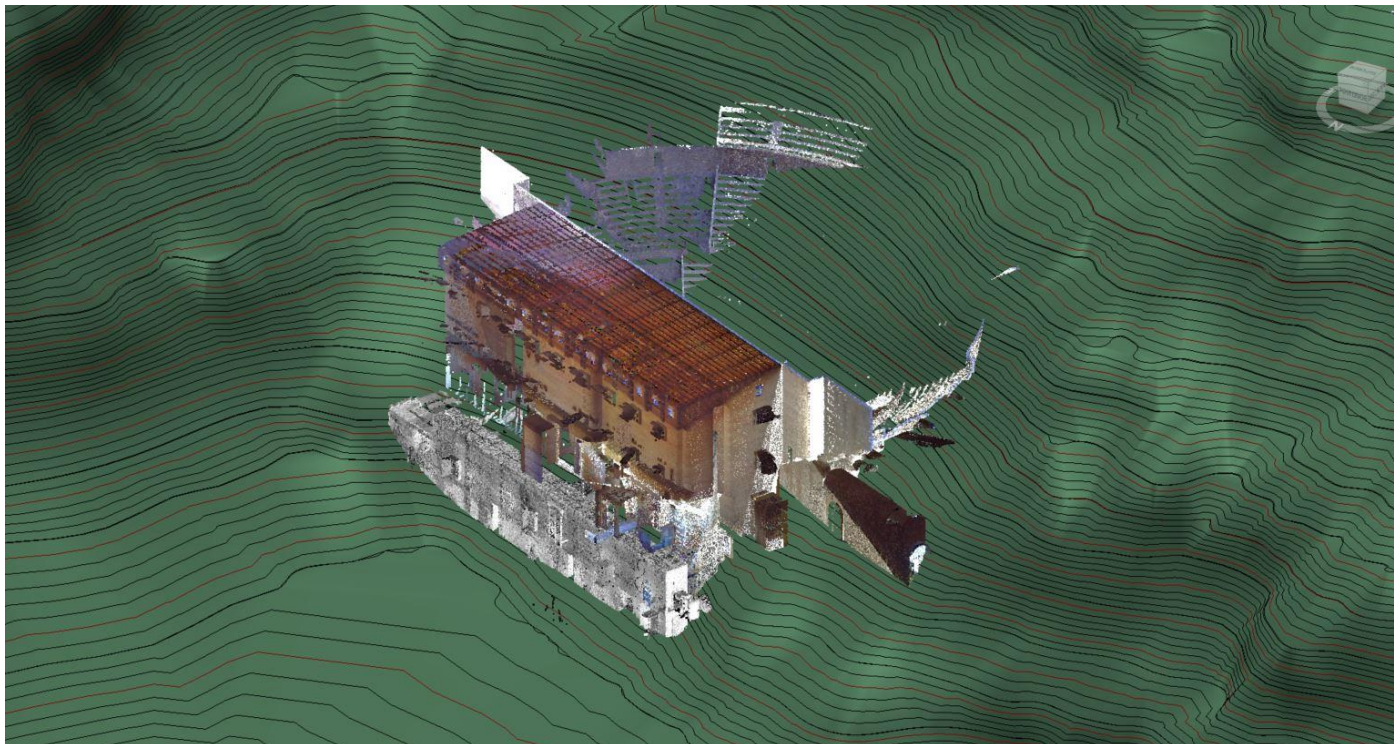


Figura 55

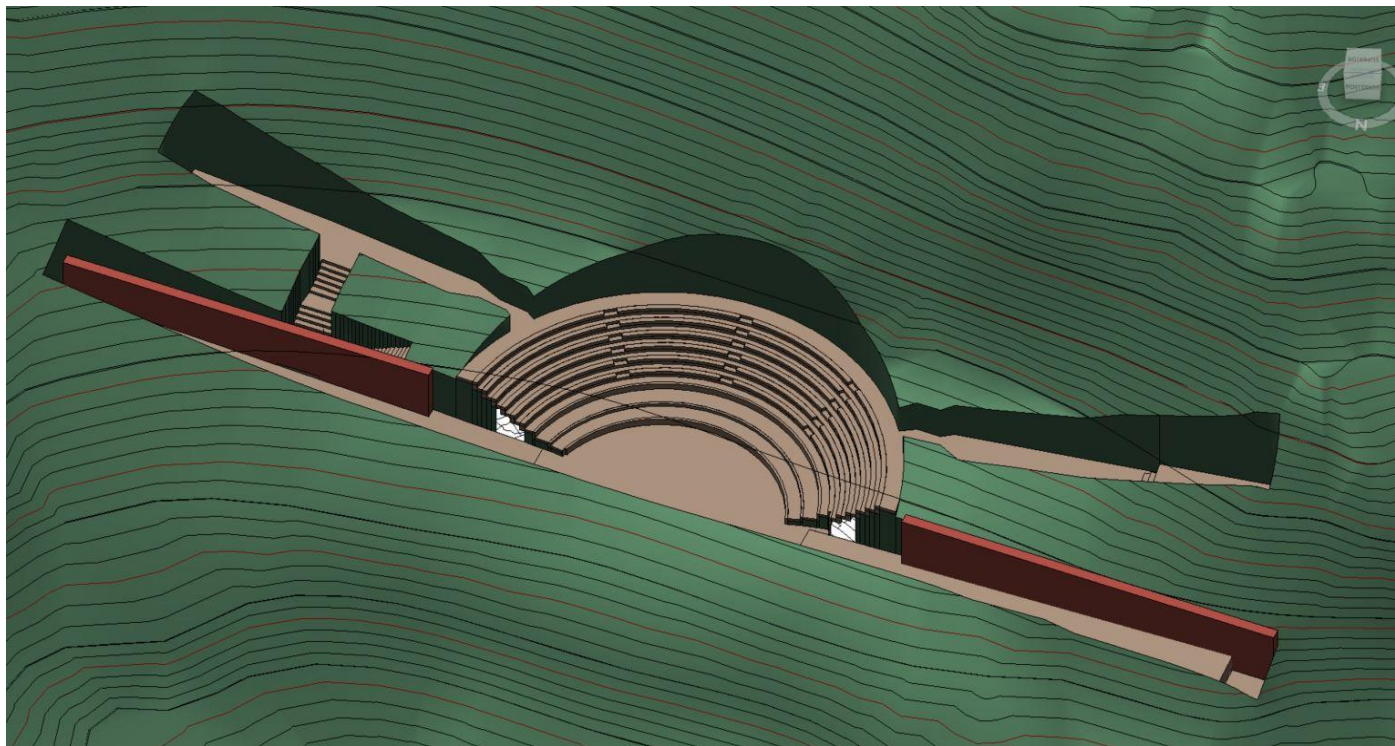


Figura 56

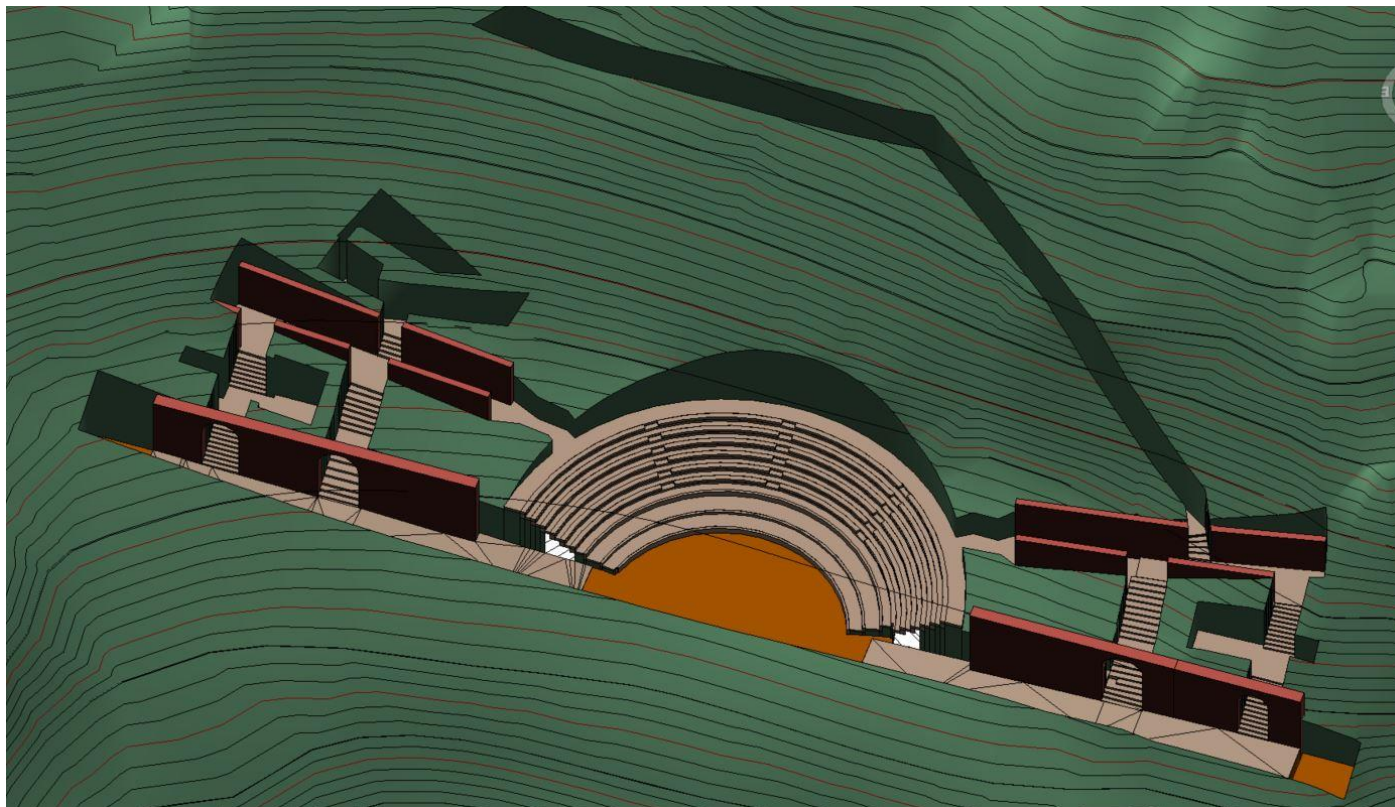


Figura 57

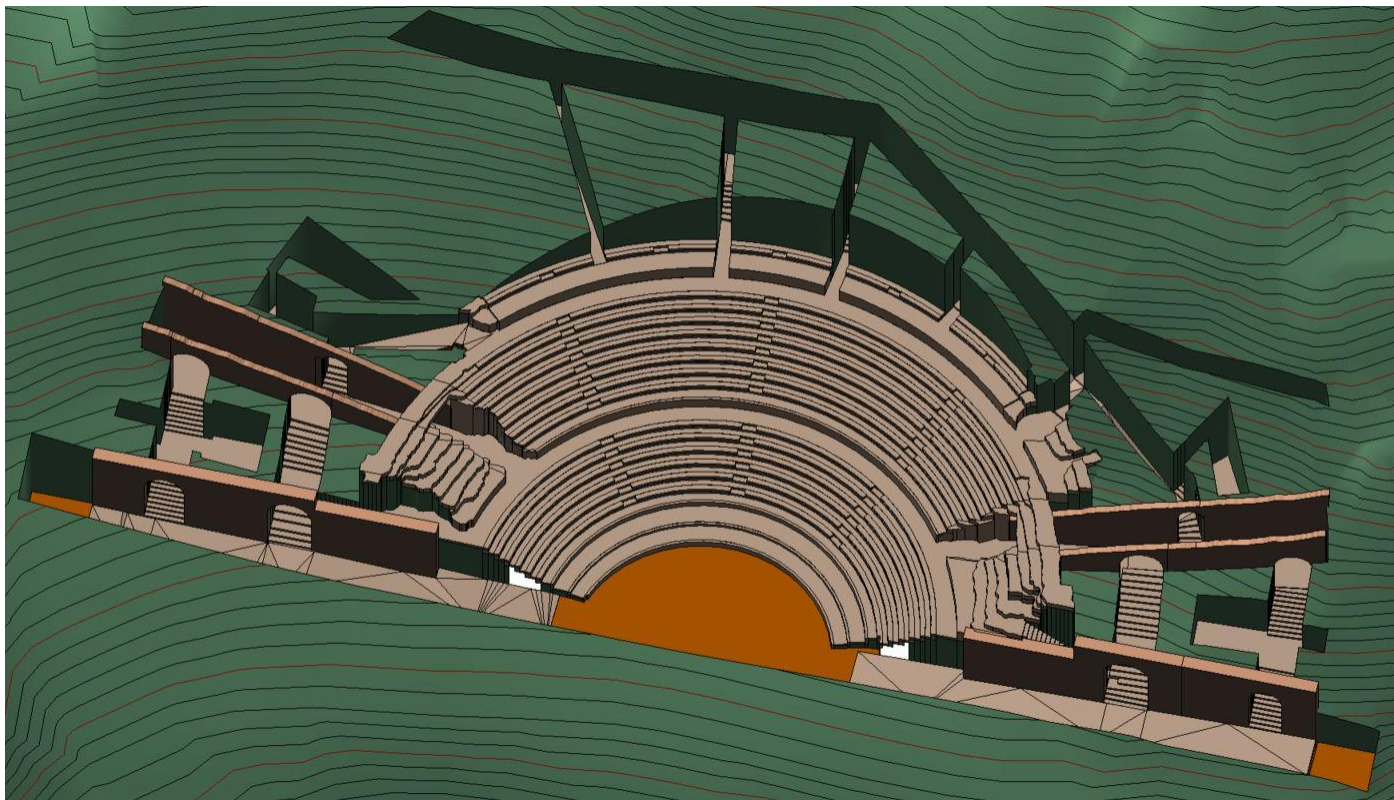


Figura 58

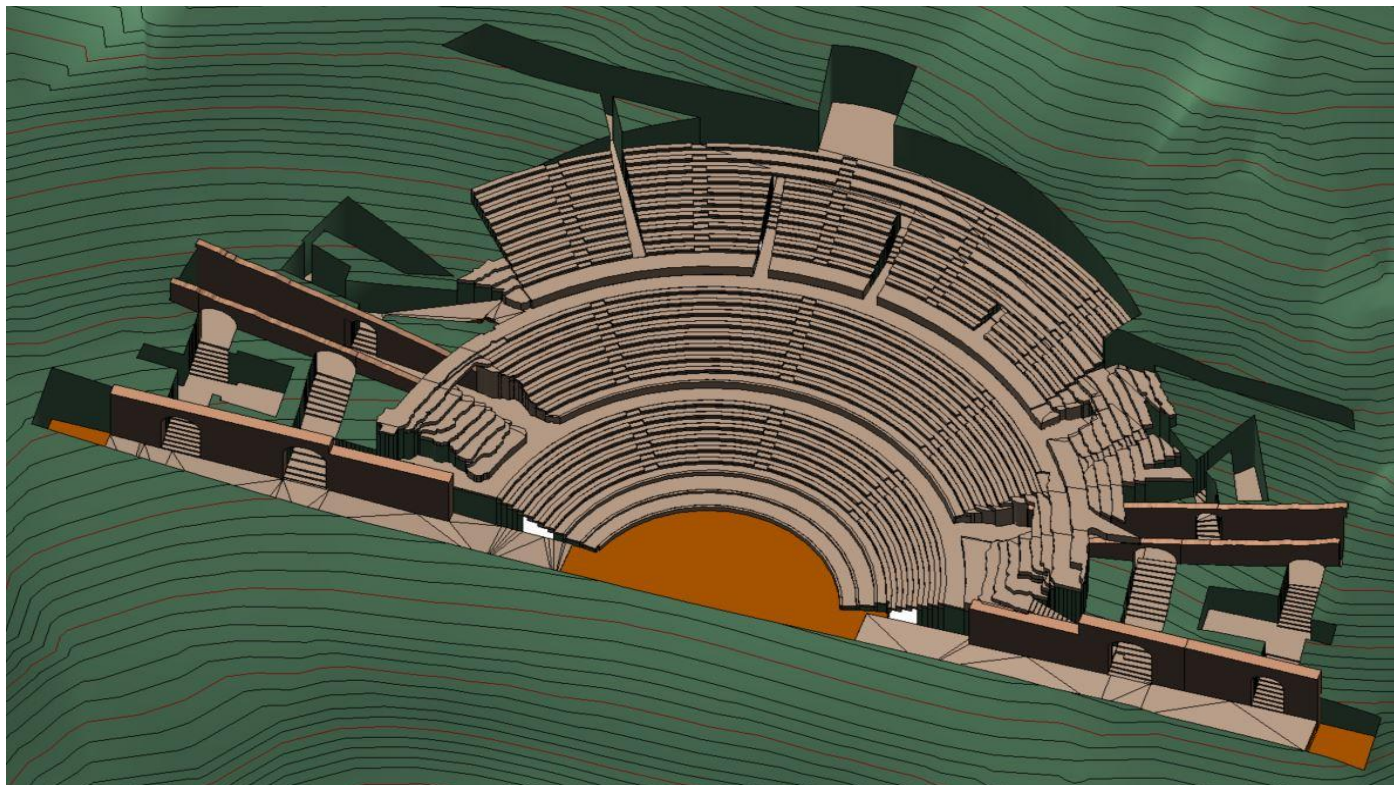


Figura 59

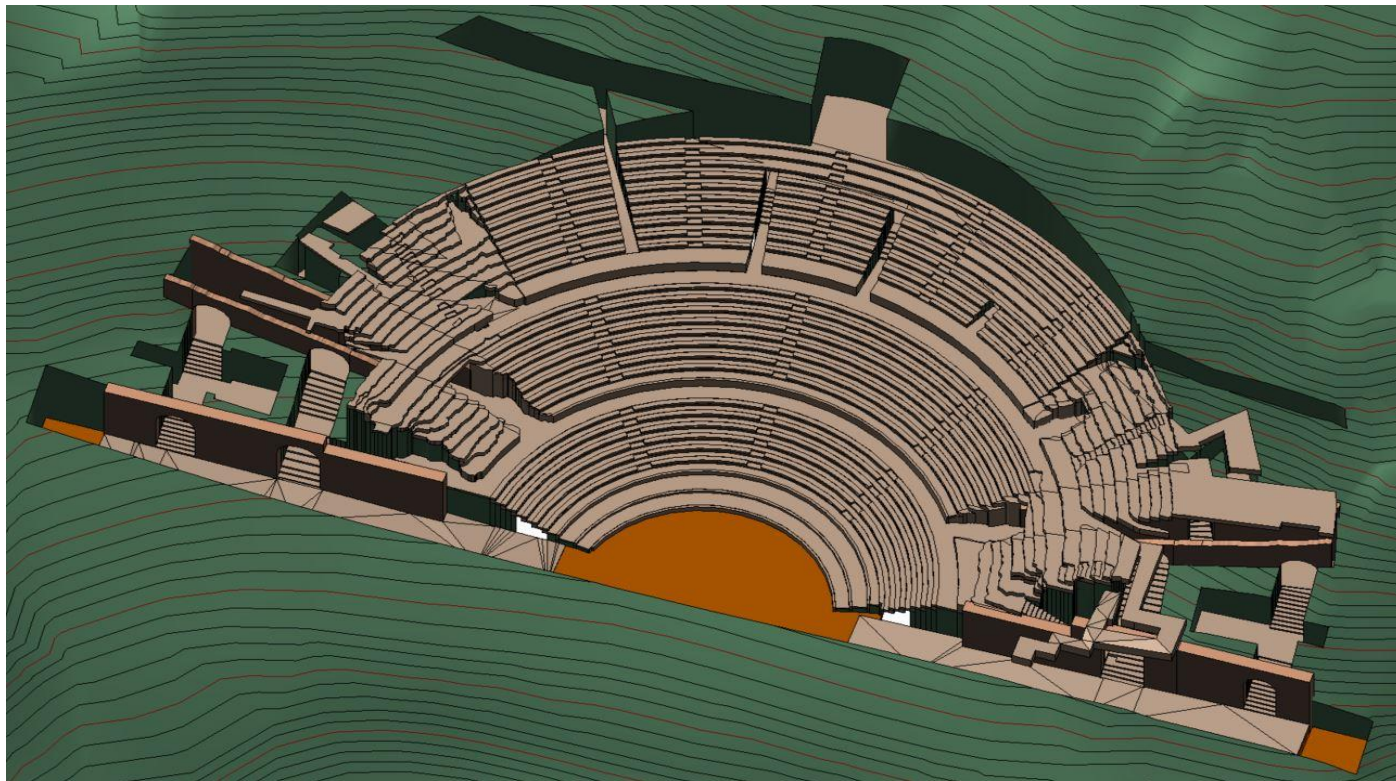


Figura 60

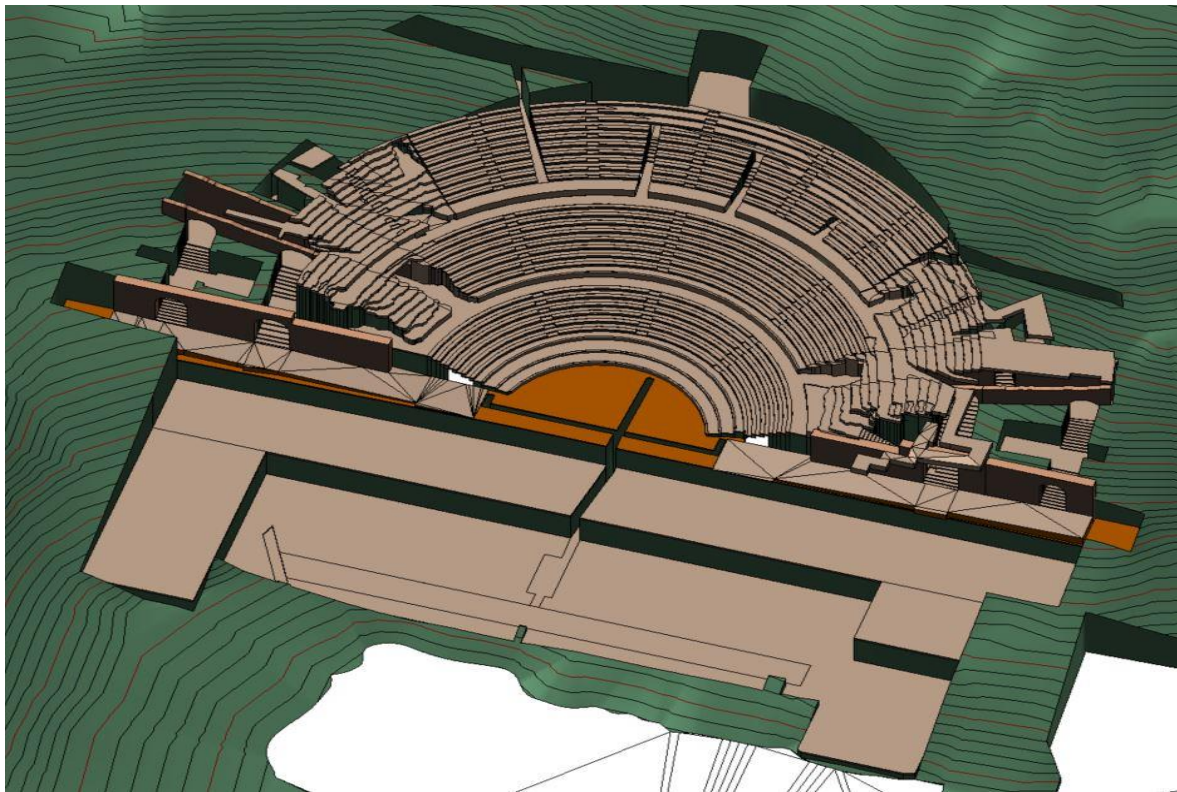


Figura 61

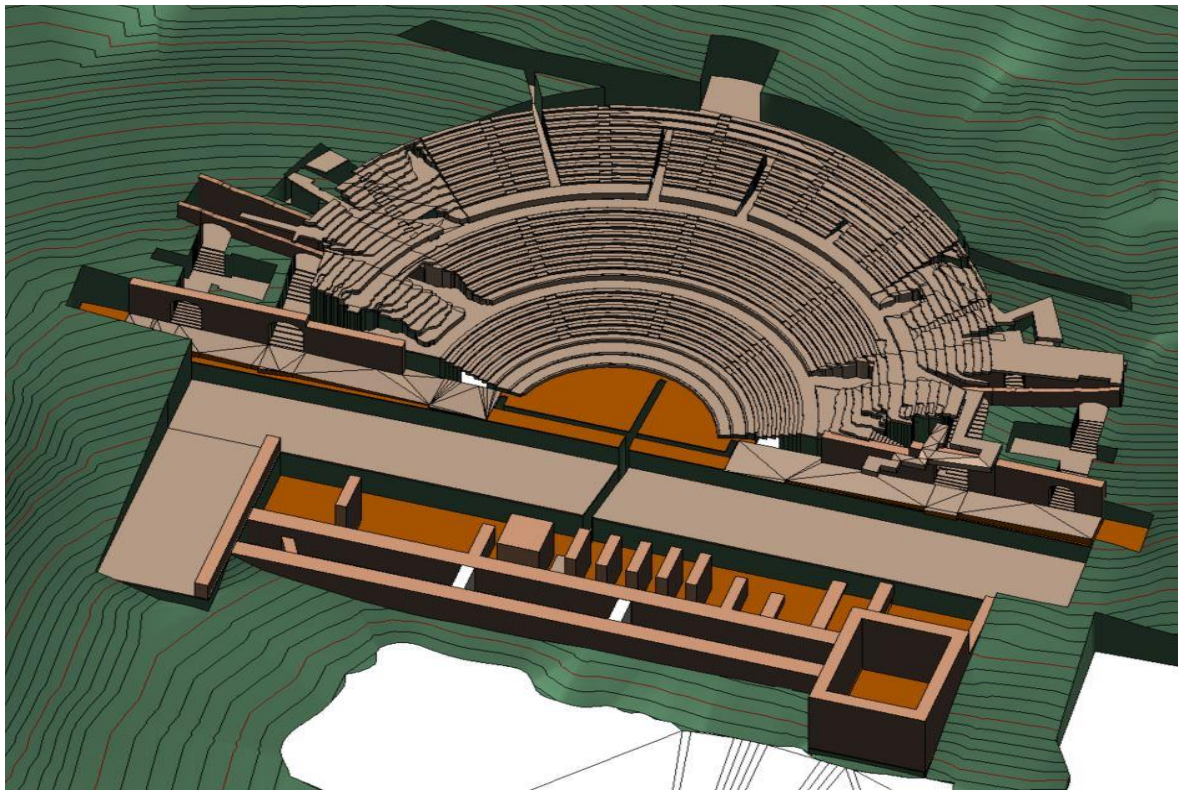


Figura 62

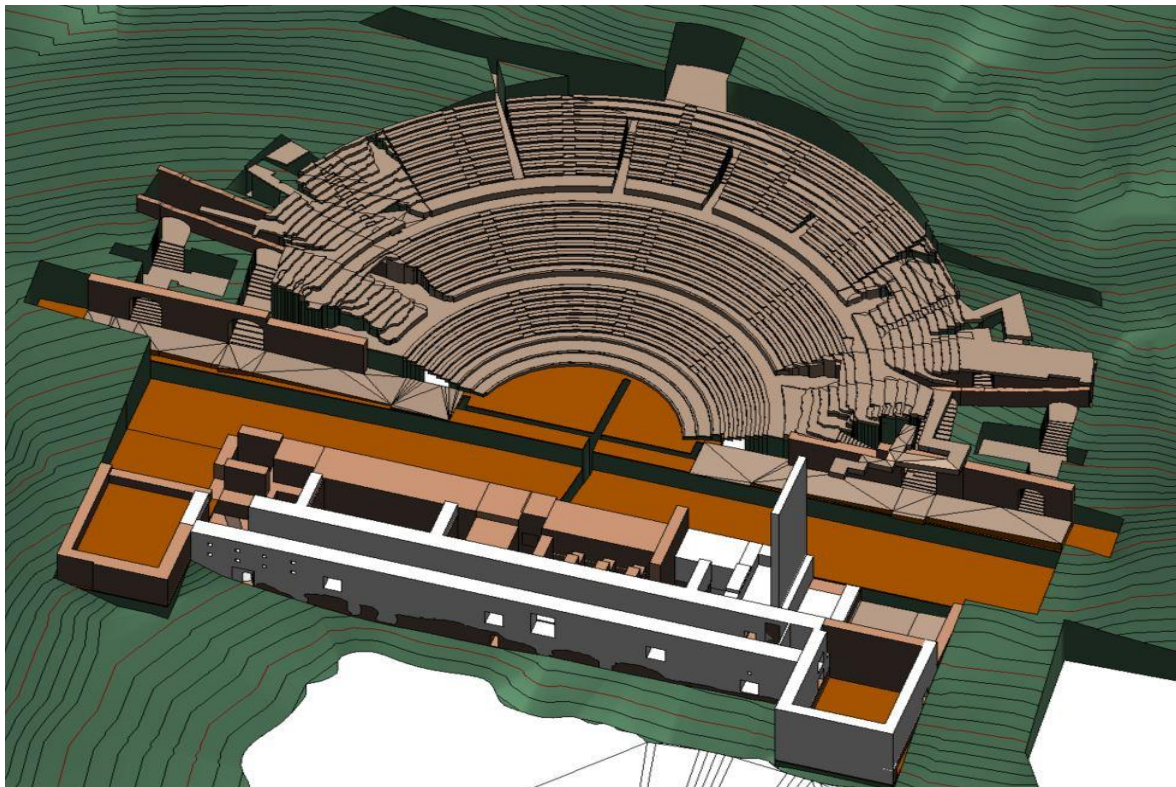


Figura 63

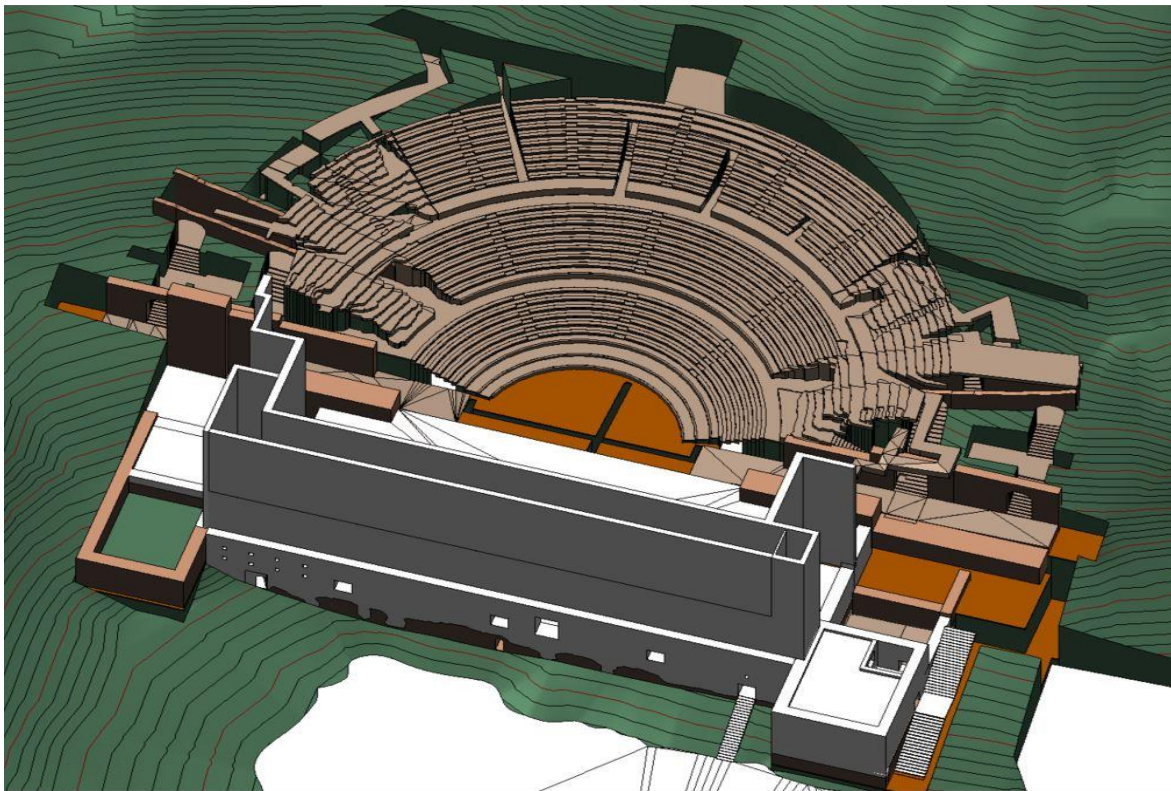


Figura 64

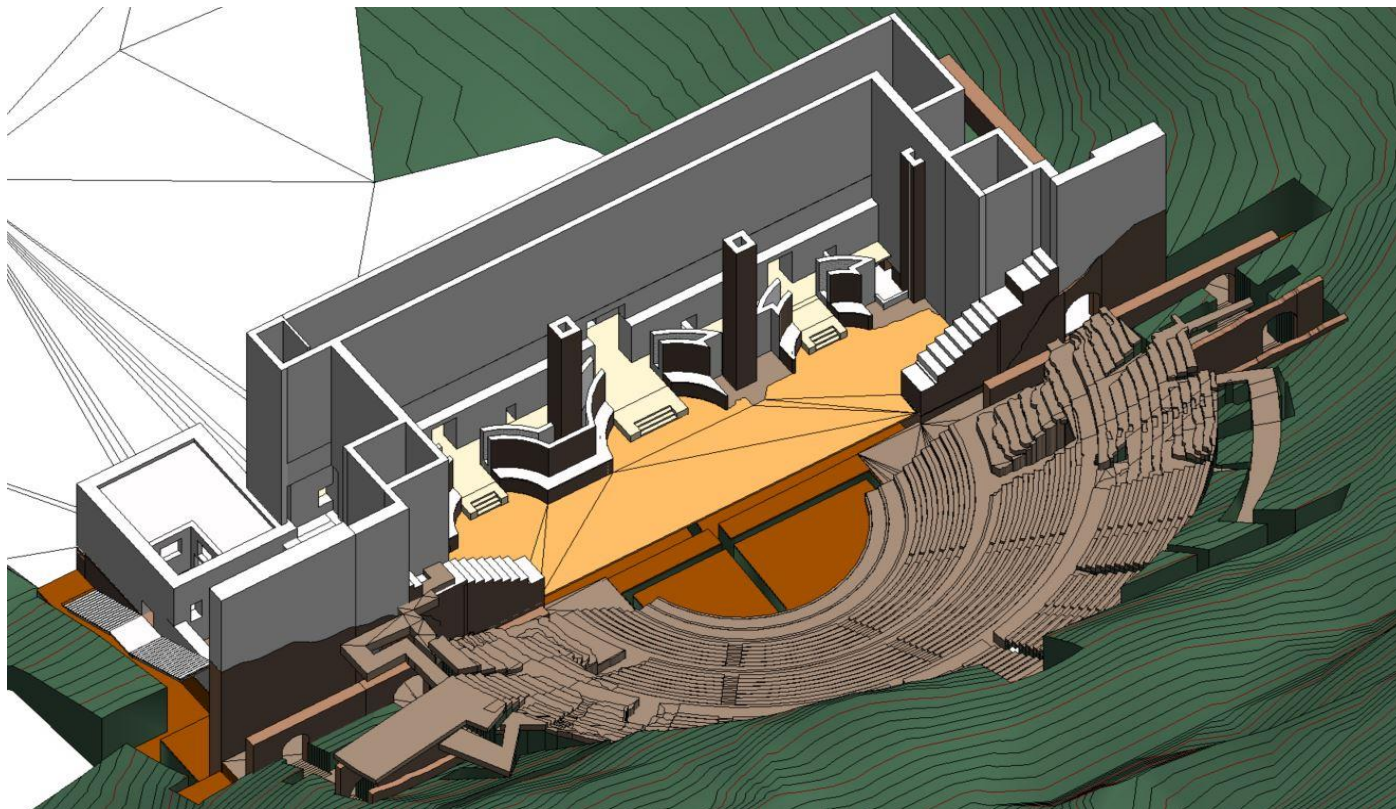


Figura 65

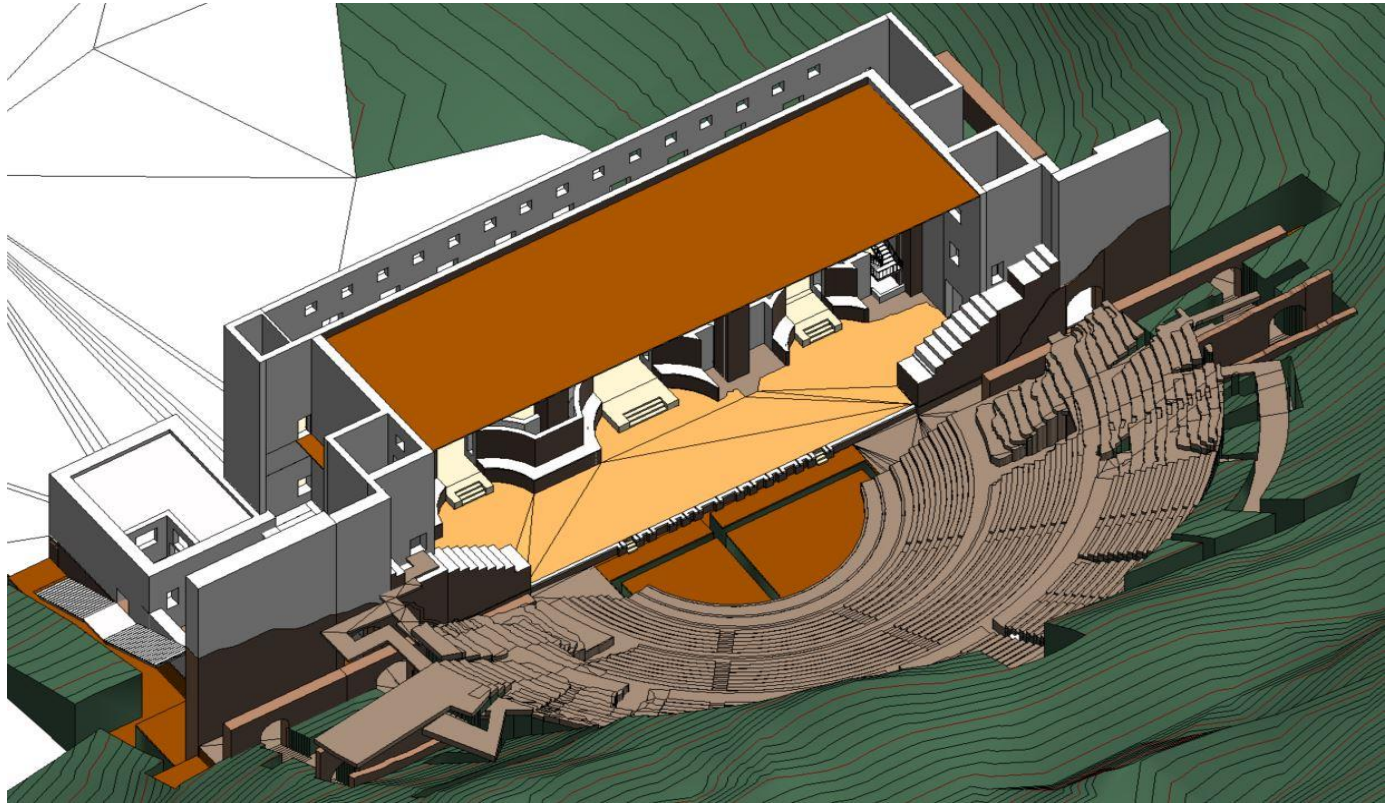


Figura 66

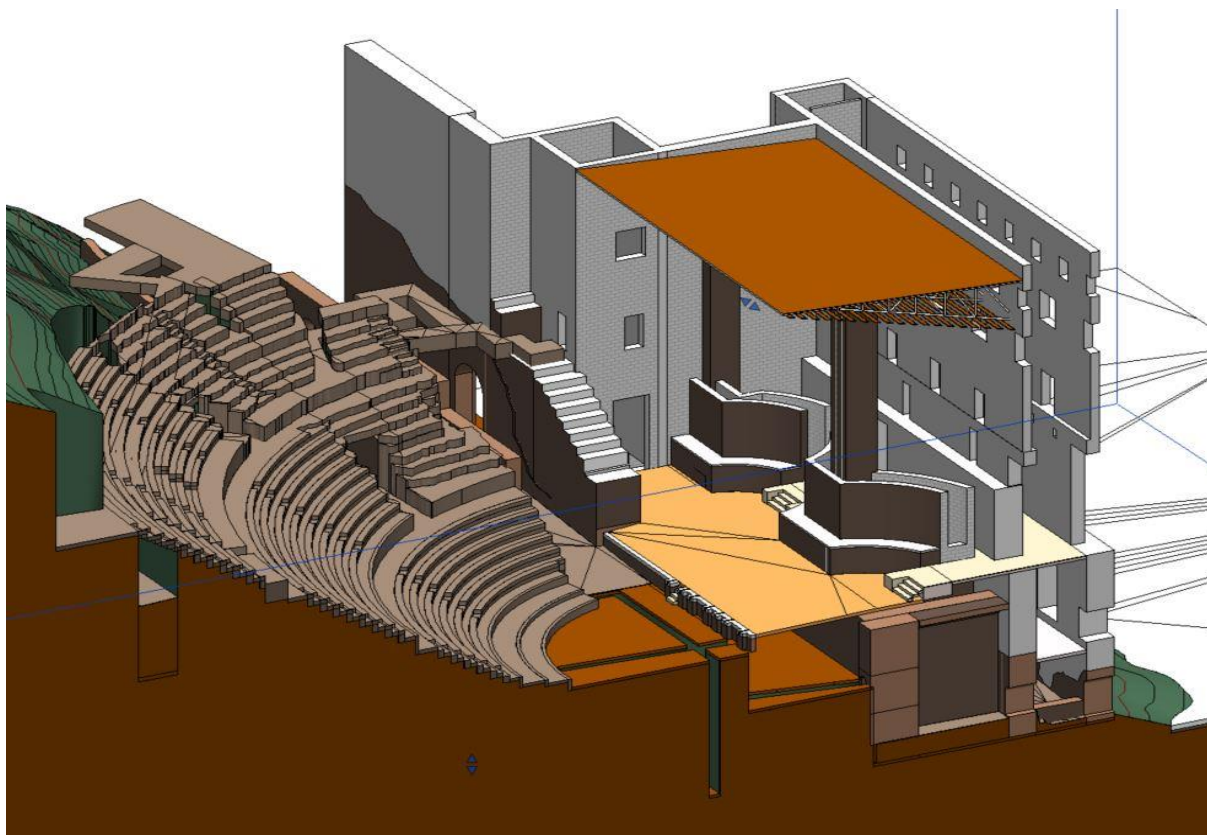


Figura 67

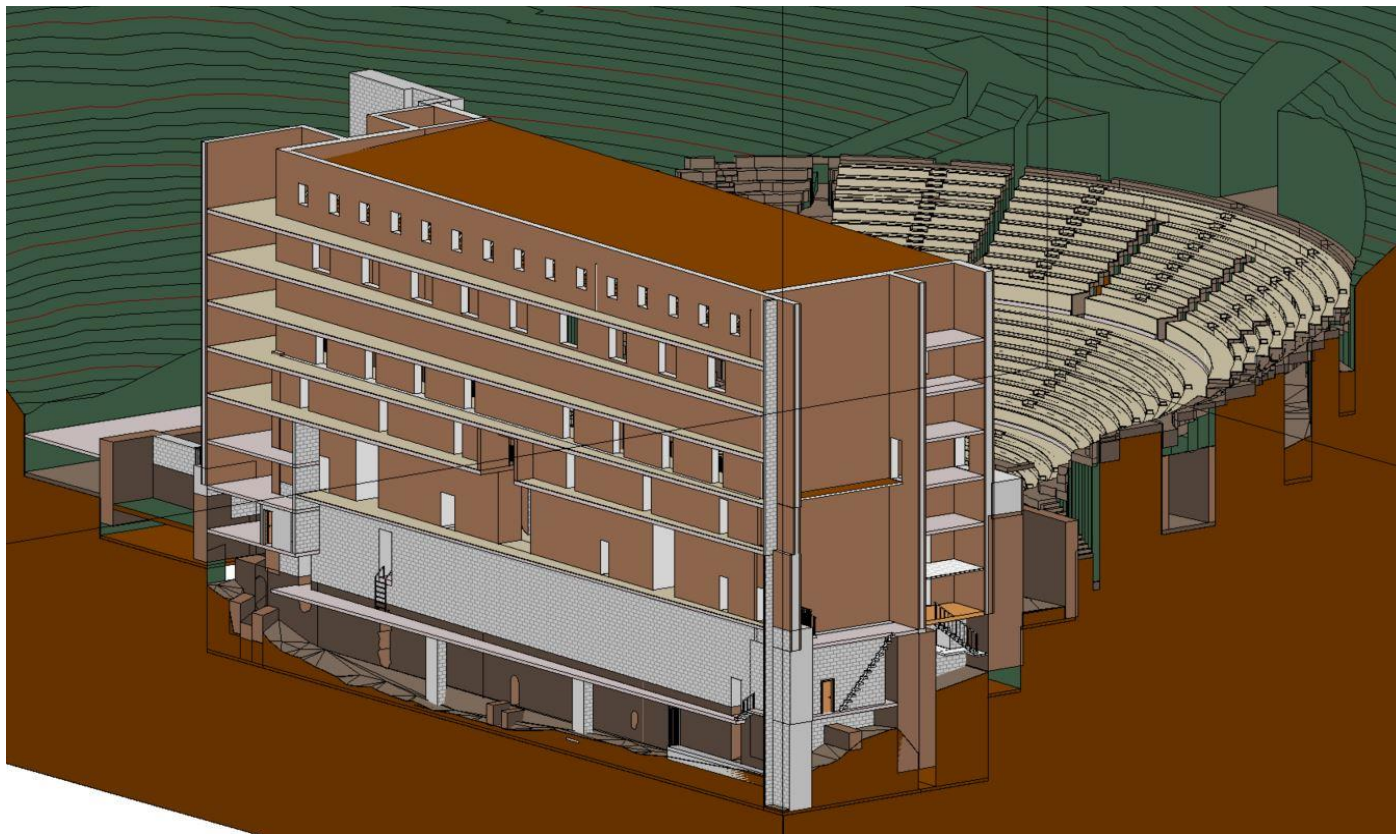


Figura 68

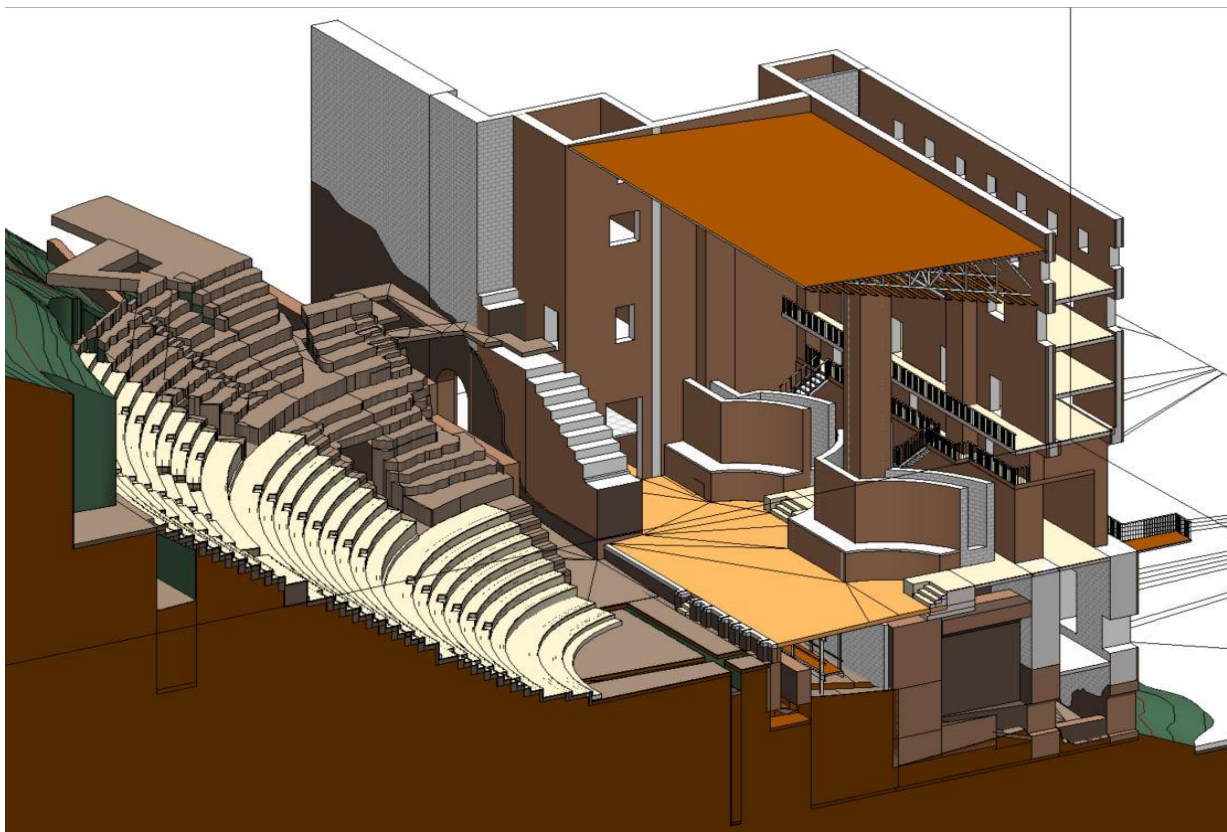


Figura 69

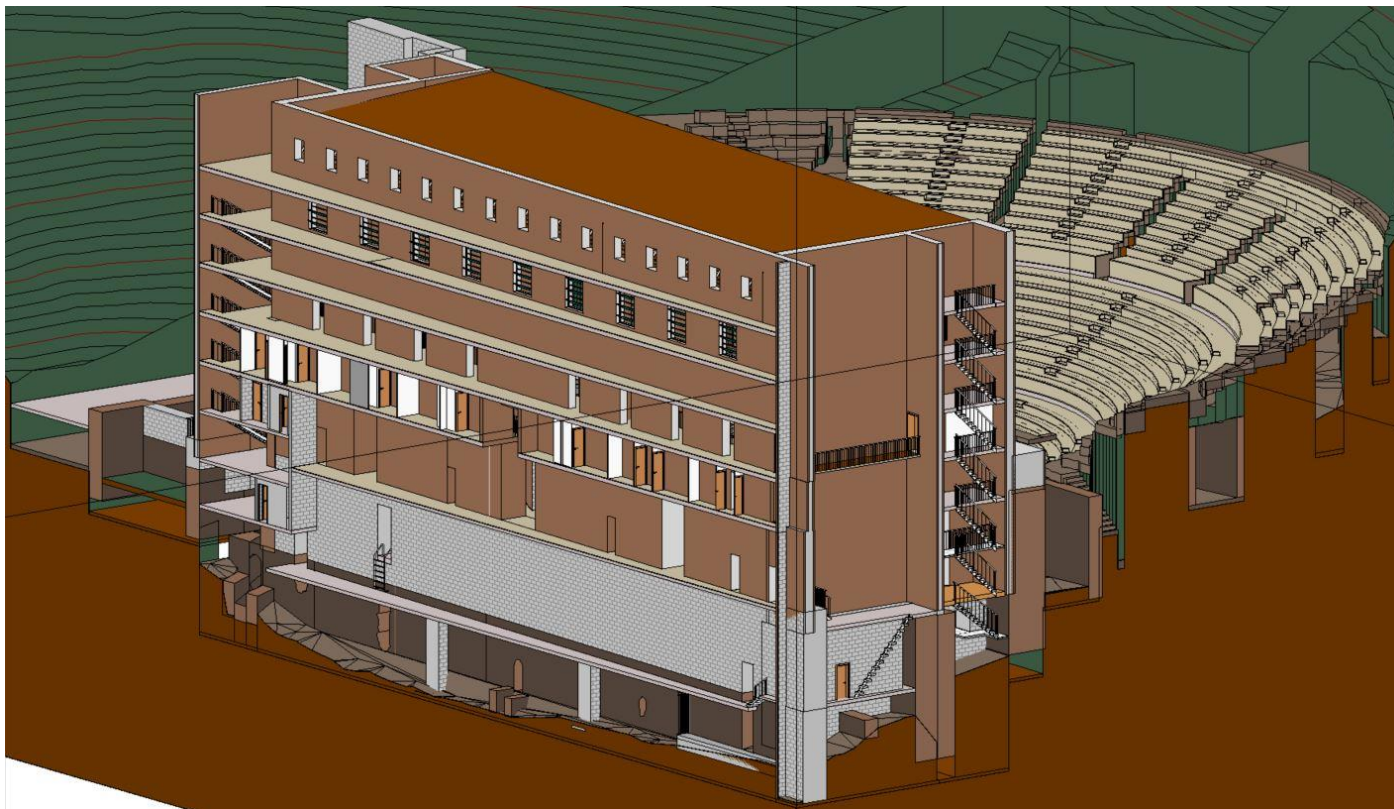


Figura 70

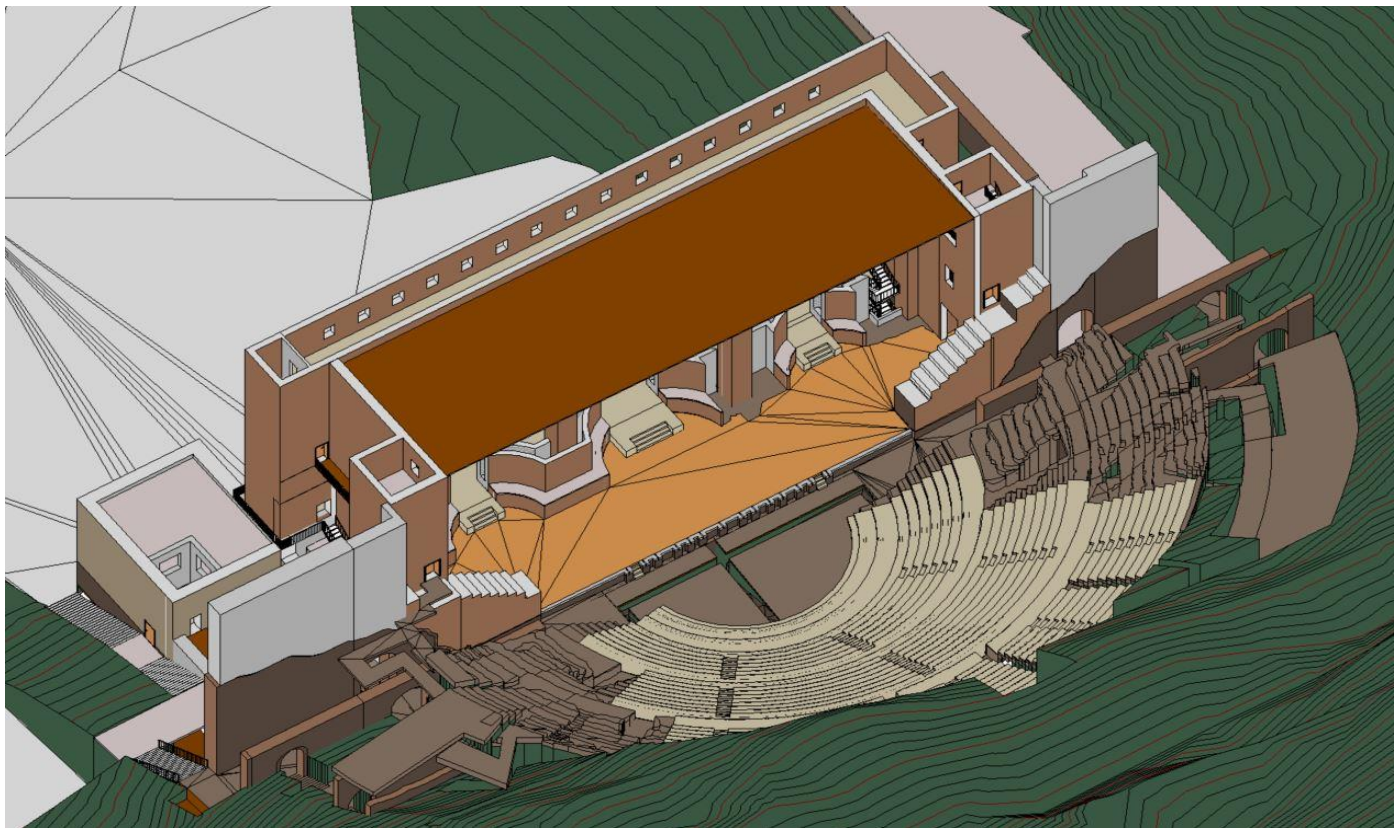


Figura 71

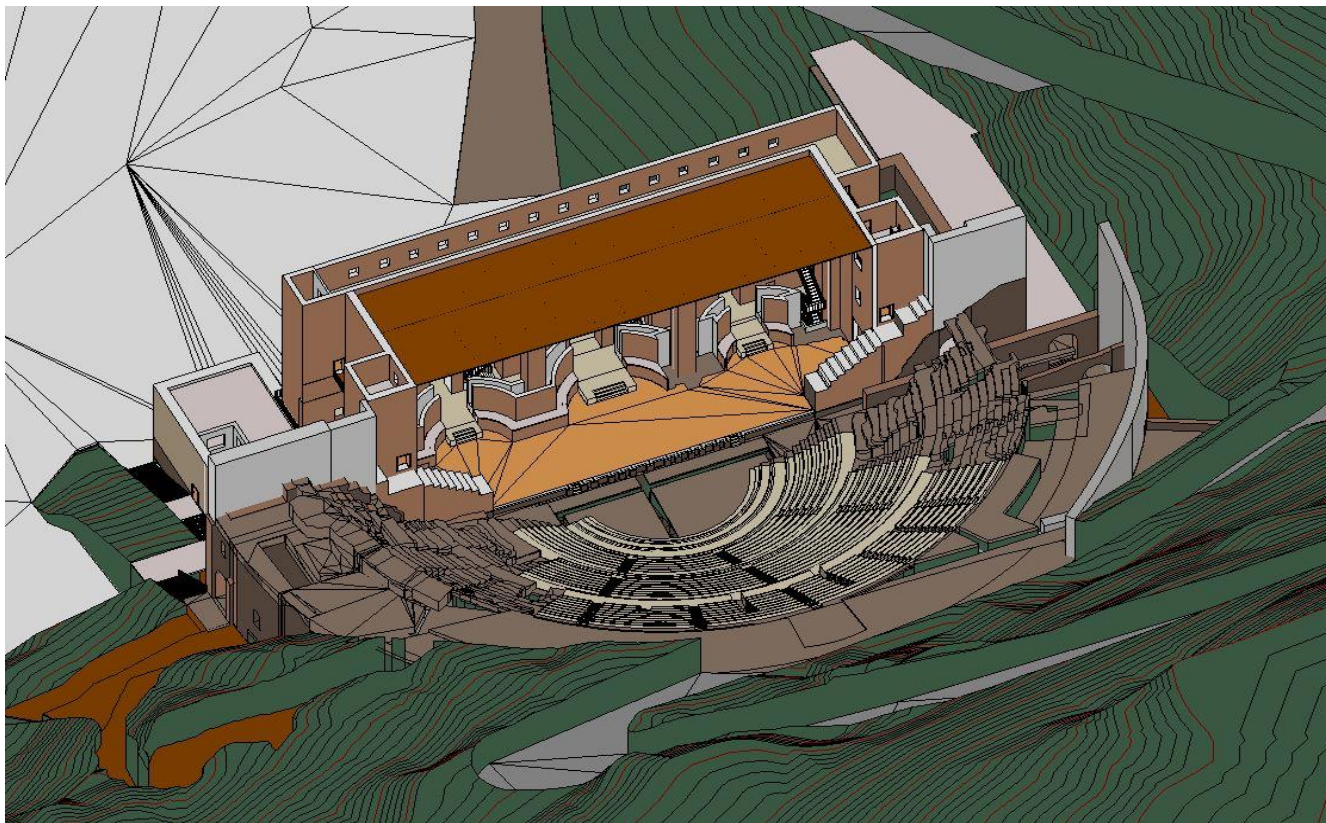


Figura 72

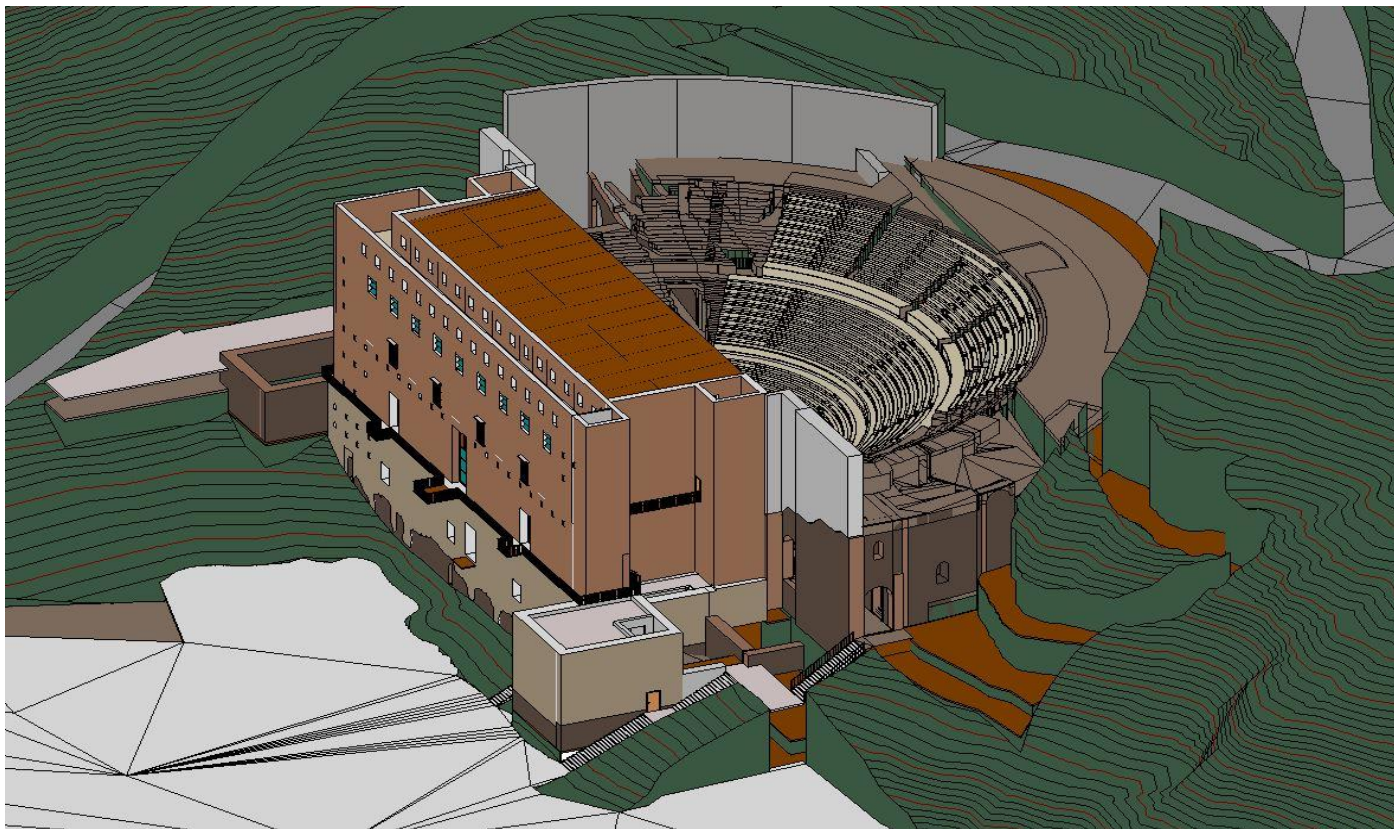


Figura 73

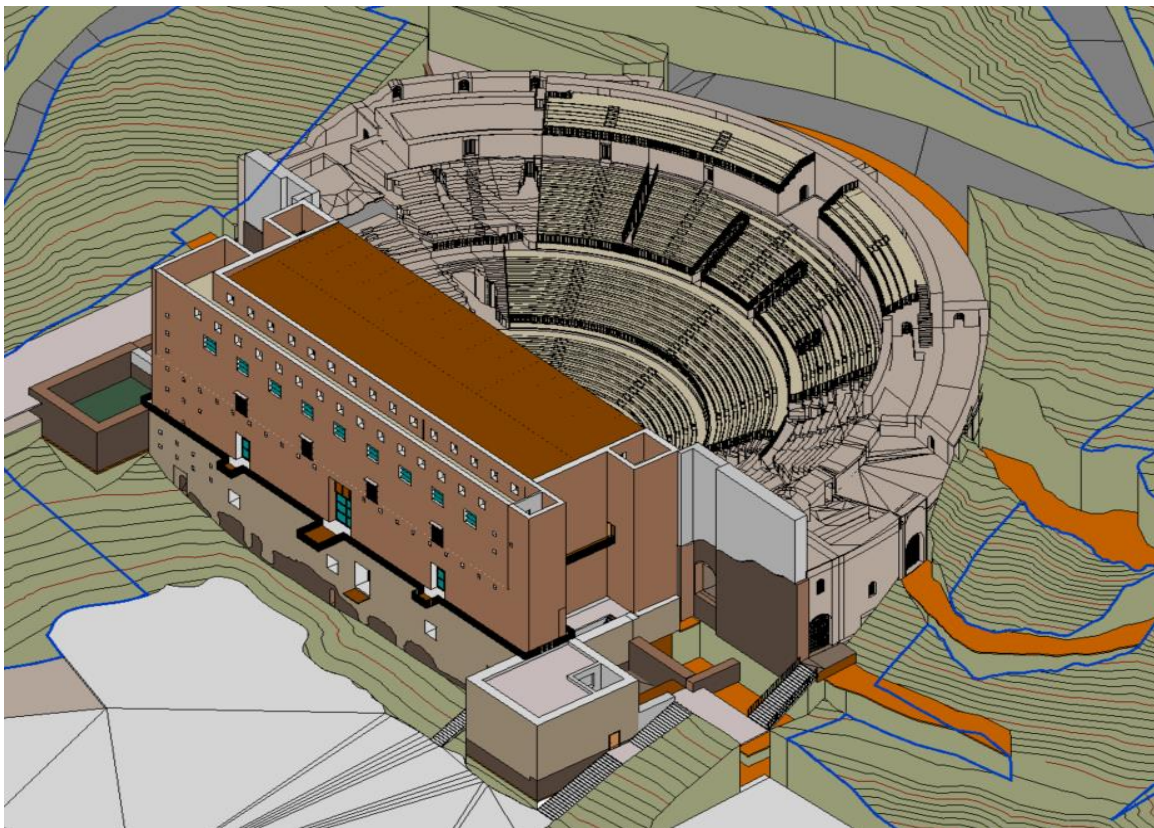


Figura 74

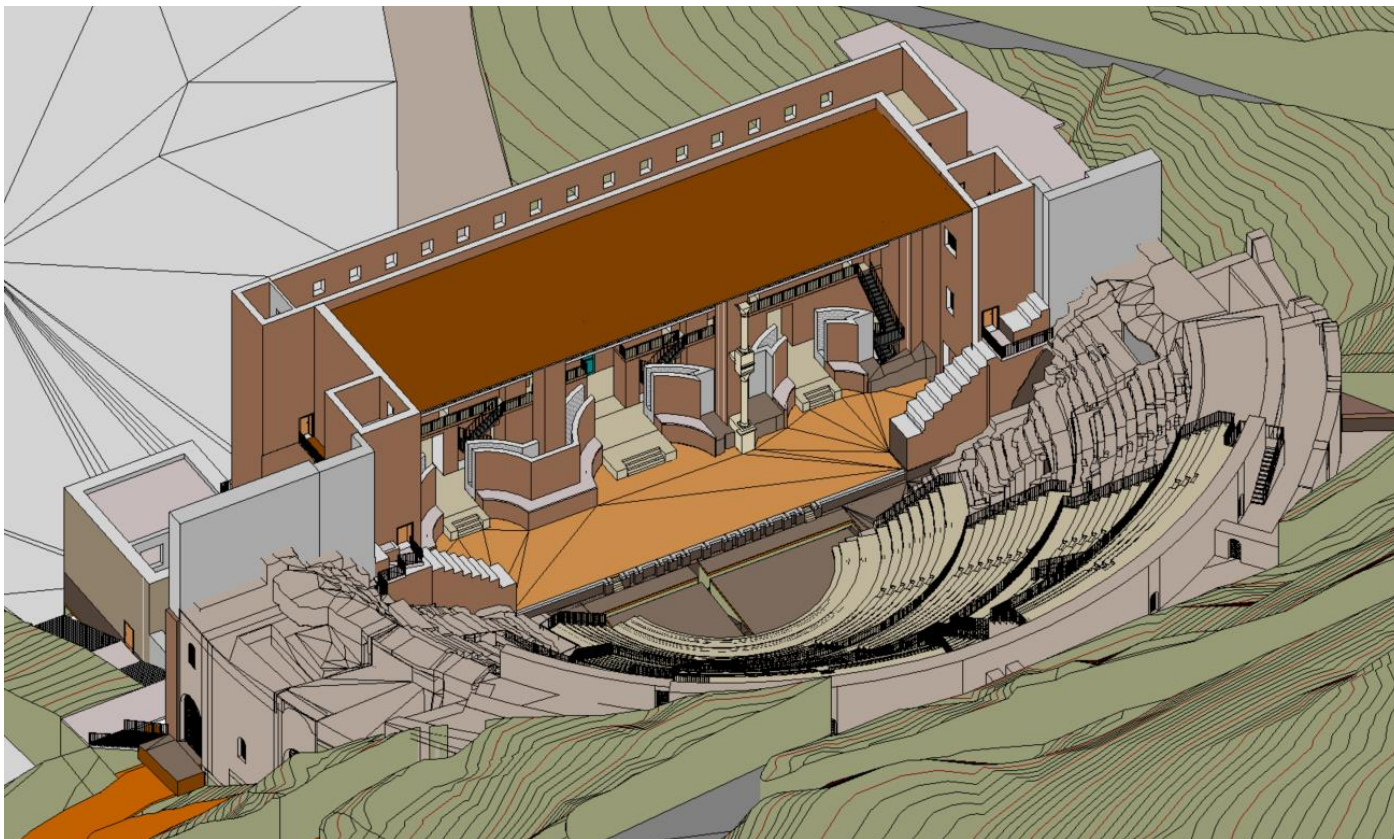


Figura 75

5.3.2 IMÁGENES COMPARATIVAS

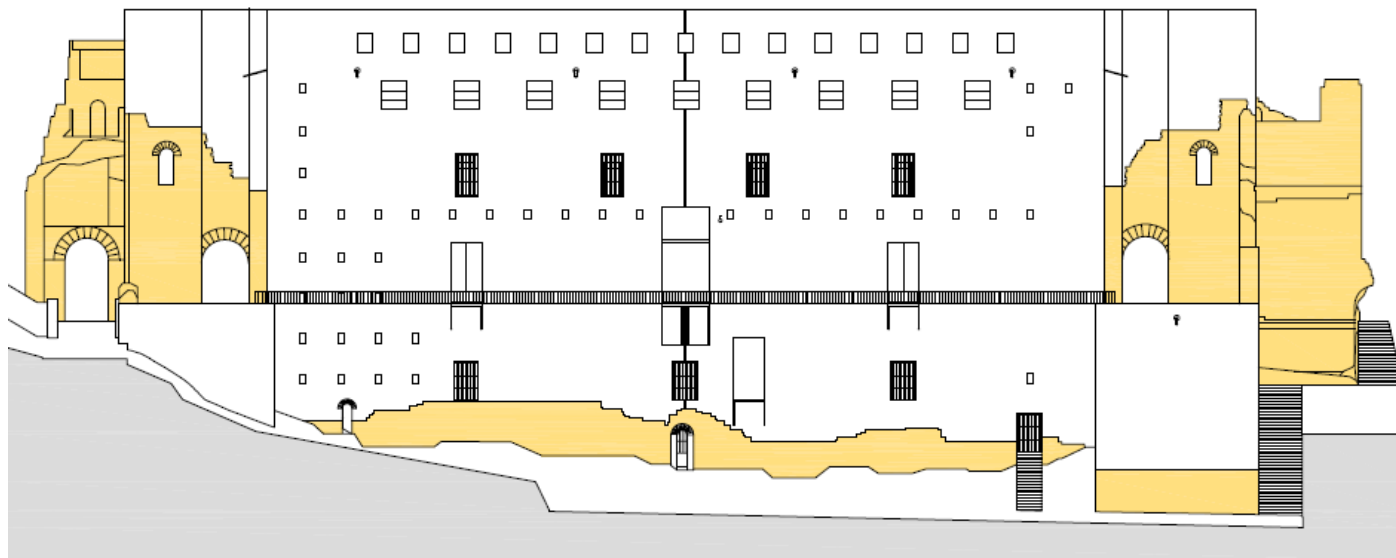


Figura 76: Alzado norte de la escena. Plano de la intervención.

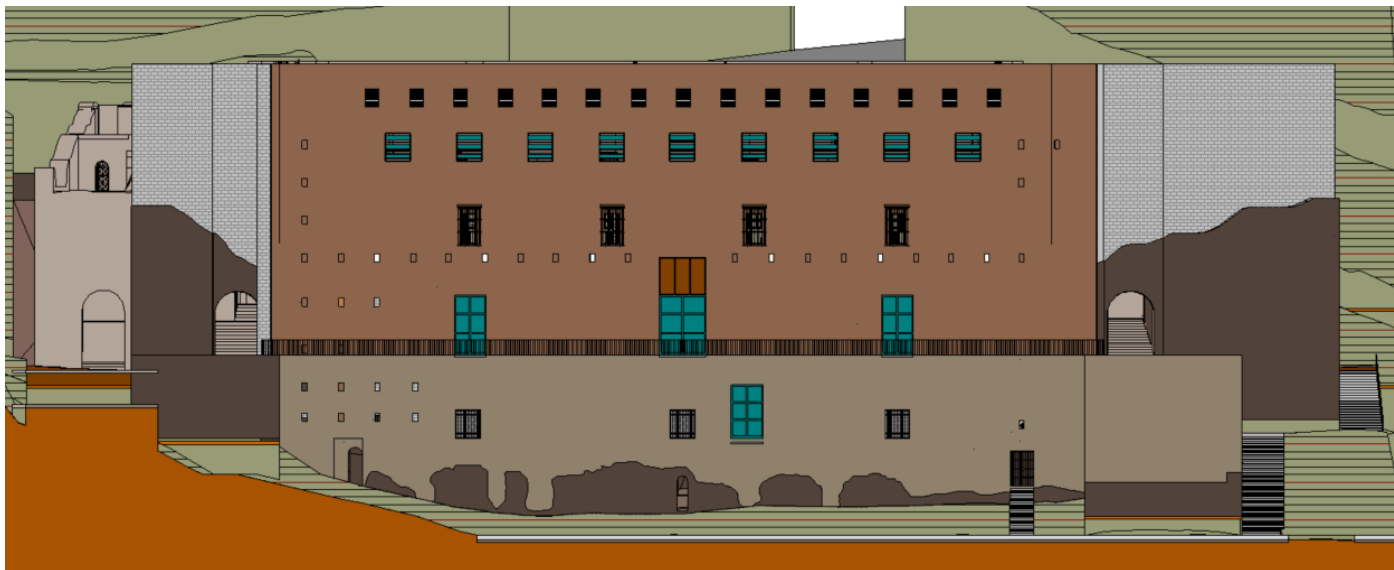


Figura 77: Alzado norte tomada del modelo 3D de Revit.



Figura 78: Sección transversal de la escena. Plano de intervención

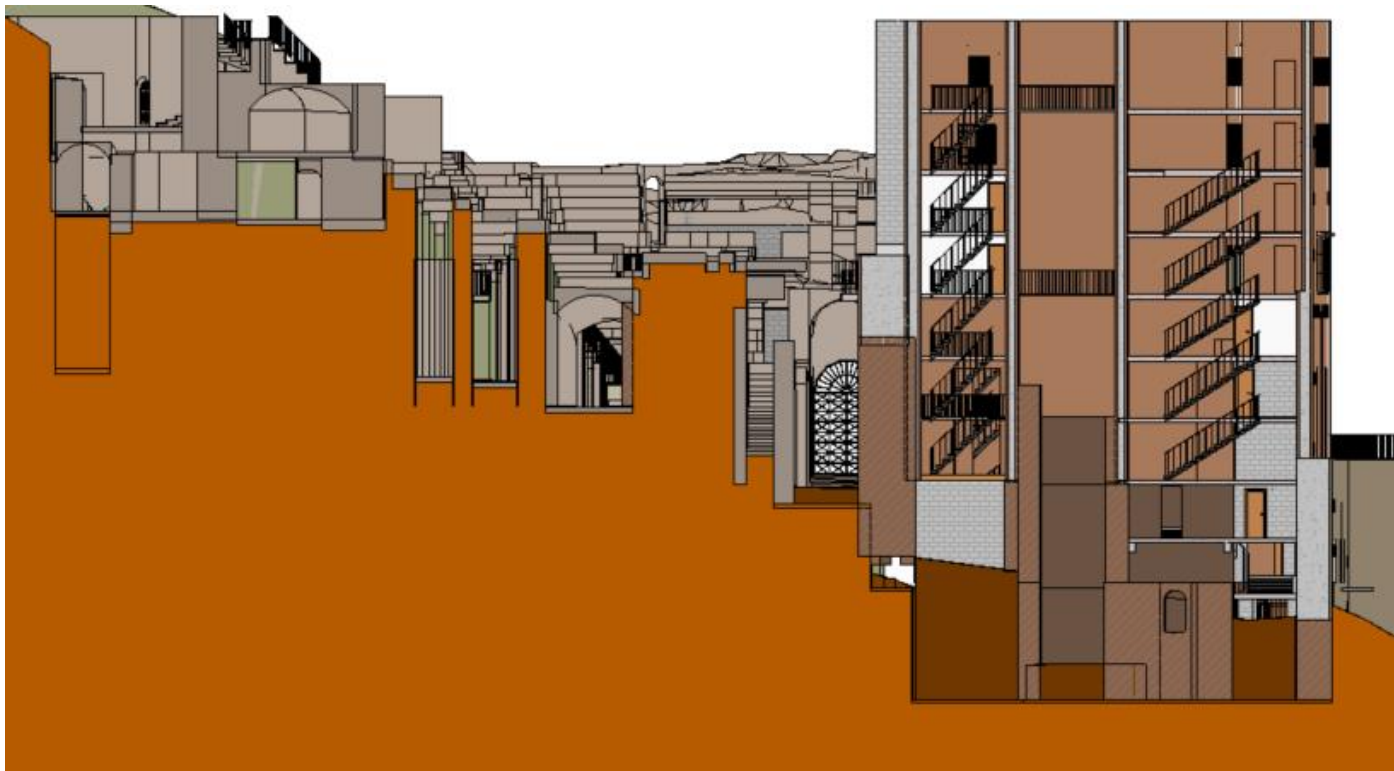


Figura 79: Sección transversal tomada del modelo 3D de Revit.

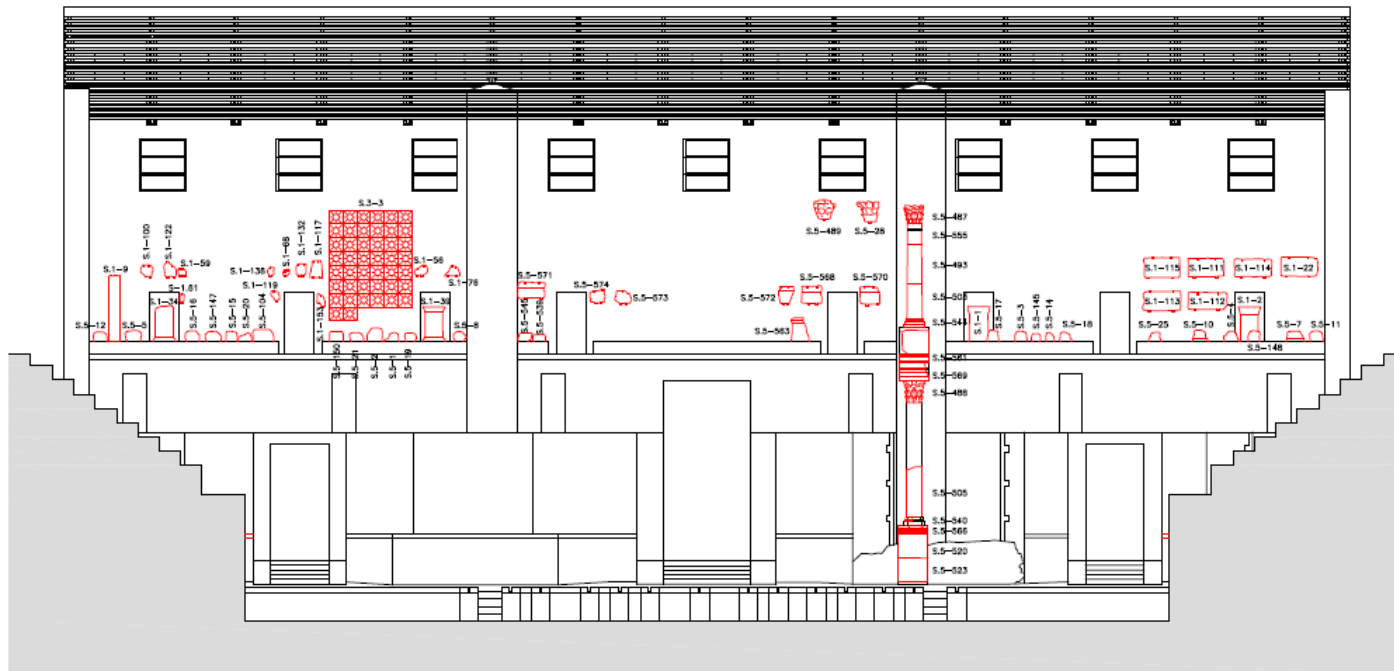


Figura 80: Alzado sur de la escena. Plano de intervención con anticuario.



Figura 81: Alzado sur de la escena con anticuario tomada del modelo 3D de Revit.



Figura 82: Fotografía tomada en el lugar.

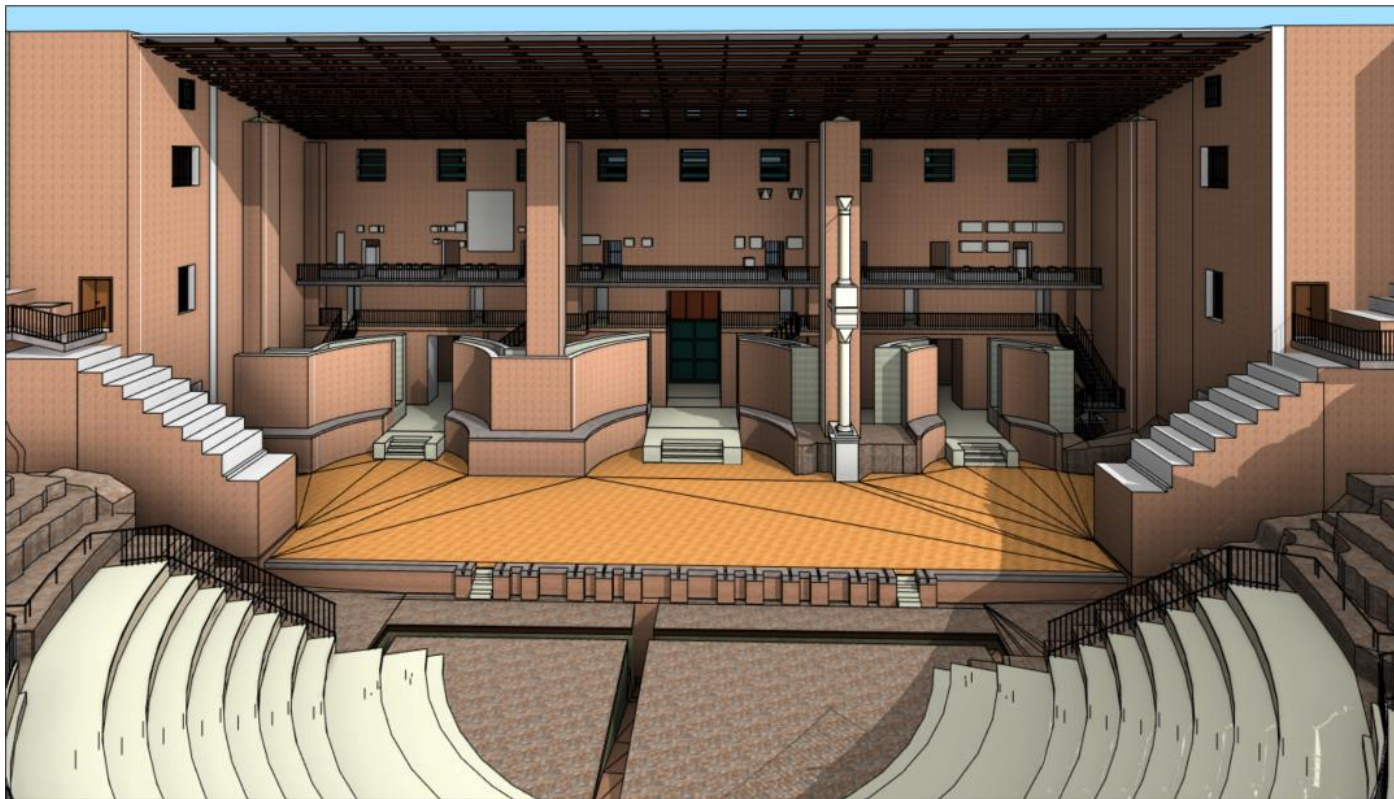


Figura 83: Vista tomada del modelo 3D de Revit.



Figura 84: Fotografía tomada en el lugar.

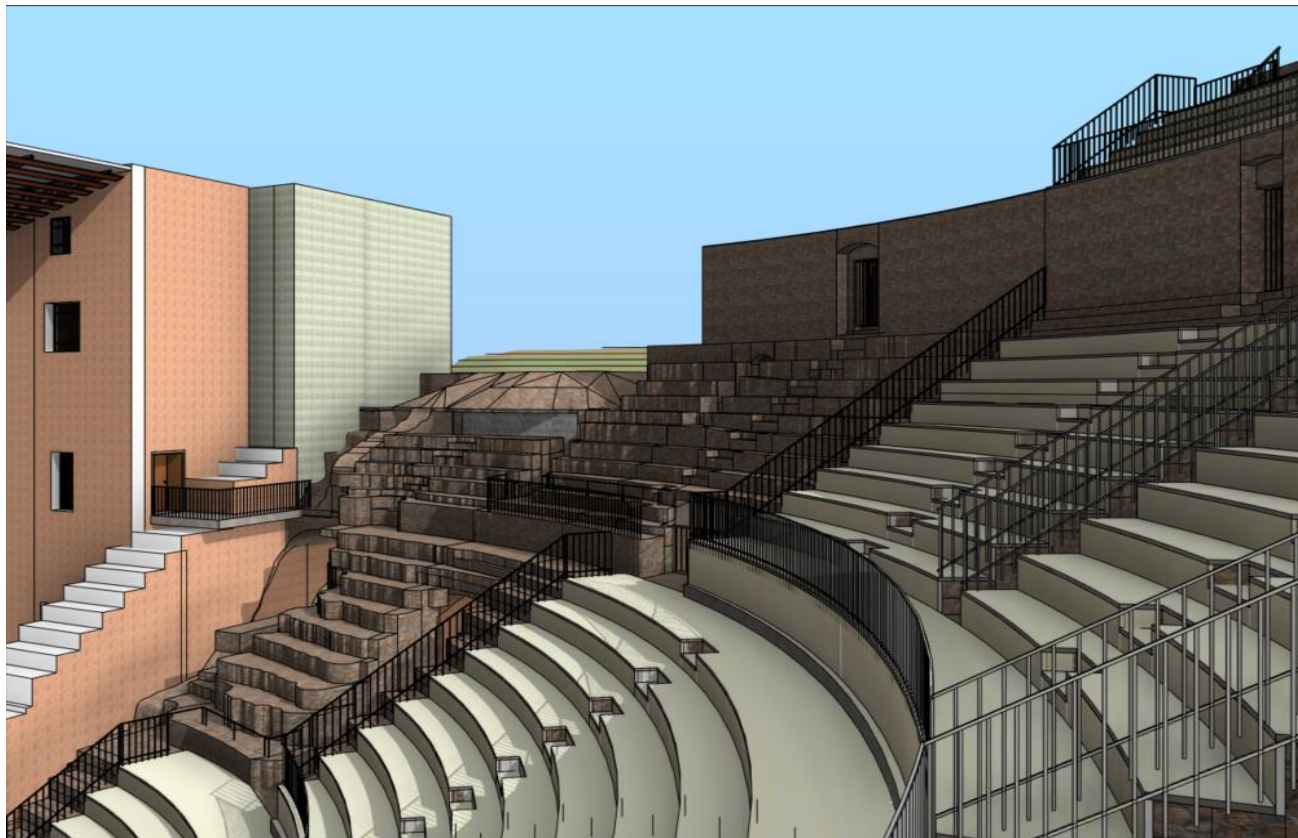


Figura 85: Vista tomada del modelo 3D de Revit.



Figura 86: Fotografía tomada en el lugar.

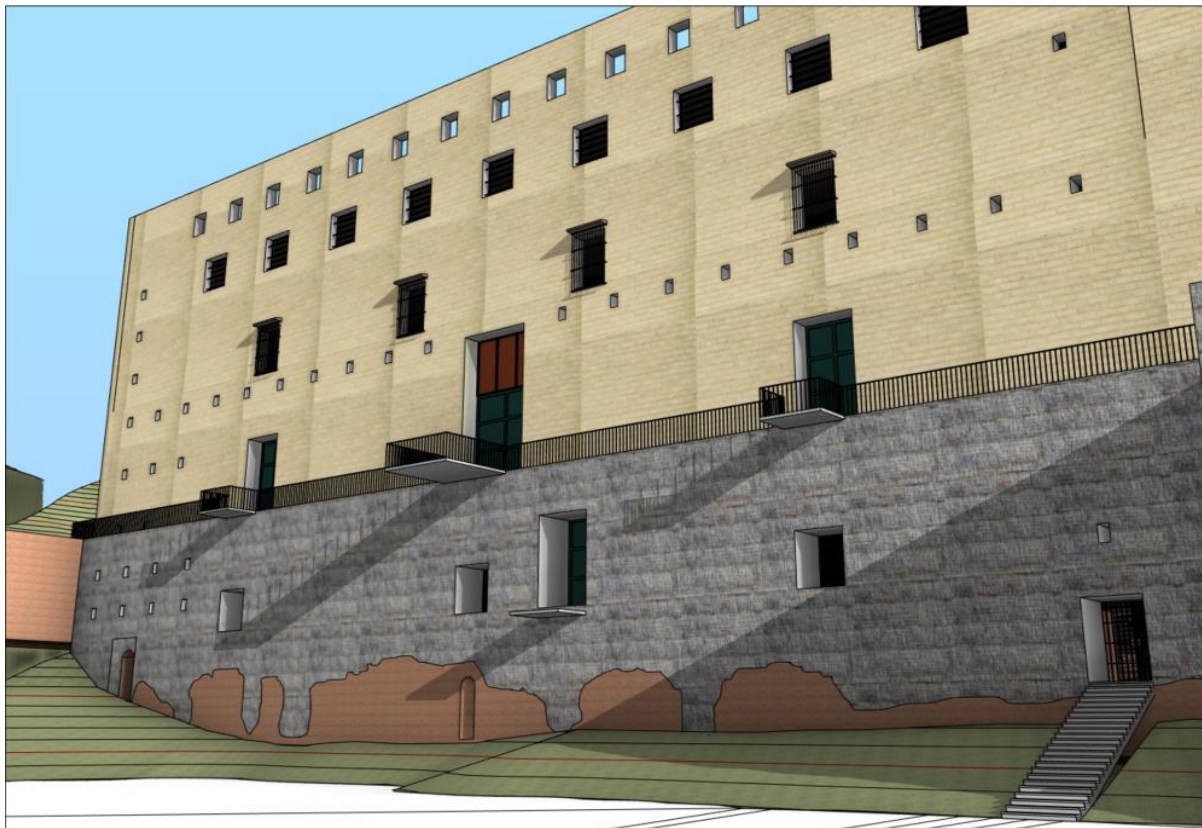


Figura 87: Vista tomada del modelo 3D de Revit.



Figura 88: Fotografía tomada en el lugar.

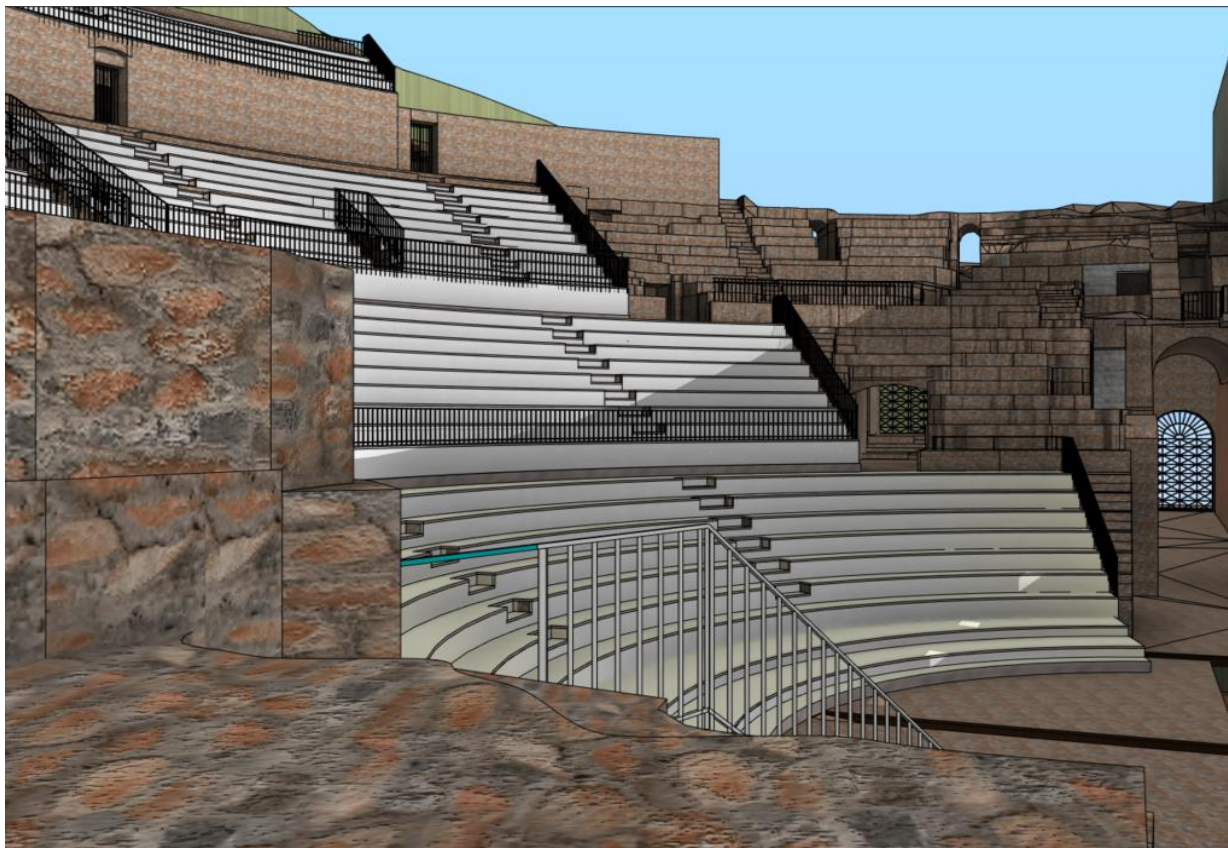
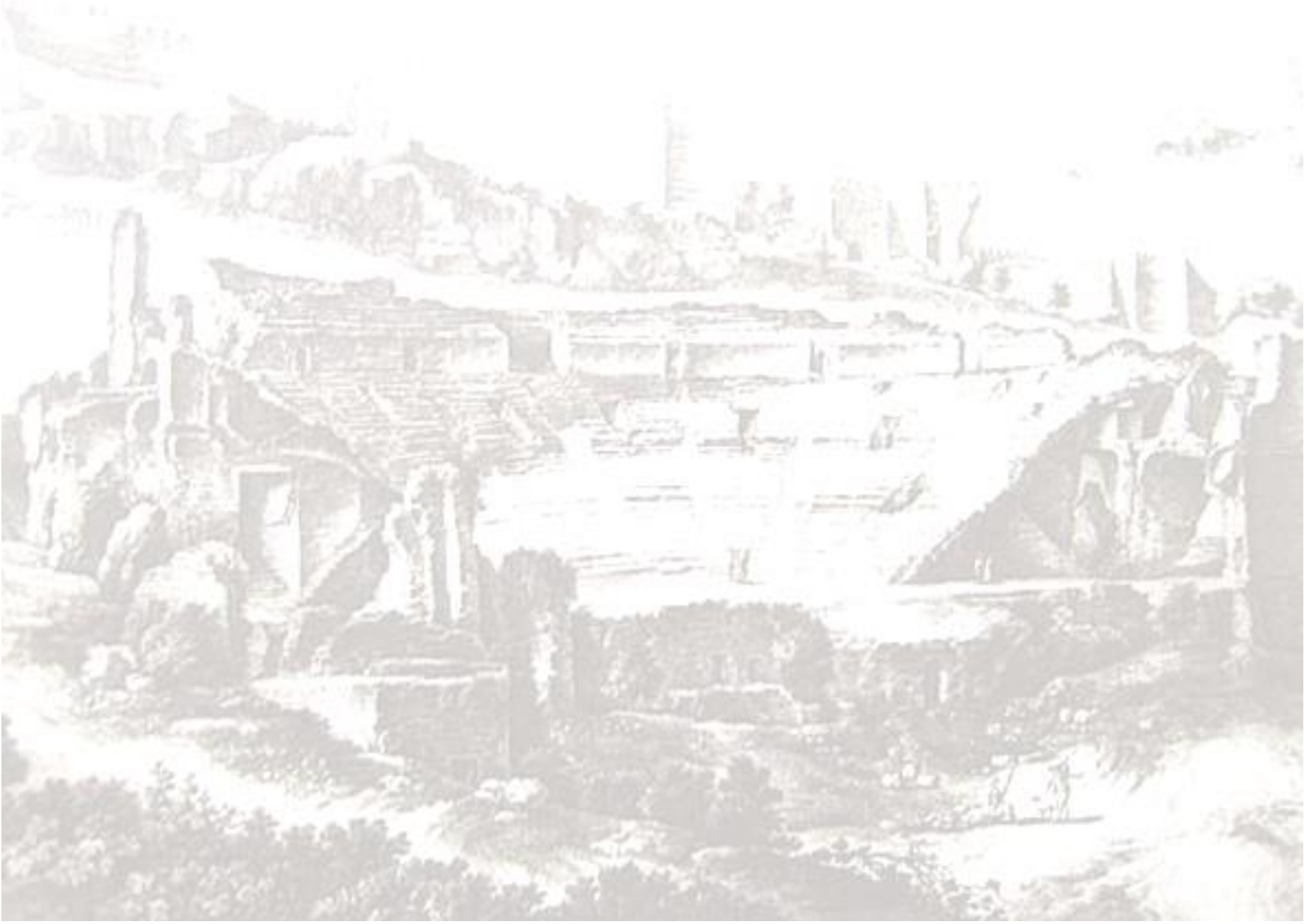


Figura 89: Vista tomada del modelo 3D de Revit.

6. CONCLUSIONES





Tras haber realizado este trabajo de investigación, tanto en su vertiente teórica como práctica, acerca del funcionamiento de la metodología BIM y H-BIM en el proceso de elaborar un proyecto de intervención en el patrimonio, se puede extraer una serie de conclusiones sobre este método emergente de trabajo en lo relativo a las mejoras que ofrece en el sector de la construcción y rehabilitación, además de las ventajas ofrecidas en la calidad y eficiencia de las intervenciones.

Es un hecho, que la introducción de la metodología BIM en los estudios de arquitectura e ingeniería, han mejorado el sistema de trabajo a la hora de gestionar proyectos en el que aparecen problemas de diseño, de coordinación y de previsión debido a una falta de comunicación.

La oportunidad de poder trabajar en un modelo único en el que continuamente se reúna información, ha resuelto los problemas de coordinación entre los distintos agentes que participan en el proceso proyecto-construcción. Si estos agentes cuentan en todo momento con la posibilidad de cargar y descargar datos de un modelo central actualizado, de tener disponibilidad del modelo cuando se requiera y de mantenerse comunicados, se reduce considerablemente los fallos de coordinación en los proyectos.

Además, la interoperabilidad entre distintos softwares BIM y externos, sumados a la visualización 3D que nos aportan estos modelos, han perfeccionado la metodología de trabajo y gestión de los proyectos actuales considerablemente, reduciendo los problemas de diseño y de previsibilidad.

Desde el punto de vista del patrimonio, la metodología actualmente conocida como H-BIM interesada en el patrimonio cultural se encuentra todavía en sus primeras fases de desarrollo. No obstante, es cierto que las herramientas externas para facilitar el trabajo de modelar un edificio histórico, como la fotogrametría 3D y la técnica de escaneado laser, están ayudando a fomentar esa naturaleza restauradora aplicando nuevas tecnologías informáticas en los nuevos proyectos de restauración y rehabilitación de edificios existentes, tanto actuales como históricos. Sí que es cierto que todavía encontramos dificultades en cuanto a la toma de datos global, pues dichas técnicas traen consigo el uso de herramientas y aparatos que todavía no poseen la capacidad de captar y reunir toda la información externa e interna que los edificios del patrimonio cultural poseen.

Por otro lado, los métodos existentes de flujo de trabajo automático y semi-automático a la hora de generar archivos que permitan obtener una primera imagen, así como un registro de datos instantáneo del edificio a analizar, están desempeñando un papel fundamental en la elaboración de bibliotecas H-BIM con las que poder construir un modelo virtual. Sin embargo, el esfuerzo y el tiempo empleados en los métodos de trabajo son todavía elevados puesto que en la actualidad no contamos con un software, plug-in o aplicación capaz de solventar los problemas que se producen en el proceso "Scan-to-BIM".

Un ejemplo de ello, tomado desde la propia experiencia, es que para lograr un modelo final obtenido mediante la técnica de escaneo laser, se requieren tres procesos: un primer proceso de trabajo de campo, donde captar la información espacial y volumétrica del edificio histórico a documentar. En el mejor de los casos, el objeto a escanear tendrá un volumen reducido, siendo escaso el número de estacionamientos necesarios para captar el objeto en su totalidad,

generando pocos archivos de nubes de puntos y con un coste del tiempo empleado para la toma de datos bajo. No obstante, si el edificio posee una escala monumental, el número de estacionamientos es considerablemente importante, además de que el tiempo empleado para los estacionamientos puede llegar a durar días. Estos valores varían en función del aparato empleado, del conocimiento del técnico y por supuesto de la accesibilidad que posea el edificio.

El segundo proceso se centra ya en el estudio de trabajo. En primer lugar, se requiere de una máquina lo suficientemente potente que sea capaz de mover toda la información obtenida mediante el escáner laser. Lo que nos lleva a un coste de equipos informáticos relativamente elevado si se quiere optimizar el tiempo de trabajo a partir de esta metodología. En segundo lugar, dependiendo del método de trabajo de los softwares empleados (automático o semi-automático) y del número de estacionamientos requeridos, llevará más o menos tiempo y esfuerzo el proceso de segmentación, depuración y filtrado de la nube de puntos. Si se trata de un proceso automático, el software se encargará de generar él solo, el archivo de la nube de puntos, necesitando una escasa ayuda del técnico competente. No obstante, si el proceso es semi-automático, se requiere de un técnico especializado que se encargue de gestionar, comparar, posicionar y depurar los distintos archivos de nubes de puntos que darán origen al archivo final con el que poder trabajar.

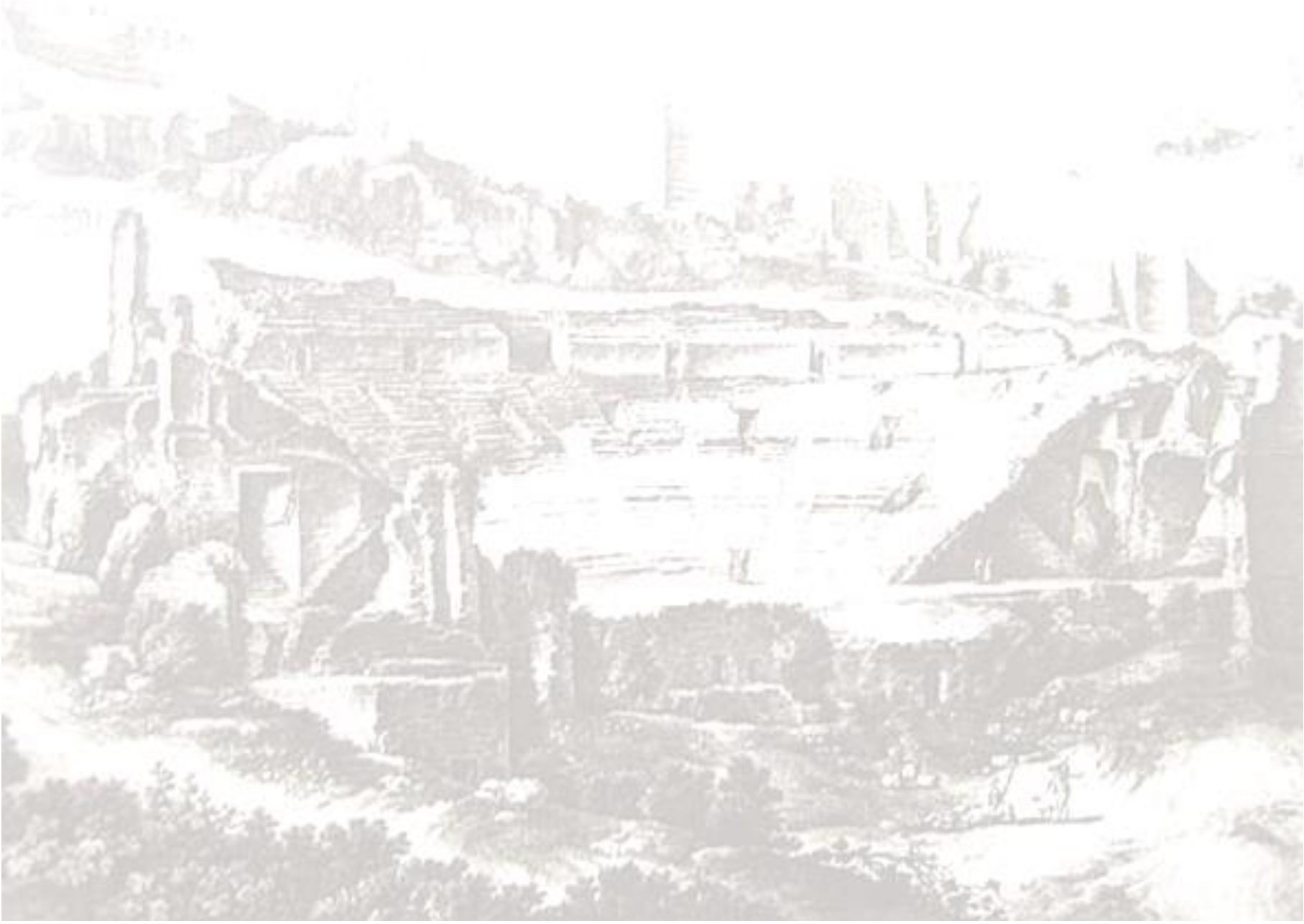
El tercer y último proceso, una vez generado el archivo final con la nube de puntos completa, se centrará en la elaboración del modelo. Como ya se ha comentado en los distintos apartados de este trabajo, el proceso de modelado no suele ser fácil pues no se encuentran todavía bibliotecas 3D que se adecuen a las necesidades de cada modelo. No obstante, aun con la dificultad que presentan las geometrías complejas que conforman el volumen de un edificio

histórico, cuando se finaliza el proceso de modelado, las ventajas que se obtienen a partir de este son innumerables por lo que compensan el esfuerzo y tiempo empleados. El modelo final te permite obtener, generar y compartir, una información detallada y precisa del documento histórico.

Por último, cabe añadir que esta metodología H-BIM de trabajo, actualmente en evolución, permitirá el desarrollo de nuevas oportunidades para los profesionales del sector de la construcción. Puesto que el uso del BIM se encuentra muy extendido e implementado en los estudios de arquitectura e ingeniería, el empleo de esta tecnología se verá drásticamente favorecido en el campo de la restauración y rehabilitación de edificios del patrimonio cultural permitiendo que surjan nuevas figuras profesionales especializadas en proyectos de intervención y conservación de la memoria histórica.

7. BIBLIOGRAFÍA





Fuentes Giner, Begoña. 2014. "*Impacto de BIM en El Proceso Constructivo Español*". Primera Ed. Ed. Servicios y Comunicación LGV. Valencia: Cuadernos EUBIM.

BuildingSMART Spanish Chapter. 2012. "BuildingSMART Spanish Chapter".
<https://www.buildingsmart.es/> (Agosto 20, 2018)

Cerdán Castillo, Alberto. 2012a. "¿Qué Es El BIM?" *Noticias Caat* 136: 18-19

2012b. "El BIM (II): Lo Que No Es BIM". *Noticias Caat* 137: 12-14

José López, Facundo. 2018. "*A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)*". DISA, Universidad de Valladolid, Valladolid (España).

Hernández Hervás, Emilia. 1989. "El teatro romano de Sagunto". Valencia, Generalitat Valenciana. pp. 11-54.

Consulta web (Agosto 20, 2018):

http://aleph.csic.es/imagenes/mad01/0010_CMTN/pdf/P_001359512_802634_V02TF_Parte_2_de_2.pdf.

Noguera Giménez, Juan Francisco. 2012. "*Teatros romanos de Hispania: introducción a su estado de conservación y criterios de restauración*". Arche, Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV, 6 y 7, 2011 y 2012, pp. 383-390.

Consulta web (Agosto 20, 2018): <http://www.ceice.gva.es/web/patrimonio-cultural-y-museos>.

Colegio Oficial Arquitectos de Madrid (COAM). 2008. *“El Teatro de Sagunto. Un recorrido por su historia y representación gráfica desde su origen hasta su reciente transformación”*. Consulta web (Agosto 20, 2018): <http://www.coam.org/es/fundacion/biblioteca/muestras-fondos-documentales/teatro-sagunto-recorrido-su-historia-y-representacion-grafica-su>.

Portaceli, Manuel. 1993. “Teatros romanos de Hispania”. Cuaderno de Arquitectura Romana, vol.2. pp. 43-45.

El País. 3 Ene 2008. “El Teatro Romano de Sagunto, condenado a ser ruina”. Consulta web (Agosto 20, 2018): https://elpais.com/diario/2008/01/03/cvalenciana/1199391477_850215.html.

8. REFERENCIA DE IMÁGENES





PORTADA: [HTTPS://WWW.LASPROVINCIAS.ES/MULTIMEDIA/FOTOS/8837.HTML](https://www.lasprovincias.es/multimedia/fotos/8837.html)

MARCA DE AGUA: [HTTPS://WWW.LASPROVINCIAS.ES/MULTIMEDIA/FOTOS/8837.HTML](https://www.lasprovincias.es/multimedia/fotos/8837.html)

FIGURA 1: [HTTP://BIBLUS.ACCASOFTWARE.COM/PTB/WP-CONTENT/UPLOADS/SITES/5/2017/03/GRAFICO_IFC-PT.JPG](http://bibilus.accasoft.com/ptb/wp-content/uploads/sites/5/2017/03/grafico_ifc-pt.jpg) 26

FIGURA 2: [HTTPS://LEONARDOMATA777.WORDPRESS.COM/2017/03/24/EL-ENTORNO-BIM-Y-SUS-IMPLICACIONES-EN-LA-ACTUALIZACION-ACADEMICA-Y-PROFESIONAL/](https://leonardomata777.wordpress.com/2017/03/24/el-entorno-bim-y-sus-implicaciones-en-la-actualizacion-academica-y-profesional/) 27

FIGURA 3: [HTTPS://WWW.NAZDI.CZ/2016/01/A360-COLLABORATION-FOR-REVIT-KONECNE.HTML](https://www.nazdi.cz/2016/01/a360-collaboration-for-revit-konecne.html) 29

FIGURA 4: [HTTP://WWW.ATINNE.COM/2011/06/23/IFC-BIDIRECCIONAL-CON-CYPE-2012-B/](http://www.atinne.com/2011/06/23/ifc-bidireccional-con-cype-2012-b/) 31

FIGURA 5: [HTTPS://BIMLEARNING.ES/MODELADO-BIM-REVIT-ARCHITECTURE/](https://bimlearning.es/modelado-bim-revit-architecture/) 32

FIGURA 6: [HTTP://PETROBIM.COM/](http://petrobim.com/) 37

FIGURA 7: [HTTP://DURAARK.EU/](http://duraark.eu/) Y [HTTP://WWW.CARTIF.COM/PROYECTOS-INTERNACIONALES/EUROPEOS/HORIZONTE2020/ITEM/876-INCEPTION.HTML](http://www.cartif.com/proyectos-internacionales/europeos/horizonte2020/item/876-inception.html) 40

FIGURA 8: [HTTPS://TOPOTECTURA.WORDPRESS.COM/2014/12/10/MI-COMIENZO-CON-LA-FOTOGAMETRIA/](https://topotectura.wordpress.com/2014/12/10/mi-comienzo-con-la-fotogrametria/) 42

FIGURA 9: [HTTP://WWW.TECNOLOGIABIM.ES/LASER-ESCANER-3D/](http://www.tecnologiabim.es/laser-escaner-3d/) 43

FIGURA 10: JOSÉ LÓPEZ, FACUNDO. 2018. "A REVIEW OF HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (H-BIM)" 44

FIGURA 11: [HTTPS://PUENTESDIGITALES.COM/2017/09/08/LA-INTELIGENCIA-ARTIFICIAL-IMPULSA-LA-NUEVA-REVOLUCION-EN-EL-DISENO-3D/](https://puentesdigitales.com/2017/09/08/la-inteligencia-artificial-impulsa-la-nueva-revolucion-en-el-diseno-3d/) Y [HTTPS://LASERS.LEICA-GEOSYSTEMS.COM/EU/ES/SOFTWARE/LEICA-CYCLONE-REGISTER](https://lasers.leica-geosystems.com/eu/es/software/leica-cyclone-register) 46

FIGURA 12: [HTTP://ESTUDIO-TOPOGRAFIA.ES/B-I-M-BUILDING-INFORMATION-MODELING-2-2/](http://estudio-topografia.es/b-i-m-building-information-modeling-2-2/) 52

FIGURA 13: [HTTPS://WWW.GRAPHISOFT.ES](https://www.graphisoft.es) Y [HTTPS://WWW.TEKLA.COM](https://www.tekla.com) 54

FIGURA 14: [HTTPS://WWW.BENTLEY.COM/ES](https://www.bentley.com/es) Y [HTTPS://WWW.AUTODESK.ES/PRODUCTS/REVIT/](https://www.autodesk.es/products/revit/) 55

FIGURA 15: HTTPS://WWW.TEKLA.COM ; HTTPS://WWW.AUTODESK.COM/PRODUCTS/NAVISWORKS/3D-VIEWERS Y HTTPS://WWW.SKETCHUP.COM/ES	56
FIGURA 16: HTTPS://WWW.ASIDEK.ES/ARQUITECTURA-E-INGENIERIA/ : HTTP://WEB.MIT.EDU/TITO_/WWW/PRODUCTS.HTML Y HTTP://WWW.SIMULACIONTERMICA.COM/8-ENERGY-PLUS/2-POR-QUE-SIMULAR-EDIFICIOS-POR-QUE-HACERLO-CON-ENERGY-PLUS	57
FIGURA 17 - 19: JOSÉ LÓPEZ, FACUNDO. 2018. "A REVIEW OF HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (H-BIM)	60 - 62
FIGURA 20: HTTPS://WWW.ABC.ES/VIAJAR/TOP/ABCI-16-TEATROS-ROMANOS-MAS-IMPRESIONANTES-ESPANA-201805030113_NOTICIA.HTML	68
FIGURA 21: HTTPS://ES.SLIDESHARE.NET/IESJAIME2/TEATRO-ROMANO-DE-SAGUNTO	71
FIGURA 22: HTTPS://ARQUITES.WORDPRESS.COM/2008/06/01/TEATRO-ROMANO-DE-SAGUNTO/	73
FIGURA 23: HERNÁNDEZ HERVÁS, EMILIA. 1989. "EL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO"	79
FIGURA 24: INFORMACIÓN FACILITADA POR EL TUTOR DEL TRABAJO FRANCISCO JUAN VIDAL	80
FIGURA 25 - 75: ELABORACIÓN PROPIA	82 - 145
FIGURA 76: INFORMACIÓN FACILITADA POR EL TUTOR DEL TRABAJO FRANCISCO JUAN VIDAL	148
FIGURA 77: ELABORACIÓN PROPIA	149
FIGURA 78: INFORMACIÓN FACILITADA POR EL TUTOR DEL TRABAJO FRANCISCO JUAN VIDAL	150
FIGURA 79: ELABORACIÓN PROPIA	151
FIGURA 80: INFORMACIÓN FACILITADA POR EL TUTOR DEL TRABAJO FRANCISCO JUAN VIDAL	152
FIGURA 81: ELABORACIÓN PROPIA	153
FIGURA 82 - 89: ELABORACIÓN PROPIA	154 - 161