



---

**Universidad de Valladolid**

## **FOTOGRAMETRÍA PARA LA REPRESENTACIÓN INTERACTIVA DE LA ARQUITECTURA**

CASAS CUEVA EN TRIGUEROS DEL VALLE



**ETSAVA**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**Autor:** David Senovilla Ramos

**Tutor:** David Marcos González

**Cotutor:** José Martínez Rubio



## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo relatar el proceso completo por el cual se ha desarrollado una visita virtual interactiva de las casas cueva de Trigueros del Valle y su entorno inmediato, aunando la precisión y calidad de un levantamiento fotogramétrico con el realismo e interacción que aporta el renderizado hiperrealista del motor de videojuegos Unreal Engine 5.

Para ello, se describe el proceso completo con sus aciertos y errores, problemas y soluciones, desde la toma de datos *in situ*, el procesado de estos datos y su levantamiento fotogramétrico, la optimización y texturizado de los modelos 3D resultantes y la creación con ellos de un escenario accesible mediante una visita virtual.

**Palabras clave:** *Fotogrametría, dron, escáner láser, archviz, render, Unreal Engine, patrimonio, cuevas*

## Abstract

The objective of this paper is to report the complete process by which an interactive virtual tour of the Trigueros del Valle cave houses and their immediate surroundings has been developed, combining the precision and quality of a photogrammetric survey with the realism and interaction provided by the Hyper-realistic rendering of the Unreal Engine 5 video game engine.

To this end, the complete process is described with its successes and errors, problems and solutions, from the data collection *in situ*, the processing of this data and its photogrammetric survey, the optimization and texturing of the resulting 3D models, and the creation of a stage accessible through a virtual tour using the former.

**Keywords:** *Photogrammetry, drone, laser scanner, archviz, render, Unreal Engine, heritage, cave*

# Índice

## 1. Introducción

1.1. Estado de la cuestión	9
1.2. Fotogrametría	10
1.2.1. ¿Qué es la fotogrametría?	10
1.2.2. Evolución histórica	11
1.2.3. Clasificación	12
1.3. Representación arquitectónica	13
1.4. Metodología	16
1.4.1. Instrumentación	16
1.4.2. Software	18
1.5. Objetivos	20

## 2. Práctica

2.1. Casas cueva en Trigueros del Valle	25
2.1.1. Localización. Trigueros del Valle	25
2.1.2. Contexto histórico	25
2.1.3. Estado actual de la zona	27
2.2. Fotogrametría	29
2.2.1. Toma de datos. Equipo y metodología	29
2.2.2. Levantamiento fotogramétrico	33

2.2.3. Optimización para visualización	46
2.2.4. Reconstrucción de las cuevas	57
2.3. Representación	62
2.3.1. Preparación del proyecto en Unreal Engine 5	64
2.3.2. Creación entorno	65
2.3.3. Ambientación e interactividad	66
2.4. Resultado y difusión	68
<b>3. Conclusiones</b>	
3.1. Conclusiones	76
3.2. Agradecimientos	81
<b>4. Anexos</b>	
4.1. Glosario de términos	84
4.2. Índice de figuras y tablas	91
4.2.1. Índice de figuras	91
4.2.2. Índice de tablas	97
4.3. Planimetrías	98
<b>5. Bibliografía</b>	
5.1. Libros y artículos	110
5.2. Webs y vídeos	113



# 1. Introducción

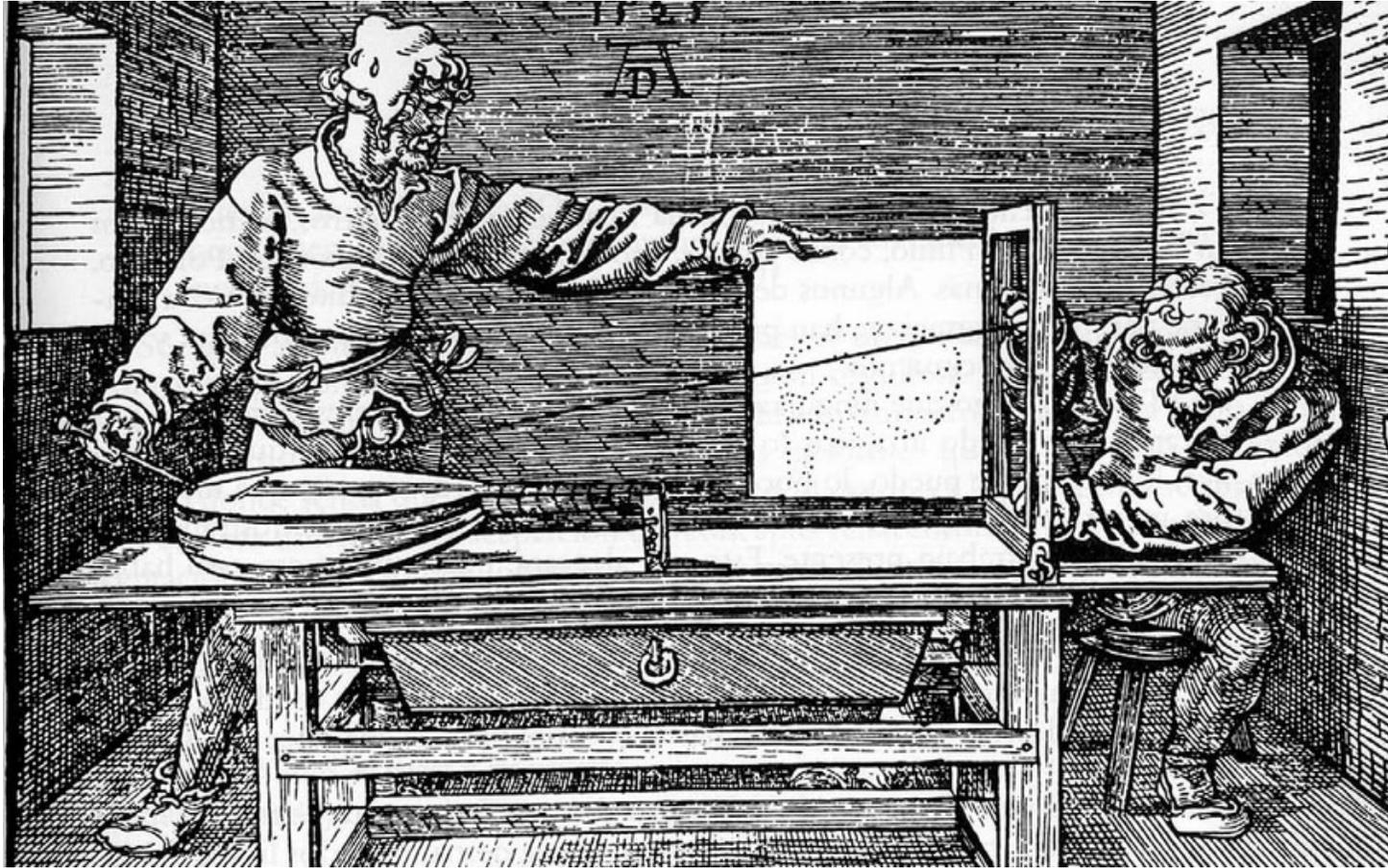


Figura 1. Alberto Durero, La perspectiva, 1525. Fuente: Extraído de Buill 2008, p. 25

## 1.1. Estado de la cuestión

Tanto la fotogrametría como la representación arquitectónica tienen un origen común en el Renacimiento, cuando artistas como Leonardo Da Vinci o Alberto Durero investigaron las leyes de la perspectiva, pero mientras la fotogrametría se ha especializado en la documentación métrica rigurosa, la representación ha centrado sus objetivos en un ámbito más artístico.

Sin embargo, con la incesante evolución de la tecnología hemos llegado a un momento en el cual a la representación artística y arquitectónica no se le puede exigir más calidad gráfica imitando modelos originales, sino que requiere que sean copias exactas de éstos modelos. De este modo, se unifican de nuevo las dos disciplinas, llevando el resultado de esta unión a un nuevo nivel de precisión y calidad gráfica nunca visto hasta ahora.

Desde que surgió el sistema actual fotogramétrico su uso se ha centrado principalmente en la obtención de documentación rigurosa y precisa de modelos 3D para catalogar y medir la realidad. Sin embargo, a medida que los sistemas de captura y cálculo fotogramétrico han ido evolucionando, la representación visual ha ido mejorando enormemente. Esto hace que el sistema utilizado actualmente, conocido como "Structure from Motion" (SfM) haya potenciado un segundo uso, fundamental para la fotogrametría: la divulgación.

Los arqueólogos e historiadores son los que más han comenzado a involucrarse en este campo de la divulgación por medio de la fotogrametría en los últimos años. Si bien comenzaron utilizando la fotogrametría para medir y catalogar restos patrimoniales muebles e inmuebles, eventualmente observaron que con estos levantamientos virtuales podrían acercar el patrimonio al gran público.

De este modo, comenzaron a hacerse producciones audiovisuales mostrando objetos y/o lugares desde un nuevo punto de vista que permite la obtención de estos modelos fotogramétricos. De la misma forma, se comenzaron a hacer recreaciones y copias físicas visitables para preservar los originales, cada vez más frecuente con el auge de las impresoras 3D, y más recientemente se está popularizando en los museos la virtualización de sus bienes para su divulgación por medio digital a través de sus webs.

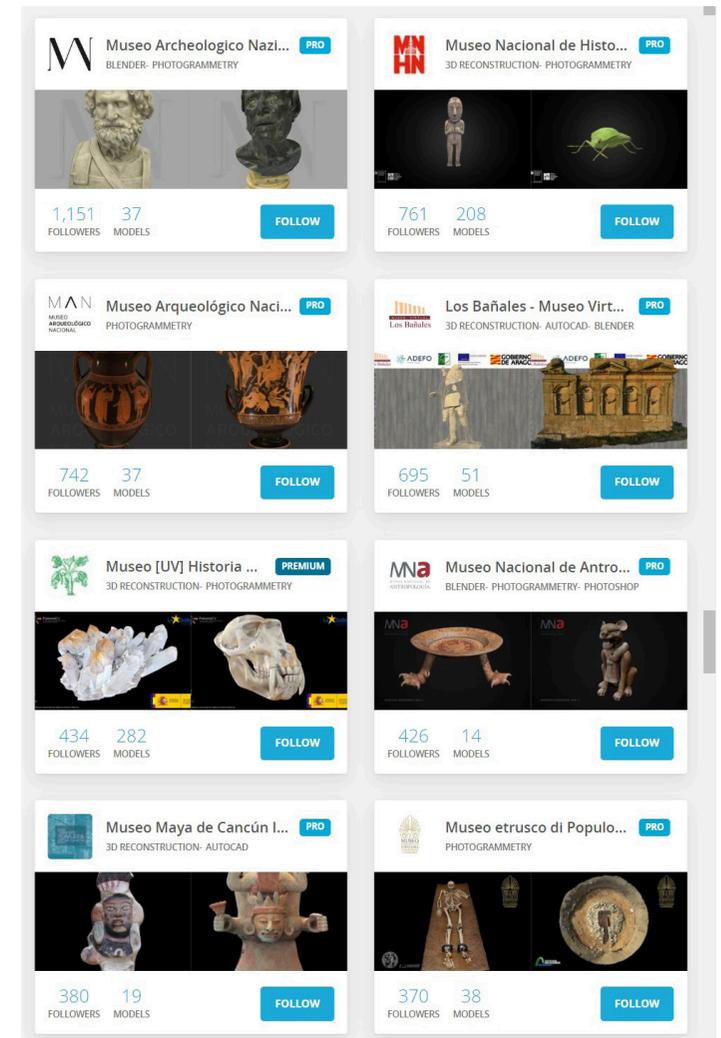


Figura 2. Colecciones virtuales fotogramétricas de distintos museos en Sketchfab.  
Fuente: Elaboración propia



Figura 3. Producción audiovisual de la serie "Mandalorian" con fondos fotogramétricos.  
 Fuente: Industrial Light & Magic. The Emmy-winning Special Visual Effects of The Mandalorian: Season Two.  
 Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Rd39daKZC18>

Por otro lado, la industria que más se ha involucrado y avanzado en el desarrollo tecnológico de los modelos 3D fotogramétricos y su representación es la industria del videojuego. Esta industria se encuentra en una búsqueda constante de mejora de la calidad visual de sus productos y en los últimos años han comenzado a dar el paso de incluir modelos fotogramétricos para conseguir un realismo nunca antes visto en los videojuegos.

El mayor problema a la hora de utilizar y visualizar los modelos 3D fotogramétricos es su complejidad, y por ende, el peso de los archivos resultantes. La industria del videojuego lleva años enfrentándose a esta problemática utilizando modelos 3D optimizados mediante retopología, y la transición entre varios modelos con distintos niveles de detalle (LoD) según la distancia de visualización.

Gracias a la estandarización de procesos y herramientas creadas por la industria del videojuego para la edición y representación de los modelos fotogramétricos, cada vez más industrias diferentes se están acercando a la utilización de la fotogrametría, como la del sector audiovisual y el cine, la realidad virtual y aumentada o el metaverso.

## 1.2. Fotogrametría

### 1.2.1. ¿Qué es la fotogrametría?

La fotogrametría es una disciplina que trata de reproducir tridimensionalmente objetos a partir de las medidas indirectas efectuadas en fotografías. Para ello, se debe determinar cuantitativamente las magnitudes geométricas de los objetos, y las situaciones espaciales, a partir de imágenes bidimensionales (Pozuelo, Andrés y Jordana, 2003). Los elementos pueden ser fotografiados desde distintas ubicaciones, distinguiendo la fotogrametría terrestre y aérea. Es una disciplina versátil, ya que las aplicaciones no cartográficas de la fotogrametría abarcan campos tales como la arquitectura, arqueología, medicina, etc.

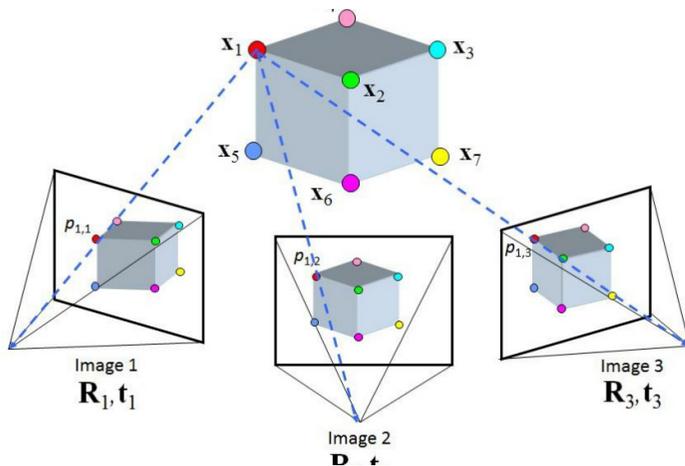


Figura 4. Representación del sistema Structure from Motion de fotogrametría digital.  
 Fuente: Stereo and kinect fusion for continuous 3D reconstruction and visual odometry. Disponible en: [researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-process-is-illustrated-The-structure-in-the\\_fig2\\_269327935](https://researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-process-is-illustrated-The-structure-in-the_fig2_269327935) [accedido 11 Sep, 2022]

## 1.2.2. Evolución histórica

### Metrofotografía o Fotogrametría plana (1850-1900)

En 1850, un ingeniero militar francés, Laussedat, es el primero en utilizar la entonces conocida como metrofotografía para cartografiar un terreno. Para ello, calculaba por intersección gráfica o numérica los puntos del terreno, empleando primero el dibujo a mano, luego la cámara clara y finalmente, las fotografías. Al mismo tiempo, Meydenbauer, un arquitecto alemán, diseña una cámara que le permite realizar levantamientos fotogramétricos. Gracias a él, se acuña el término fotogrametría.

### Fotogrametría analógica (1900-1960)

En las primeras décadas del siglo XX, se producen adelantos en fotografía aérea y en sistemas de calibración, que resultan en la superposición de las imágenes aéreas. Las fotografías se dotan de escala, se alinean y orientan de forma física para obtener la cartografía del terreno.

### Fotogrametría analítica (1960-1990)

Con la aparición de computadoras, cada vez más eficaces y precisas, en combinación con los restituidores analíticos se produce un gran avance en los tiempos de procesado. Las computadoras se encargan de aplicar modelos matemáticos de forma muy precisa y sin tener que realizar ningún tratamiento físico.

### Fotogrametría digital (1990-actualidad)

El siguiente paso evolutivo es la conversión del soporte fotográfico analógico al digital, que aporta mayor cantidad de información adicional. Este cambio permite también pasar de los restituidores analíticos a programas informáticos operados en ordenadores cada vez más potentes, eliminando los posibles errores de precisión debidos al factor humano.

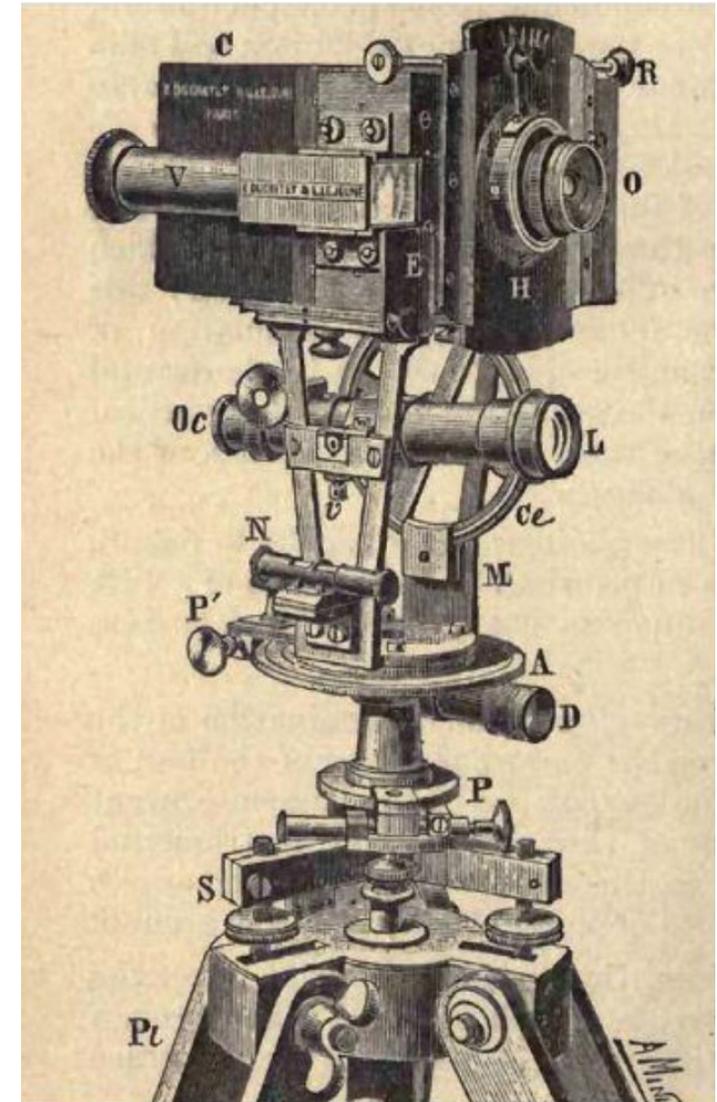


Figura 5. Ilustración del fototeodolito diseñado y utilizado por Aimé Laussedat.  
Fuente: Extraído de Maldonado 2020, p. 60

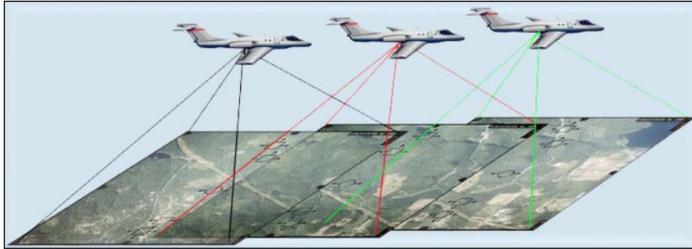


Figura 6. Representación de la fotogrametría aérea. Fuente: 3D City Modelling by Photogrammetric Techniques - Scientific Figure on ResearchGate. Disponible en: [researchgate.net/figure/figure-12-Illustrate-the-geometry-of-aerial-photogrammetry-13\\_fig1\\_334164581](https://www.researchgate.net/publication/334164581) [accedido 24 Ago, 2022]



Figura 7. Restituidor analógico mecánico Wild B-8. Fuente: Extraído de Buill 2003, p. 57

### 1.2.3. Clasificación

A día de hoy podemos hacer una clasificación de la fotogrametría en función de la posición desde donde se realizan las fotografías, y en función del tipo de tratamiento que reciben estas fotografías a la hora de procesar los datos.

#### Fotogrametría terrestre

La captura de datos se realiza a nivel del suelo. Su principal uso es para arquitectura y arqueología, pero se está abriendo a otros campos como los videojuegos o la realidad aumentada.

#### Fotogrametría Aérea

La captura de datos se realiza de forma aérea. Principalmente utilizado para la realización de cartografía y otras aplicaciones del mundo de la ingeniería, aunque también es usado en arquitectura y arqueología de mayor tamaño.

#### Fotogrametría Analógica

Es el procesado de datos clásico, en el cual el operador realiza la alineación y escalado físico de las fotografías utilizando métodos ópticos o mecánicos.

#### Fotogrametría Analítica

Surge con la aparición de los restituidores analíticos y las computadoras. La alineación y el escalado ya no se realizan de forma física sino que se aplican métodos matemáticos, que ayudaron a reducir tiempos de procesado.

#### Fotogrametría Digital

Con las cámaras digitales y los ordenadores cada vez más potentes, todo el proceso se realiza de forma digital mediante software informático, permitiendo una mayor precisión y agilizando aún más los tiempos de procesado.

## 1.3. Representación arquitectónica

La documentación de la arquitectura ha sufrido una profunda transformación en los últimos siglos, pasando de plasmar documentos plenamente analíticos de los bienes patrimoniales a ser una disciplina apoyada en lo digital. Esta digitalización no sustituye a los métodos analógicos convencionales de toma de datos y representación de estos, pero si los complementa. En la actualidad, se usa también para documentar el patrimonio y para su difusión.

### Orígenes

Las muestras pictóricas previas al Renacimiento no eran muy fieles en medidas ni a efectos de profundidad. Con la aparición de la imprenta, se hace necesario que aparezca una estandarización de signos o métodos de representación sobre papel, incluyendo el dibujo con acotaciones o el dibujo técnico.

En arquitectura, el registro gráfico Pre-Renacentista se centraba en las necesidades constructivas, por lo que la representación de la profundidad no era un elemento imprescindible. El manuscrito de Vitrubio, datado del siglo I, define la arquitectura como un conjunto que aúna tanto proyecto como construcción: de ahí que la función del proyecto pasara a la historia como la capacidad de asignar a cada elemento arquitectónico una proporción y orientación precisas basadas en la geometría. La búsqueda de una representación pictórica concordante con la percepción visual se ve impulsada por el movimiento renacentista, donde surge y se desarrolla la perspectiva cónica (Benicio da Fonseca, 2011).

Según Cerkec, 1999: "*Brunelleschi, gran arquitecto del Renacimiento, pudo resolver, después de muchos años de investigaciones, la construcción de Santa Maria da Fiore, catedral de Florencia*". El dibujo en perspectiva marca un antes y un después en la evolución del dibujo arquitectónico. La perspectiva supone un gran avance, ya que es capaz de plasmar un mundo tridimensional en un documento plano, respondiendo a un código de fácil interpretación y estandarizado.



Figura 8. Giovanni Battista Piranesi, Tempio antico, 1748/1749.  
Fuente: [nga.gov/collection/art-object-page.54568.html](https://nga.gov/collection/art-object-page.54568.html)



Figura 9. van Doesburg, Theo. Construcción espaciotemporal II, 1924.  
Fuente: museothyssen.org/coleccion/artistas/doesburg-theo-van/construccion-espaciotemporal-ii

### Finales del XVIII a siglo XX

A finales del s.XVIII, ya se dominaban la representación gráfica, los cálculos geométricos y matemáticos de edificios, y su representación. El dibujo técnico se adopta como sistema de representación común, al haber incluido ya avances como las proyecciones ortogonales, el sistema de planos acotados, y la perspectiva axonométrica, que se venían desarrollando desde el s. XVI. Durante el siglo XIX, la perspectiva pasó a ser una técnica estancada, pasando a ser desplazada por otras técnicas emergentes como la fotografía o el collage. El avance de otras técnicas de gran precisión desemboca en el “hiperrealismo” pictórico, que trata de plasmar el mundo simulando el resultado de una cámara fotográfica.

### Segunda mitad del XX

La revolución digital de la segunda mitad del siglo XX, impulsa un cambio en la representación gráfica arquitectónica. Los sistemas de representación comienzan a incluir otras perspectivas, como la caballera o la aérea. La experimentación gráfica desemboca en los movimientos vanguardistas de mediados de siglo XX, que tratan de alejarse del estilo de representación tradicional (como constructivismo o cubismo) (Maldonado y Díaz-Guerra, 2012).

La aparición de la informática, el diseño gráfico, los videojuegos e internet abren nuevas puertas a la digitalización de los sistemas de representación arquitectónica. La digitalización y el uso de softwares de creación gráfica complementa los métodos de documentación tradicionales, siendo cada vez más demandado por instituciones como vía de entrega de documentación. Estas exigencias favorecen la difusión y divulgación de contenido (revistas digitales, congresos, etc).

Como se ha citado con anterioridad, el diseño gráfico tradicional solía emplear planimetrías, necesarias para elaborar memorias o informes. Y aunque la documentación gráfica en dos dimensiones es imprescindible cuando se desea aportar un soporte físico en papel, existen métodos de documentación capaces de optimizar la calidad de la información recibida. La representación en 3D en soporte digital ofrece más información.



Figura 10. Collage realizado por Rem Koolhaas para la ampliación del MOMA (NY).  
Fuente: moma.org/collection/works/167648

## Del primer 3D al ArchViz

En 1963 Ivan Sutherland, un científico computacional Estadounidense, creó el programa “Sketchpad”, reconocido como el primer software que permitía la manipulación gráfica de objetos 3D, lo que ha supuesto que se le considere como el padre de los programas CAD y del CGI (Computer Generated Imagery).

Según avanzaban los años, paulatinamente fueron surgiendo novedades en lo referido al modelado 3D, su visualización y renderizado, pero no es hasta la última década del siglo XX cuando se crearon las primeras versiones de varios softwares que aún siguen siendo líderes en el sector. El primero de estos softwares fue 3D Studio DOS (1990), de Autodesk, que después sería renombrado como 3D Studio MAX y posteriormente como Autodesk 3D MAX. A este le siguieron otros software de modelado y/o renderizado como Cinema 4D, Houdini, V-Ray, Blender o Autodesk Maya, así como el modelado NURBS.

Durante la primera década del siglo XXI continúa la evolución de los citados programas, surgiendo también otros nuevos softwares de renderizado fotorrealista como son Octane Render, Maxwell Render o Corona Render. También en este periodo se lanza Autodesk Revit, impulsando el método BIM de modelado 3D que había empezado a utilizar ArchiCAD años atrás.

Con el aumento de potencia de los ordenadores personales y la evolución de los programas previamente mencionados, durante la década de 2010-20 el modelado 3D y renderizado se popularizó en gran medida tanto en el ámbito de la arquitectura como en otros sectores. El uso de materiales PBR y las mejoras en el cálculo del trazado de rayos permitieron alcanzar unos niveles de calidad visual excepcionales popularizando el término de infoarquitectura hiperrealista y/o ArchViz.

Es en este momento cuando también comienzan a usarse distintos softwares de renderizado en tiempo real, como Lumion o los motores de videojuegos Unity y Unreal Engine, que permiten moverse dentro del proyecto 3D además de interactuar con el entorno.

A finales de esta década surgen diversos dispositivos de Realidad Virtual y Realidad Aumentada, que gracias a la potencia y calidad gráfica aportada por estos nuevos motores de videojuegos permiten una representación gráfica completamente inmersiva.



Figura 11. Captura de Radar CH (más tarde ArchiCAD), origen del modelado BIM en 1984. Fuente: [archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim](http://archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim)

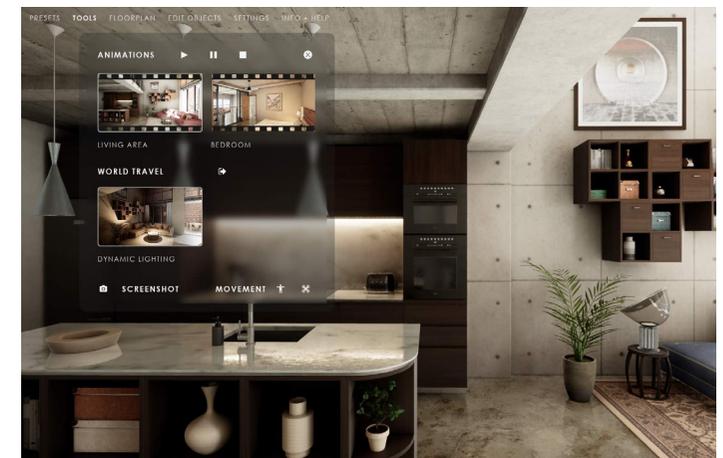


Figura 12. ArchViz interactivo realizado con Unreal Engine 5. Fuente: <https://www.s-dot.de>

## 1.4. Metodología

### 1.4.1. Instrumentación

#### Escáneres



##### GeoSlam Zeb Horizon

- Escáner Portatil
- Láser: Clase I
- Alcance: 100m
- Velocidad escaneo: 300.000 pps
- Campo de visión: 270° x 360°
- Precisión relativa: 1 a 3 cm
- Nubes de puntos: color e intensidad
- Certificado IP54



##### Trimble X7

- Escáner estático inercial
- Láser: Clase I
- Alcance: 0.6-80m
- Velocidad escaneo: 500.000 pps
- Campo de visión: 360°x 282°
- Calibración automática
- Cámara integrada
- Certificado IP55

#### Drones



##### DJI Matrice 300 RTK

- Autonomía 55min
- Alcance max: 15km
- Velocidad max: 23 m/s
- GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo
- Sensores de obstaculos: 6 direcciones
- Múltiples configuraciones de cámaras
- Certificado IP54



##### DJI Phantom 4 Pro

- Autonomía 30min
- Alcance max: 6km
- Velocidad max: 72 m/s
- GPS+GLONASS
- Sensores de obstaculos: 5 direcciones
- Cámara sensor CMOS 1" 20Mpx

## Fotografía



### Panasonic Lumix DMC-TZ10

- Sensor CCD de 1/2.33" y 12.1 Mpx
- ISO 80-1.600 (extendido a 6.400)
- Lente Leica 25-300 mm
- Apertura F3.3-4.9
- Zoom x12 (Optico) x4 (Digital)
- Compensación de exposición  $\pm 2$  EV (en pasos de 1/3 )



### Xiaomi Mi 5s

- Sensor CMOS de 1/2.3" y 12MPx
- ISO 100-3.200
- Apertura F 2.0
- Zoom x8 Digital
- HDR
- RAW

## Procesamiento de datos



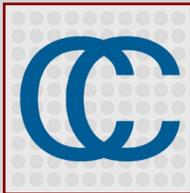
### PC Sobremesa:

- Procesador: Intel® Core™ i7-5820K (3.30GHz, 15 MB Cache)
- Memoria RAM: 16GB (actualizado a 32GB) DDR4 2400MHz CL15
- Tarjeta Gráfica: NVIDIA EVGA RTX 2070 XC Ultra 8GB GDDR6
- Sistema Operativo: Windows 10 Pro 21H2

Tabla 1. Equipo e instrumentos utilizados para la realización del trabajo. Fuente: Elaboración propia

## 1.4.2. Software

### Fotogrametría



#### Cloud Compare

Software de código abierto para el procesamiento de nubes de puntos 3D, así como mallas trianguladas e imágenes calibradas.



#### Agisoft Metashape

Software para el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales. Genera nubes de puntos densas, mallas trianguladas texturizadas y ortomosaicos.

### Edición 3D



#### Meshlab

Software de código abierto para la gestión y el procesamiento de grandes mallas 3D no estructuradas. Posee gran cantidad de herramientas para editar, limpiar y optimizar.



#### Blender

Software de código abierto de creación de contenido 3D. Permite modelar, editar, texturizar, animar, crear efectos, renderizar y editar video.



#### Instant Meshes

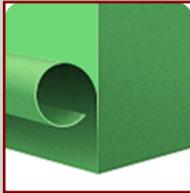
Software independiente de código abierto que consta de un algoritmo de retopología basada en quads.



#### Quad Remesher

Algoritmo de retopología basada en quads disponible en forma de plugin/add-on para múltiples programas de modelado 3D.

## Tratamiento de imágenes



### Agisoft Delighter

Software centrado en la eliminación de sombras arrojadas y oclusión ambiental en las texturas de los modelos 3D.



### Substance Painter 2019

Software para la edición y aplicación de texturas en modelos 3D. Permite crear, editar y bakear los distintos mapas de texturas PBR.



### Adobe Photoshop

Software de la suite de Adobe especializado en la creación y edición de imágenes digitales.



### Adobe Camera Raw

Plugin gratuito de la suite de Adobe para Photoshop y Lightroom para el revelado digital de imágenes en formato RAW.

## Visita virtual



### Unreal Engine 5

Motor de renderizado 3D en tiempo real creado por Epic Games. Originalmente usado para la creación de videojuegos, actualmente se usa también en cine, arquitectura...



### Twinmotion 2022

Software de renderizado y visualización 3D en tiempo real. Pertenece a Epic Games y es una versión simplificada de Unreal Engine enfocada a la visualización arquitectónica.

## Maquetación



### Google Docs Editors

Suite ofimática basada en la nube que está integrado de forma gratuita para los usuarios de Google.



### Adobe InDesign

Software de la suite de Adobe especializado en la edición, maquetación y organización de contenido a nivel editorial.

Tabla 2. Programas utilizados para la investigación y realización del trabajo. Fuente: Elaboración propia

## 1.5. Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste en la catalogación y puesta en valor de las casas cueva de Trigueros del Valle mediante la realización de una visita virtual interactiva. Para ello se realizará el levantamiento fotogramétrico de las distintas casas cueva y su entorno inmediato, y se procederá a la recreación de una visita virtual interactiva con el fin de divulgar el patrimonio histórico castellano.

### Objetivos específicos

- Realizar una toma de datos para un levantamiento fotogramétrico con distintas herramientas de captura como escáner láser fijo y móvil, drones y cámaras de distintos formatos, y procesar los datos obtenidos por medio de distintos programas.
- Aprendizaje de un proceso metodológico y flujo de trabajo de las herramientas tecnológicas empleadas en la optimización de los modelos fotogramétricos que permita su visualización online con independencia de la potencia del equipo utilizado.
- Adquirir los conocimientos necesarios para la utilización de modelos fotogramétricos en software de renderizado en tiempo real como el motor de videojuegos Unreal Engine.
- Investigar nuevas formas de realizar visitas virtuales inmersivas que permitan el movimiento libre frente a las habituales que consisten en fotografías 360º conectadas entre sí.
- Establecer estrategias de difusión basadas en diferentes formatos y plataformas para hacer más accesible el patrimonio a la población.



Figura 13. Vista aerea de Trigueros del Valle. Fuente: *Elaboración propia.*



## 2. Práctica



Figura 14. Foto aérea de Trigueros del Valle. Fuente: *Elaboración propia*

Presentadas las bases teóricas, en este bloque se va a tratar un caso práctico que ayude a contextualizar la temática presentada.

Para este TFG se ha escogido la representación interactiva de las casas cueva de Trigueros del Valle. La elección de este caso práctico en concreto se debe a que el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, perteneciente al departamento de Urbanismo y Representación de la Arquitectura en la Universidad de Valladolid, iba a realizar un trabajo en la zona. Quiero agradecer a dicho departamento la oportunidad de participar en la realización de ese trabajo y ampliarlo para poder desarrollar este TFG.

Si bien en un principio se planteó un trabajo bastante ambicioso, debido a las características de extensión requeridas y el tiempo disponible para realizar este TFG, se ha limitado el alcance y opciones interactivas de la visita virtual final dejando la opción abierta para una posible continuación y ampliación de la misma en un futuro.

Es conveniente señalar que a lo largo de este bloque se realizará una breve descripción de los distintos pasos que se han seguido para la realización del trabajo, así como los obstáculos encontrados para su ejecución y la resolución de los mismos con los conocimientos y herramientas disponibles.

## 2.1. Casas cueva en Trigueros del Valle

### 2.1.1. Localización. Trigueros del Valle

Trigueros del Valle es un municipio de la provincia de Valladolid, perteneciente a la comarca de la Campiña del Pisuerga y situado a unos 25km al norte de la capital, lindando con la provincia de Palencia. El municipio se sitúa en un amplio valle en el que tradicionalmente han abundado los campos de trigo, siendo estos los que le han dado el nombre.

Actualmente posee una población ligeramente superior a los 300 habitantes. Sus principales puntos de interés son sus bodegas de producción vitivinícola con Denominación de Origen Cigales y el turismo derivado generado a partir de su patrimonio cultural arquitectónico.

Las casas cueva, objeto de estudio de este trabajo, se localizan bajo el cerro que preside la Ermita de Nuestra Señora de la Virgen del Castillo. Dichas cuevas se encuentran excavadas bajo una gran losa de piedra natural que da forma al cerro y sobre algunas bodegas que se encuentran repartidas a lo largo de la ladera del mismo.

### 2.1.2. Contexto histórico

Si bien se conoce la existencia de asentamientos previos, se podría situar el origen del actual Trigueros en torno al siglo X con la repoblación que hubo en la zona al incorporarse la comarca de los Montes Torozos al Reino Astur. A esas fechas pertenece el arco mozárabe que da acceso a la Ermita, que se cree que formó parte de una construcción previa de carácter fortificado, reforzado por la tradición oral que nombra a esta Ermita, e incluso al cerro, como "El Castillo".

La primera constancia escrita de la existencia de unas cuevas bajo el cerro proviene de Enrique Berzal de la Rosa en su libro "Historia de Trigueros del Valle" (1972) en el cual detalla la población y las distintas clases sociales que vivían en la localidad entre 1750-1755, siendo algunos de ellos pobres de solemnidad que vivían en unas cuevas excavadas bajo la Ermita.

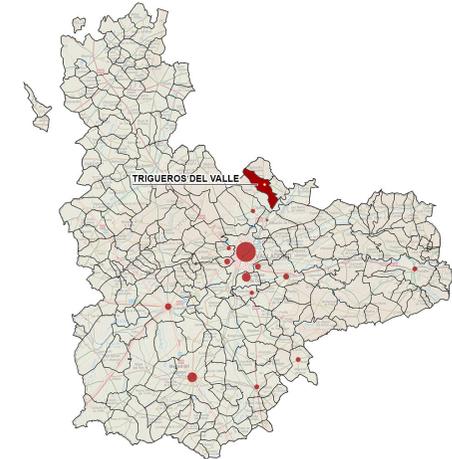


Figura 15. Situación Trigueros del Valle, provincia de Valladolid. Fuente: Elaboración propia

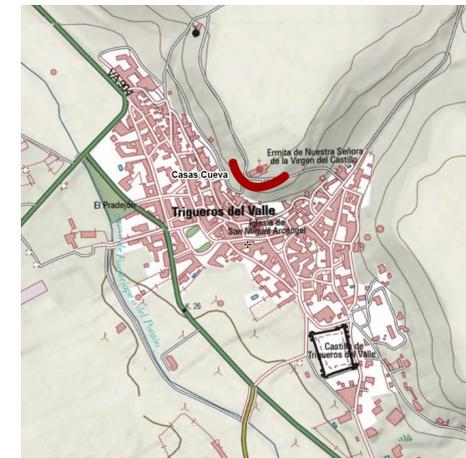


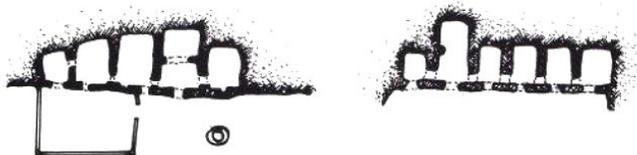
Figura 16. Emplazamiento Casas-Cueva en Trigueros del Valle. Fuente: Elaboración propia



**Cuevas con cámaras desde una pieza central**

**Imagen 1.** Planta de cueva en Cariñena. Aragón.

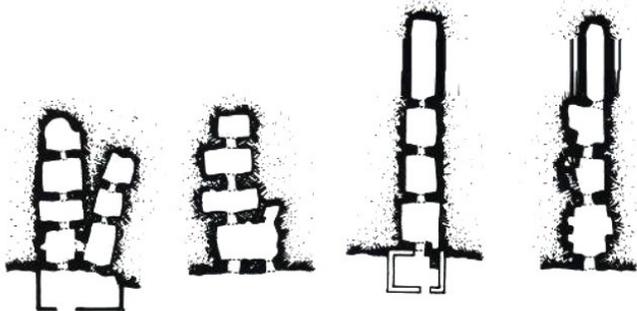
**Imagen 2.** Planta de cueva en Pegalajar. Jaén. España.



**Cuevas con cámaras laterales**

**Imagen 1.** Planta de cueva en La Muela. Aragón.

**Imagen 2.** Planta de cueva en Juslibol. Aragón. España.



**Cuevas con cámaras en profundidad**

**Imagen 1.** Planta de cueva en Almazora. Almería.

**Imagen 2.** Planta de cueva en Alhabía. Almería.

**Imagen 3.** Planta de cueva en Hinojares. Jaén.

**Imagen 4.** Planta de cueva en Almazora. Almería. España.

Figura 17. Tipologías Casas cueva. Fuente: Extraído de Neila 2004, p.401, 402

Algunas de estas casas-cueva han seguido estando habitadas hasta mediados del siglo XX, habiendo testimonios de vecinos que llegaron a vivir allí, recogidos por Paloma Contreras Leiva en su Trabajo de Fin de Máster "Las casas-cueva en Trigueros del Valle en Valladolid: Análisis funcional y constructivo de la vivienda excavada".

Tipología de las casas cueva

La naturaleza karstica del terreno donde se asientan las casa cueva ha permitido la formación de oquedades, que han sido aprovechadas por el ser humano a lo largo de la historia, como se ha descrito anteriormente. Este recurso biogeográfico es más frecuente en la region Norte de Castilla y León.

Por otro lado, las cuevas artificiales, ya sean bodegas o casas-cueva, aparecen por Castilla y León en zonas agrícolas, especialmente vinícolas, en los entornos del valle del Pisuerga y los páramos al sur del Río Duero. Su origen se encuentra alrededor del siglo XVIII y sus habitantes eran principalmente agricultores y jornaleros.

Fue a finales del siglo XIX y comienzos del XX cuando estas cuevas tienen su punto álgido expandiéndose por el entorno. Se convierten en viviendas con varios espacios adosados y diversas tipologías en función de cómo se ubicaban estos nuevos espacios excavados. Como indica Félix Jové Sandoval en su libro "La vivienda excavada en tierra, el barrio del castillo en Aguilar de Campos: Patrimonio y técnica constructiva" (2006) o Javier Neila González en su libro "Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible" (2004) estas tipologías se podrían agrupar entre:

- Las que excavaban en profundidad hacia el interior del terreno
- Las que excavaban en paralelo a la alineación natural del terreno
- Las que tenían una cámara central desde la que excavaban en todas direcciones
- Las mixtas que tenían un poco de todas las anteriores.

### 2.1.3. Estado actual de la zona

Desde que se produjo el desalojo de las casas cueva a mediados del siglo pasado, estas han sufrido las inclemencias del tiempo y la falta de mantenimiento. Este abandono a lo largo de los años ha supuesto el derrumbe total o parcial de muchos de los muros de piedra que formaban sus fachadas y que a la vez servían de sustentación a la losa natural de piedra caliza que sirve de techo. El deterioro y derrumbe de los puntos de apoyo de esta losa ha hecho que poco a poco éstas vayan colapsando, llevándose consigo parte de estas cuevas y haciéndolas inaccesibles.

En 2010 el Ayuntamiento de Trigueros del Valle comenzó un proyecto para recuperar dos de estas casas cueva para su uso turístico.



Figura 18. Situación de abandono y derrumbe a principios de 2005 Fuente: Fotografías cedidas al Ayto de Trigueros del Valle por Mercedes Cano



Figura 19. Situación de abandono y derrumbe a principios de 2005 Fuente: Fotografías cedidas al Ayto de Trigueros del Valle por Mercedes Cano



Figura 20. Estado del proyecto de recreación durante su paralización hacia 2017. Fuente: *Extraído de Contreras 2017, p.38, 41*

Este proyecto se vió paralizado durante años por falta de financiación así como por litigios por la titularidad de los terrenos entre el Ayuntamiento y algunos vecinos.

En 2018 se recuperó el proyecto con la recreación de estas dos casas cueva con materiales actuales, pero intentando mantener el espíritu que tenían cuando estaban ocupadas, que finalmente se abrieron al público como museo en 2020 .

En 2021 el Ayuntamiento comenzó una nueva fase en la cual pretende consolidar y recuperar otras dos casas cueva, de las ocho que tienen catalogadas, y que se incorporarán al museo existente cuando estén finalizadas.



Figura 21. Estado de la zona durante las obras de rehabilitación de la segunda fase en 2022. Fuente: *Elaboración propia*

## 2.2. Fotogrametría

### 2.2.1. Toma de datos. Equipo y metodología

Para realizar toda la documentación se hicieron varias visitas a Trigueros del Valle con distintos medios y objetivos en cada una de ellas, tal y como se muestra en el siguiente cronograma:

- 31 Enero  
Escaneado del entorno, así como el interior de las cuevas y la ermita con escáneres laser estáticos y móviles.
- 25 Abril  
Vuelo de drones para levantamiento fotogramétrico de la ortofoto del entorno así como del exterior de la ermita.
- 21 Mayo  
Toma de fotografías de todas las fachadas de las cuevas, así como de su entorno inmediato.



Figura 22. Preparación del equipo para la toma de datos. Fuente: Elaboración propia

### Día 31 de enero de 2022

En esta primera visita para toma de datos acude como equipo humano José Martínez (Técnico del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica) junto con el autor de este TFG. Se utilizó un equipo de medición láser Trimble X7, escaner láser inercial con una interfaz muy intuitiva gracias a una tablet que se utiliza para controlar y vincular los distintos puntos de escaneo in situ.

Esta toma de datos se realizó en colaboración de dos miembros procedentes de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia: Cristóbal Ordóñez (PAS) y Federico Simoes (Investigador), que procedieron a realizar un levantamiento del interior de las cuevas, así como del entorno, con el escáner de mano Zeb Horizon de GeoSlam.

Por nuestra parte se inició la toma de datos con el escáner Trimble X7 del exterior de la ermita haciendo un recorrido elíptico alrededor de la misma. Después se procedió al escaneo de la parte interior, teniendo precaución de hacer suficientes tomas para que no quedase ningún espacio sin capturar. Se comenzó bajo el dintel de la puerta principal de acceso, y pasando por el eje de la ermita, se capturó el ábside, sacristía y transparente para después volver y finalizar con el coro y la sala de maquinaria del reloj.

Finalizada la toma de datos de la ermita, se procedió a hacer un recorrido por el camino que conecta las distintas casas cuevas recuperadas, así como el sendero de tierra que conecta el resto de las casas cuevas que están actualmente en obras para un proyecto de consolidación y restauración.

Si bien el escáner tiene una tecnología inercial que reconoce y enlaza las distintas estaciones desde donde se realizan las tomas de datos, dicha tecnología no es infalible y existen zonas conflictivas donde es necesario incrementar el número de escaneos. Esto aumenta el número de puntos de referencia y facilita el proceso de alineamiento en estas zonas.

El escáner Trimble X7 posee cámara para obtener la textura fotográfica no obstante, debido al tiempo disponible en esta visita para la toma de datos, solo se utilizó la medición láser de dicho aparato para la captura de geometría. En total se realizaron 58 escaneos que posteriormente se realinearon en el Laboratorio para mayor precisión.



Figura 23. Cristóbal y Federico preparando la toma de datos. Fuente: Elaboración propia



Figura 24. Jose comenzando el escaneo de la ermita. Fuente: Elaboración propia

Día 25 de abril de 2022

El objetivo de la segunda visita fue la toma de datos utilizando drones cuadricópteros. Con este fin, en esta ocasión el equipo humano constó de José Matinez y el autor de este TFG. Se unieron a esta toma de datos un miembro de la empresa Geozone, que tenía como objetivo la realización de un escaneado del subsuelo con un *georadar*, y Gregorio José Marcos, de la empresa Strato y arqueólogo jefe de los estudios encargados en la zona.

Primero se situó la estación DJI D-RTK 2 para el *posicionamiento RTK* y se procedió al montaje del dron DJI Matrice 300 RTK. Ya preparados se procedió a avisar al aeropuerto para tener luz verde para volar durante 1 hora, cuyo permiso se había solicitado con anterioridad.

Con el DJI Matrice 300 RTK se programó un vuelo a 200m de altura para realizar una *ortofoto* de la zona. Para ello el dron volaba a una velocidad reducida de 4m/s e iba realizando fotografías automáticamente en movimiento. Se configuró el dron para capturar las fotografías con un intervalo de distancia entre ellas que permitiese obtener un solape del 80% para obtener un buen levantamiento fotogramétrico.

Una vez realizado el vuelo para la ortofoto se procedió al montaje del otro dron, un DJI Phantom 4 Pro. El objetivo con este dron era la captura de fotografías para el levantamiento fotogramétrico del exterior de la ermita, así como diversos videos del entorno y del pueblo para la realización de un vídeo de presentación del trabajo encargado a la Universidad de Valladolid.

Para ello se preparó un recorrido elíptico automático alrededor de la ermita, que tuvo que corregirse manualmente para orientar correctamente el dron para la captura de las fotografías. Se realizaron 3 pasadas a distintas alturas y para terminar con la misión de vuelo se hicieron tomas de detalle alrededor de la linterna central así como de la estructura de hierro que contiene la campana y el reloj. Finalizada la captura de fotografías y vídeos, se dió aviso de nuevo al aeropuerto y se procedió a recoger todo el equipo.

Mientras se esperaba a otro de los técnicos que iba a realizar el estudio con el georadar esa misma tarde, se procedió a realizar fotografías a pie de ermita con la cámara de fotos para completar la documentación para el levantamiento fotogramétrico. Igualmente se realizó una breve toma de datos de fotografías en el entorno de las cuevas que se encontraban en ese momento en obras.



Figura 25. Estación móvil D-RTK 2 para geoposicionamiento del dron. Fuente: Elaboración propia



Figura 26. Jose montando el dron DJI Matrice 300 RTK. Fuente: Elaboración propia

### Día 21 de Mayo de 2022

En el tercer y último día de toma de datos el objetivo fue realizar una sesión de fotografías de todas las fachadas de las cuevas. El día elegido presentaba unas condiciones meteorológicas idóneas (nublado pero con claridad) para conseguir un levantamiento fotogramétrico con una textura fotográfica neutra y sin sombras arrojadas.

Para las fachadas recuperadas, al tener un trazado lineal únicamente se realizaron dos pasadas, cada una a una altura diferente e intentando mantener las distancias mínimas para obtener un buen solape. Sin embargo, la zona de las cuevas en obras tenía mayor complejidad, por lo que además de una toma general se realizaron tomas en paralelo a la fachada en dos alturas así como tomas de detalle en los huecos y los muretes exteriores que delimitaban unos pequeños patios.

La gran mayoría de las fotografías fueron realizadas con la cámara integrada de un smartphone Xiaomi Mi5s en formato **RAW**, aunque para algunas zonas no tan importantes se capturó únicamente en formato JPG. También se utilizó una cámara Panasonic Lumix TZ10 para recrear el entorno del pueblo.



Figura 27. Preparando el plan de vuelo del dron DJI Matrice 300 RTK. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 28. Escaneando la ermita con el dron DJI Phantom 4 Pro. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 29. Estado actual de la fachada en obras. Fuente: *Elaboración propia*

## 2.2.2. Levantamiento fotogramétrico

### Organización y procedimiento

Con toda la documentación obtenida el siguiente paso fue la organización de ésta para tener una buena estructura de trabajo, así como el procesado de la misma pensando en cómo se va a utilizar en los siguientes pasos.

Para ello se ha realizado un esquema en el cual se diferencian los distintos tipos de modelos 3D que se han implementado en la recreación virtual. Si bien el esquema general se ha mantenido durante todo el proceso ha habido pequeñas variaciones según iban apareciendo problemas o se encontraba otra solución mejor.

El primer punto es el terreno base sobre el que se va a apoyar el resto. El plan original es utilizar los datos obtenidos de las nubes de puntos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y/o procedentes de los datos capturados a través del vuelo dron. Este modelo no necesita tener gran calidad a nivel de poligonaje y texturizado pues sobre esta base se pondrán encima los distintos modelos específicos y los assets que terminen de contextualizar el entorno.

Teniendo ya la base, el siguiente punto es superponer los modelos de alta calidad optimizados de las distintas fachadas de las casas cuevas, diferenciadas entre las que están actualmente en obras, y principal punto focal del trabajo, las que se han rehabilitado total o parcialmente, y la que es de obra nueva.

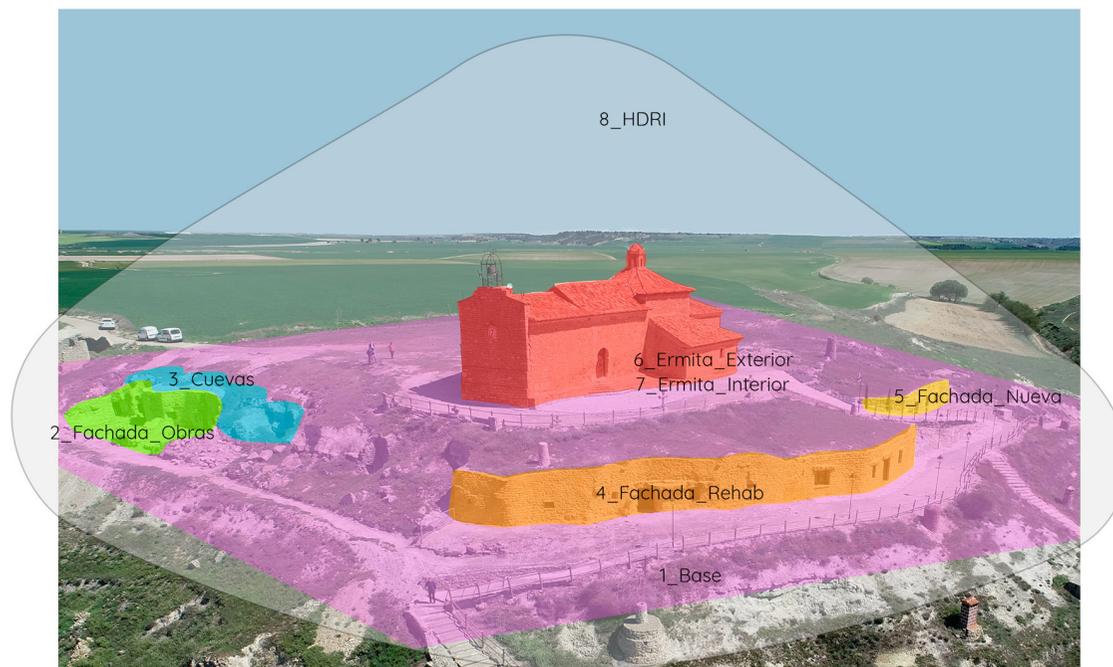


Figura 30. Esquema organización de archivos y trabajo. Fuente: Elaboración propia

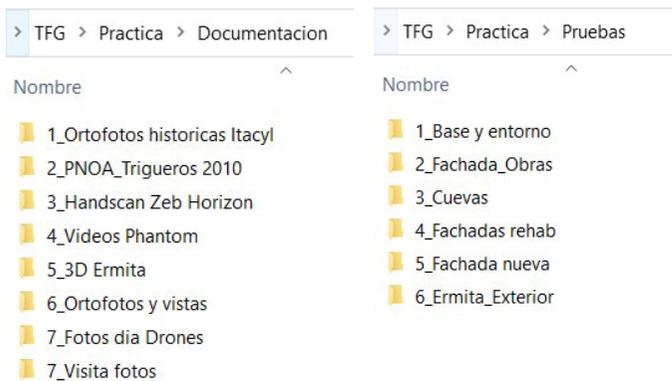


Figura 31. Sistema organizativo de carpetas de los archivos de trabajo. Fuente: Elaboración propia

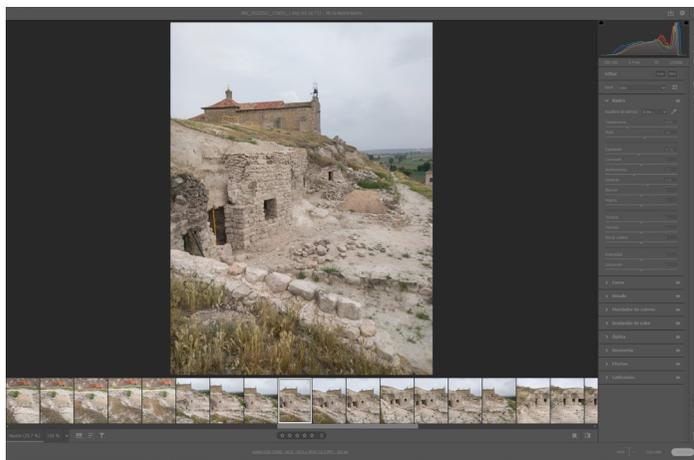


Figura 32. Revelado digital de las fotografías mediante CameraRAW. Fuente: Elaboración propia

De la misma forma estarían los modelos de la Ermita, separados en un modelado interior y otro exterior.

El siguiente punto es el interior de las cuevas que, para limitar el trabajo y debido al tiempo disponible, se va a centrar en las dos últimas casas cueva que se están rehabilitando en este momento. En este caso, además de optimizar los modelos será necesario hacer modificaciones para recrear el estado ideal.

Por último, para recrear el entorno del pueblo así como las condiciones de iluminación exteriores la idea inicial es utilizar una imagen HDRI capturada in situ. No obstante también había datos suficientes para hacer un levantamiento fotogramétrico sencillo del entorno desde la cornisa del cerro.

Tomadas las fotos y los escaneos, el siguiente paso del proceso es la generación de los modelos 3D mediante los distintos programas de tratamiento de imágenes y nubes de puntos.

Para la gestión de los datos obtenidos con el escáner de mano Zeb Horizon, se ha utilizado el programa GeoSlam Connect para la reconstrucción de la nube de puntos y posteriormente el programa CloudCompare para la creación de la malla 3D.

Para el caso del escáner láser Trimble X7, dado que en ese momento no se disponía del software específico de Trimble, se ha utilizado el programa Leica Cyclone Register 360 para el tratamiento de los datos. Posteriormente se ha exportado para utilizar Metashape para la creación y texturizado de la malla 3D.

En cuanto a las fotografías tomadas en formato RAW se ha realizado el revelado digital mediante el plugin CameraRAW de Photoshop y posteriormente Metashape para el levantamiento de la nube de puntos, malla 3D y texturizado.

Siguiendo el esquema organizativo antes mencionado, se han ido generando los modelos para las distintas zonas a trabajar:

## 1 Base

### Ortofoto

Con el fin de determinar si existen restos arqueológicos en la zona circundante a la Ermita, se ha encargado al Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica el levantamiento de una ortofoto actual del entorno junto con un Modelo Digital de Elevación (DEM). Esta ortofoto se ha levantado mediante los datos capturados durante el vuelo con el dron DJI Matrice 300 RTK.

### Entorno de las cuevas mediante videomapping

Utilizando uno de los videos generados con el dron DJI Phantom 4 PRO se ha levantado un modelo mediante la técnica de videomapping.

Para ello se ha importado el clip de video en Metashape, convirtiendo cada frame en una cámara en el proceso, dando como resultado 995 imágenes útiles. Una vez cargadas las imágenes se han alineado y optimizado y después creado la malla 3D a partir de los mapas de profundidad (en calidad alta).

Completada la malla se procesó la textura fotográfica, separándolo en 2 atlas con una resolución de 8192x8192px cada uno.



Figura 33. Esquema organización de archivos y trabajo. Fuente: Elaboración propia

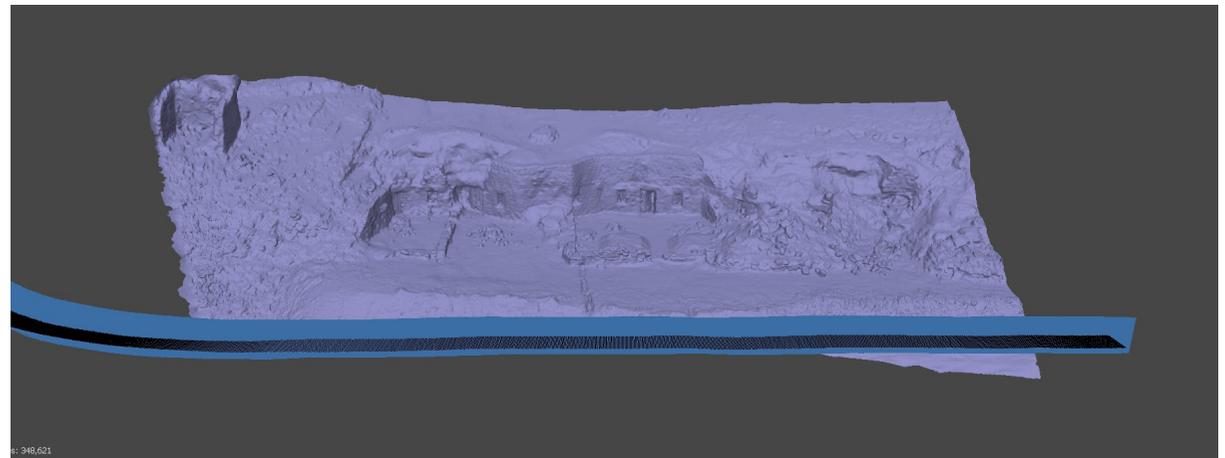


Figura 34. Esquema organización de archivos y trabajo. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
DJI Phantom 4 PRO	995	3h 14min	146.056	2h 37min	693.140	2x8k

Tabla 3. Datos y tiempos del levantamiento del 3D realizado con videomapping. Fuente: Elaboración propia



Figura 35. Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Abril. Resultado texturizado. Fuente: Elaboración propia

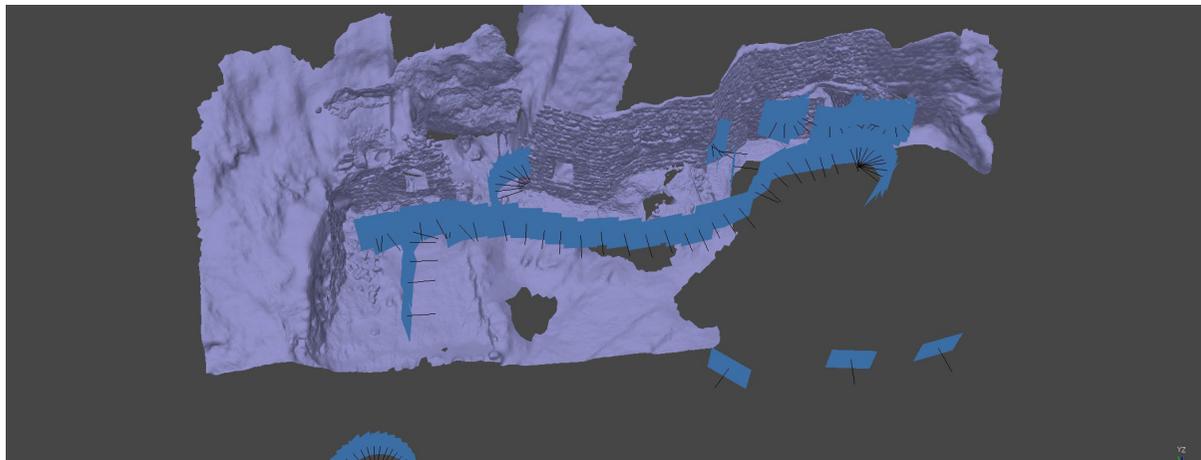


Figura 36. Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Abril. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. Fuente: Elaboración propia

## 2 Fachadas Obras

### Primer modelo con fotos de Abril

El segundo día de toma de datos en Trigueros del Valle se realizó un pequeño set de fotos de la fachada que se encuentra en obras por si fuese necesario tener referencias adicionales, pero que se aprovechó para hacer un levantamiento fotogramétrico inicial.

Para ello se utilizaron 94 fotografías en formato RAW (.dng) que fueron capturadas con el smartphone Xiaomi Mi 5s y posteriormente reveladas de forma digital en Photoshop con el plugin *CameraRaw*.

Dado que esta toma de datos no había sido planificada, las fotografías apenas fueron suficientes para realizar un levantamiento correcto. Consistieron en una serie de fotografías que seguía en paralelo la alineación de la fachada y algunas fotografías de detalle de algunos huecos desde varios puntos de pivote para más definición.

El proceso de levantamiento completo fué bastante rápido en comparación con el tiempo de procesado del modelo a partir del videomapping (94 fotos frente a 995). En esta ocasión el resultado tenía mayor resolución, si bien se notaba que la toma de datos había sido poco exhaustiva y algunas zonas estaban incompletas debido a la falta de información.

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
Xiaomi Mi 5s	94	6 min	191.333	49 min	3.751.044	4x8k

Tabla 4. Datos y tiempos del levantamiento del 3D de la fachada en obras con los datos de Abril. Fuente: Elaboración propia

## Modelo con fotos de Mayo

Dado que el resultado del modelo anterior era incompleto, se aprovechó un día nublado en Mayo para volver a Trigueros del Valle a realizar fotografías mejor planificadas y sin sombras arrojadas de gran contraste como ocurrió en la visita previa.

Para el levantamiento de este modelo se utilizó un total de 338 fotografías en formato RAW (.dng) capturadas también con el smartphone Xiaomi Mi5s y, al igual que la vez anterior, se revelaron de forma digital con el plugin CameraRaw en Photoshop.

En esta ocasión se realizaron las fotografías de una forma más ordenada y exhaustiva, siguiendo la alineación de fachada a dos alturas diferentes, una toma cenital, otra toma general siguiendo el trazado del camino que hay frente a las cuevas. También se realizaron tomas por ambos lados de las pequeñas cercas que conforman los patios y fotografías de detalle en los huecos de puertas y ventanas.

En el levantamiento hubo muchos problemas la alineación de las cámaras, que resultaron en 3 modelos con múltiples problemas que fueron desechados, con la gran cantidad de tiempo que supuso todo el proceso. Finalmente, tras muchos ajustes y alineaciones parciales y optimizaciones de cámaras se consiguió un resultado de muy buena calidad, sin variaciones de iluminación y con los patios completos y otras zonas que no habían aparecido la vez anterior.



Figura 37. Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Mayo. Resultado texturizado. Fuente: Elaboración propia

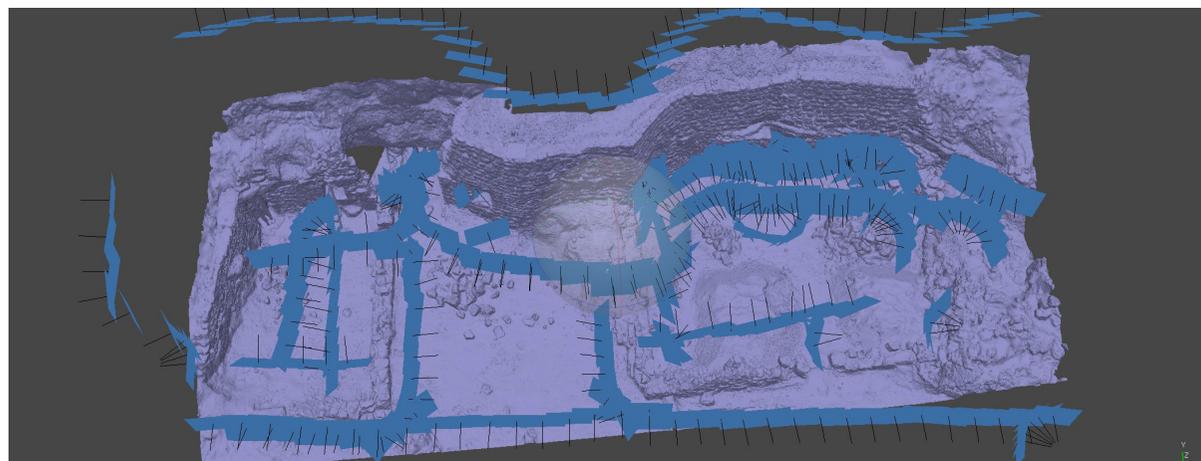


Figura 38. Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Mayo. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
Xiaomi Mi 5s	334	-	607.570	1h 22min	18.971.473	2x8k

Tabla 5. Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada en obras con los datos de Mayo. Fuente: Elaboración propia

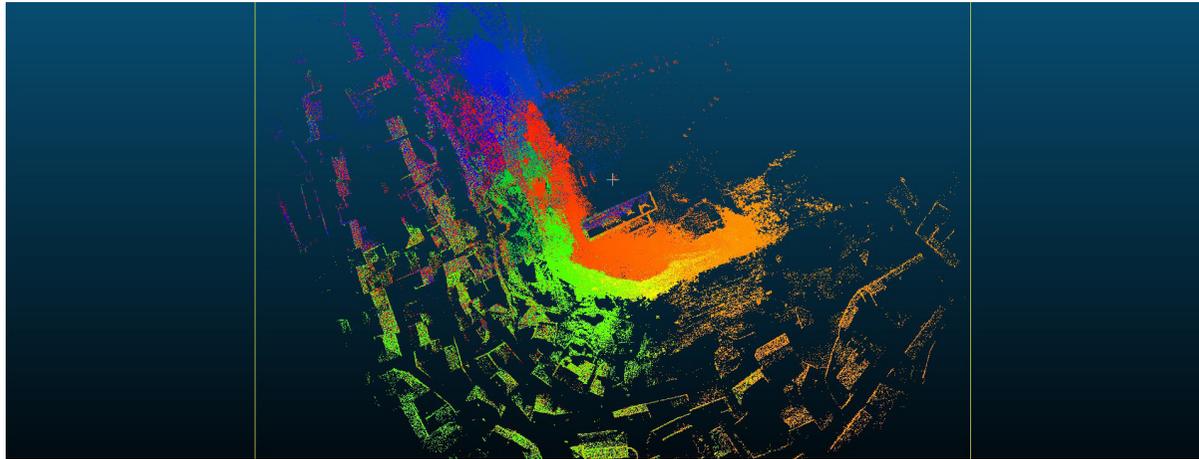


Figura 39. Visualización en CloudCompare de la nube de puntos completa obtenida con el ZebHorizon. Fuente: Elaboración propia

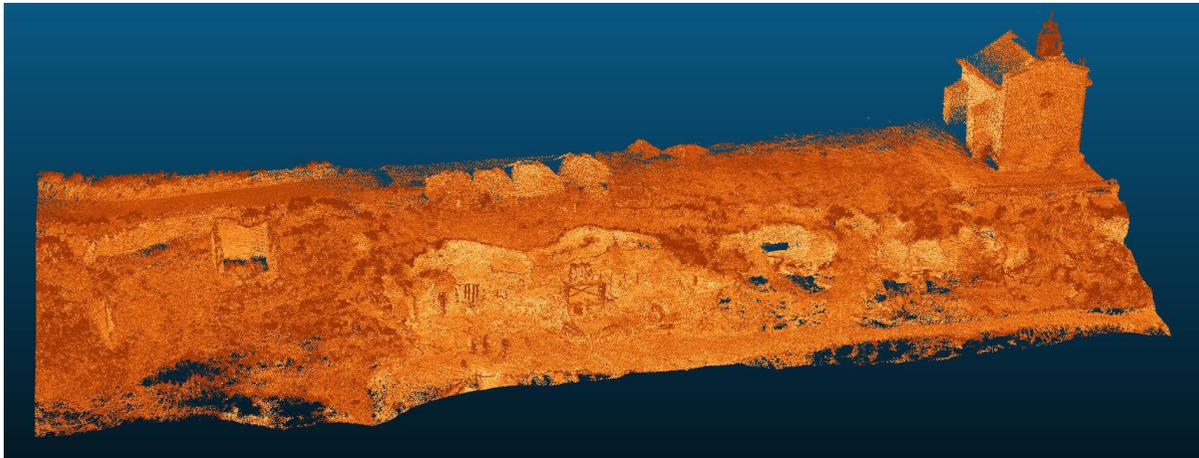


Figura 40. Recorte de la nube de puntos por el entorno de las cuevas en obras. Fuente: Elaboración propia

### 3 Cuevas

Dadas las condiciones de estabilidad y poca iluminación en las que se encuentra el interior de las cuevas, la única toma de datos que se pudo realizar fue la del escáner de mano Zeb Horizon de GeoSlam que realizaron los compañeros de la E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia.

El resultado de esta toma de datos se unificó en una nube de puntos de la zona al completo con un tamaño de 96M de puntos. Para poder trabajar con ese archivo y hacer algo más manejable para otros programas de edición, así como para crear una malla 3d se utilizó el programa CloudCompare.

El primer paso fue recortar la nube de puntos seleccionando la zona norte de las cuevas y dejando una nube de 49.2M de puntos.

Para que el programa pudiera generar una malla 3d necesitaba que los puntos de la nube tengan una orientación,

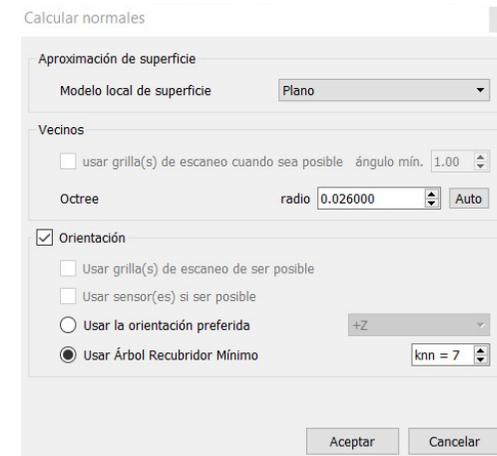


Figura 41. Valores de configuración para el cálculo de normales. Fuente: Elaboración propia

por lo que se tuvo que realizar el cálculo de las normales mediante las herramientas disponibles en el programa

Para la creación de la malla se utilizó el plugin PoissonRecon, incluido en el programa. Con los valores por defecto el resultado era una malla de baja calidad, así que hubo que realizar varios intentos llegar al resultado deseado. Este plugin genera la malla de forma que los bordes del modelo se alinean con el rectángulo delimitador, que se soluciona fácilmente filtrando los valores que interesan en los Campos Escalares y exportando el resultado.

La malla resultante de todo este proceso tiene 21M de polígonos, que al ser una cantidad tan grande hace que, con el equipo disponible, sea importarlo en otros programas para poder editarlo. De este modo, se volvió a recortar la malla dejando solo la parte del interior de las cuevas y el acceso a ellas, reduciendo el poligonaje de la misma a 11.3M.

Esa malla de 11.3M de caras seguía siendo demasiado pesada para abrirla en Blender, así que hubo que hacer un paso previo de limpieza con Meshlab. La limpieza consistió en recortar un poco más los extremos y eliminar los elementos extraños que han quedado flotando fruto del polvo, la suciedad o interrupciones del escáner láser. Se aprovechó también el paso por Meshlab para invertir las caras de la malla, debido a que estaban del revés debido al cálculo de las normales en CloudCompare. La malla resultante de este proceso tiene ahora 9.3M de polígonos.

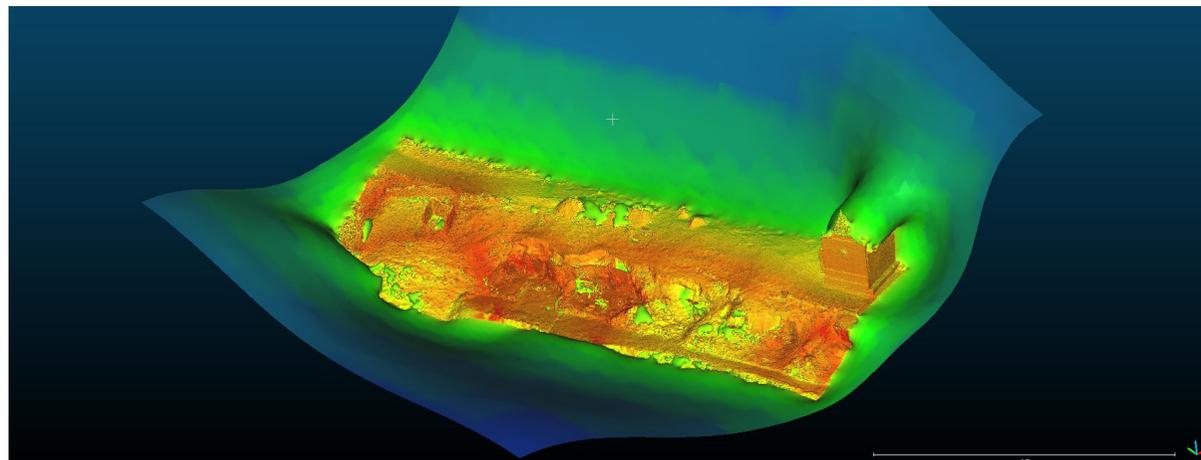


Figura 42. Malla 3D resultante del plugin PoissonRecon en CloudCompare. Fuente: Elaboración propia

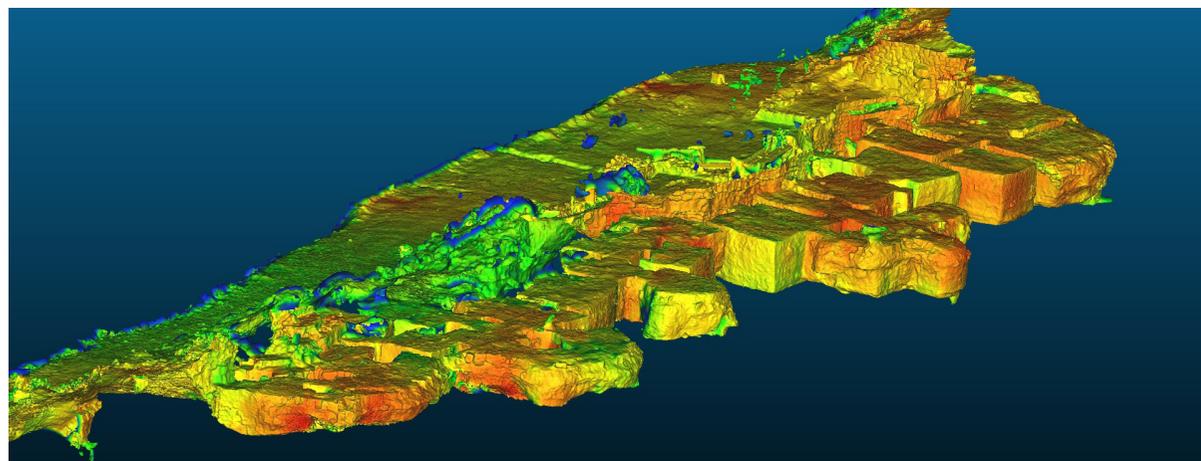


Figura 43. Recorte de la malla 3D mediante los Campos Escalares. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Nube Densa 1	Nube Densa 2	T. Normales	PoissonRecon	Polígonos 1	Polígonos 2
GeoSlam Zeb Horizon	96.167.648	49.202.535	31 min	22 min	21.190.568	9.344.831

Tabla 6. Datos y tiempos del levantamiento del 3D del interior de las cuevas. Fuente: Elaboración propia



Figura 44. Levantamiento de la fachada rehabilitada. Resultado texturizado. Fuente: Elaboración propia

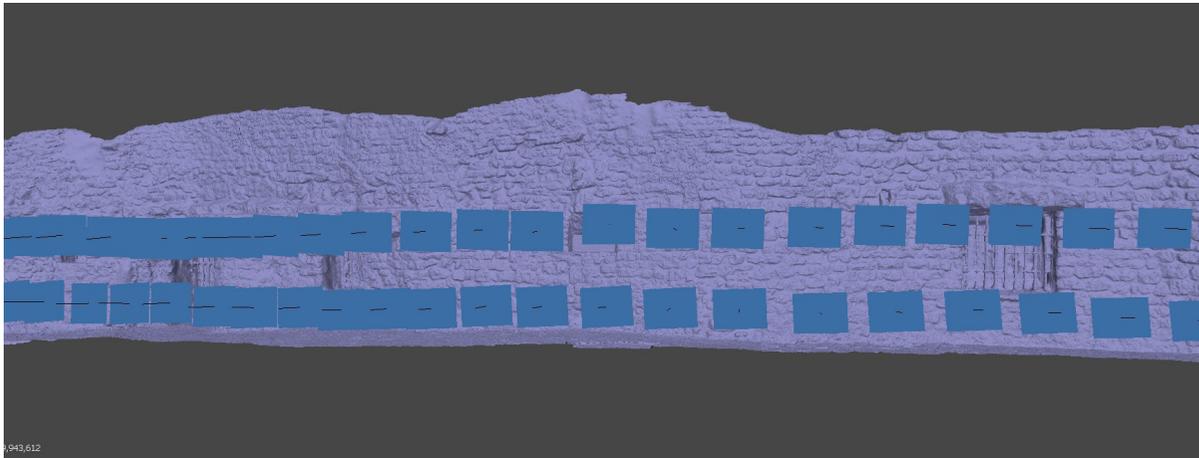


Figura 45. Levantamiento de la fachada rehabilitada. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. Fuente: Elaboración propia

#### 4 Fachada Rehabilitada

Esta larga fachada contiene dos casas cueva, de las cuales una de ellas es de factura completamente nueva, realizada con estructura de hormigón armado y con una distribución y apariencia que pretende recrear una de las originales. La otra de las casas es actualmente inaccesible y únicamente se ha rehabilitado la fachada mientras que el interior se encuentra apuntalado.

La toma de datos para este modelo se realizó en la tercera visita, que al ser un día nublado ha permitido levantar un modelo desiluminado con muy buena calidad.

Dado que esta es una fachada bastante lineal, con la excepción de los huecos de puertas y ventanas, simplemente bastó con realizar las fotografías siguiendo en paralelo la alineación del muro a dos alturas diferentes. Debido a esta sencillez y a que no había grandes diferencias de iluminación las fotografías se realizaron en formato JPG en vez de RAW.

Para el levantamiento se utilizaron 166 fotografías que se alinearon sin problema en su gran mayoría, excepto una zona que tenía menos solape y fue necesario el reseteo y realineación manual. Esto supuso procesar el modelo varias veces y hacer ajustes hasta que en el tercer intento quedó un modelo con un muy buen resultado.

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
Xiaomi Mi 5s	166	-	251.138	1h 34min	19.871.372	2x8k

Tabla 7. Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada rehabilitada. Fuente: Elaboración propia

## 5 Fachada Nueva

Esta casa cueva es la que se sitúa en el extremo sureste del complejo, separada del resto mediante una rampa que comunica el nivel de las casas cuevas con el acceso a la ermita. Al igual que en el caso anterior, esta casa cueva es de nueva construcción, siendo incluso más notorio al haber recreado el dintel de la puerta con mortero.

Del mismo modo que en la fachada anterior, la toma de datos se realizó durante la tercera visita a Trigueros del Valle y, debido a su longitud y disposición de fachada, las fotografías se realizaron en formato JPG a lo largo de dos sets paralelos a la alineación a diferentes alturas. A diferencia de la anterior, en este caso la rampa de acceso a la ermita se encuentra muy cercana y formando un ángulo agudo, que complicó la toma de datos del extremo izquierdo.

Para el levantamiento se utilizaron 58 fotografías dando como resultado un modelo de buena calidad, pero incompleto en su extremo izquierdo. Por este motivo se rehizo el levantamiento reiniciando y ajustando manualmente la alineación de las cámaras, consiguiendo finalmente un modelo completo y con mucha mayor calidad del que se había conseguido anteriormente.



Figura 46. Levantamiento de la fachada nueva. Resultado texturizado. Fuente: Elaboración propia

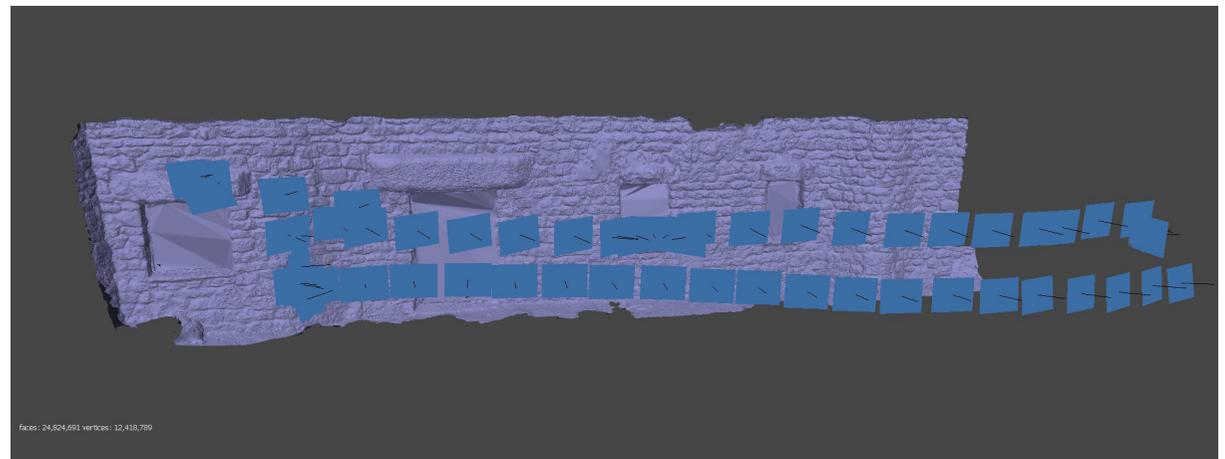


Figura 47. Levantamiento de la fachada nueva. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
Xiaomi Mi 5s	58	-	91.838.371	55 min	24.824.691	1x8k

Tabla 8. Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada nueva. Fuente: Elaboración propia



Figura 48. Levantamiento exterior de la Ermita. Alzado sur texturizado. Fuente: Elaboración propia



Figura 49. Levantamiento exterior de la Ermita. Modelo sólido. Fuente: Elaboración propia

## 6 Exterior de la Ermita

Situada en lo alto del cerro, la Ermita de Nuestra Señora de la Virgen del Castillo preside el pueblo y se encuentra en el nivel inmediatamente superior a las casas cueva.

La ermita se documentó en dos ocasiones diferentes. Para el exterior de la ermita la toma de datos fue durante la segunda visita. En esta ocasión se utilizó el dron DJI Phantom 4 PRO, realizando un vuelo alrededor de la ermita en varios niveles mientras se capturaban las fotografías, así como varias tomas de detalle para los elementos más complejos como son la linterna del crucero y la estructura de la campana. Terminado el vuelo se realizó también una captura fotográfica a nivel del suelo mediante una cámara fotográfica compacta para completar la documentación.

El uso del dron y las capturas con la cámara permitieron obtener un modelo completo de la ermita, incluyendo las cubiertas y detalles elevados que habría sido imposible capturar de otra manera, además de obtener una textura fotográfica de alta calidad.

En el caso del modelo exterior el 3D resultante tiene un total de 19.9M de polígonos y se ha extraído la textura fotográfica en 8 atlas con resolución 4K.

Dispositivo	Polígonos	Textura
DJI Phantom 4 PRO + Cámara	19.882.406	8x4k

Tabla 9. Datos del levantamiento del 3D del exterior de la ermita. Fuente: Elaboración propia

## 7 Interior de la Ermita

La otra ocasión en la que se documentó la ermita fue durante la primera visita, para la cual se utilizó el escáner láser Trimble X7 para hacer un recorrido completo tanto por interior como el exterior de la misma.

Para la toma de datos se fue estacionando el escaner bajo cada dintel o paso de hueco además de dos o tres estacionamientos más por cada estancia o zona, dando como resultado un total de 22 escaneados completos para el interior de la ermita.

El modelo interior consta de 24.9M de polígonos y, dado que la toma de datos no incluyó captura fotográfica, se ha extraído una textura en escala de grises basada en la oclusión ambiental formada por 8 atlas con resolución 4K también.

El procesado de ambos modelos de la ermita se realizó en el Laboratorio de Fotogrametría debido a los programas necesarios para dicho trabajo.



Figura 50. Levantamiento interior y exterior de la Ermita. Sección con mapa de Oclusión Ambiental. Fuente: Elaboración propia

Dispositivo	Nº Estaciones	Polígonos	Textura
Trimble X7	22	24.917.795	8x4k AO

Tabla 10. Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada nueva. Fuente: Elaboración propia



Figura 51. Levantamiento de la panorámica. Resultado texturizado. Fuente: Elaboración propia



Figura 52. Levantamiento de la panorámica. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. Fuente: Elaboración propia

## 8 HDRI/Entorno

Para el entorno se valoraron varias opciones, siendo la de utilizar una fotografía 360° HDRI personalizada la que parecía más interesante, debido a que reduce la cantidad de polígonos de la escena además de servir de método de iluminación. La toma de datos para el HDRI se iba a realizar más tarde, pero al encontrar otra solución utilizando nubes de puntos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) se descartó esta opción.

### Levantamiento fotogramétrico de panorámica

Otra de las opciones que se valoraba era la de realizar un levantamiento fotogramétrico de Trigueros del Valle desde lo alto del cerro para tener más sensación de profundidad.

Para tal fin, durante la tercera visita se realizó un set fotográfico del entorno del pueblo con la cámara Panasonic Lumix DSC-TZ10. Siguiendo el borde del cerro se fueron realizando fotografías en dirección al pueblo manteniendo un solape mínimo para el levantamiento del entorno cercano.

El levantamiento del modelo consta de 75 cámaras realizadas en formato JPG dando como resultado un modelo sencillo y con gran dispersión debido a la gran extensión de terreno y la poca documentación.

Dispositivo	Nº Cámaras	T. Alineado	Nube ligera	T. Procesado	Polígonos	Textura
Panasonic Lumix DSC-TZ10	75	4min	95.404	52 min	5.923.559	4x8k

Tabla 11. Datos y tiempos del levantamiento del 3D del entorno del pueblo. Fuente: Elaboración propia

### Recopilación de los datos obtenidos

Finalizada la parte correspondiente con el levantamiento de los modelos fotogramétricos se procede a poner en común los resultados más característicos de los modelos obtenidos, englobados en la siguiente tabla.

Categoría	Método	Origen	Polígonos	Peso Archivos	Textura
1_Base	Dron - Ortofoto	DJI Matrice 300 RTK	-	1.58 GB	21.900x15.850px
	Dron - Vídeo	DJI Phantom 4 PRO	693K	11.5 GB	2x8K Color
2_Fachada_Obras	Cámara	Xiaomi Mi5s - RAW	18.9M	5.16 GB	2x8K Color
3_Cueva	Escaner de mano	GeoSlam Zeb Horizon	21.2M	759 MB	-
4_Fachada_Rehab	Cámara	Xiaomi Mi5s - JPG	19.8M	3.91 GB	2x8K Color
5_Fachada_Nueva	Cámara	Xiaomi Mi5s - JPG	24.8M	3.40 GB	1x8K Color
6_Ermita_Exterior	Dron - Foto	DJI Phantom 4 PRO + Cámara	19.9M	2.66 GB	8x4K Color
7_Ermita_Interior	Escaner estático	Trimble X7	24.9M	3.37 GB	8x4K AO
8_HDRI	Panorámica	Panasonic Lumix DSC-TZ10	5.9M	2.21 GB	4x8K Color

Tabla 12. Resumen de los distintos modelos realizados. Fuente: Elaboración propia



Figura 53. Ortofoto de la zona realizada con el dron DJI Matrice 300 RTK. Fuente: Elaboración propia



Figura 54. Diferencia de resolución de la ortofoto de GoogleMaps frente a la realizada. Fuente: Elaboración propia



Figura 55. Visualización de la malla 3D, solido y renderizado. Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3. Optimización para visualización

Qué es la optimización y por qué motivo usarla.

Los levantamientos fotogramétricos generan unos modelos 3D de gran calidad y precisión, que los hace ideales para la documentación y catalogación de elementos patrimoniales y/o arqueológicos. Sin embargo, un tema importante para este campo es la divulgación de los resultados obtenidos y la calidad y, sobre todo, cantidad de polígonos de los modelos resultantes de los levantamiento fotogramétricos hacen que sea complicado o incluso prácticamente imposible visualizarlos en un ordenador convencional de forma individual y ya no hablemos de todos juntos y/o en un dispositivo móvil o smartphone. Por este motivo es indispensable hacer una optimización de estos modelos, reduciendo su poligonaje y el peso de los archivos sin perder la calidad visual de los mismos en el proceso.

Para conseguir este objetivo el proceso que utiliza desde hace años en la industria del videojuego, que es la que tradicionalmente ha utilizado el 3D para visualización, es el proceso conocido como *retopología*, que consiste en hacer un nuevo modelo 3D con una apariencia similar al original, pero con una *topología* más ordenada, a ser posible basada en *quads* y con un poligonaje muy reducido.

Con este proceso se pierde completamente el detalle de los modelos, así que para recuperarlo se utilizan una serie de *mapas de texturas* que los motores de renderizado interpretan para replicar esa calidad original.

Aunque hay una gran variedad de mapas de textura, que en algunos casos dependen del programa y/o el método utilizado, el sistema más común es el de *materiales PBR* cuyos principales mapas son:

- Mapa *diffuse* que aporta la información fotográfica y/o de color.
- Mapa de *normales* que replica el relieve y detalle perdido.
- Mapa de *roughness* que aporta la información del brillo y rugosidad.
- Mapa de *oclusión ambiental* que indica las zonas donde se genera un sombreado producido por una iluminación global difusa.

## Problemáticas y soluciones en los métodos usados

Como en todo trabajo de investigación se ha partido desde la base de conocimientos previos sobre los distintos procesos y programas, adquiridos tanto mediante cursos como de forma autodidacta a lo largo de los últimos meses/años. No obstante, este proceso de investigación siempre supone el hecho de enfrentarte a errores y problemas que hay que solventar.

Este bloque siguiente se basa principalmente en un pequeño seguimiento de algunos de estos problemas que han surgido durante la elaboración de este trabajo y cómo se han ido resolviendo. Algunos de estos problemas han estado relacionados con el desconocimiento de ciertos programas o por la utilización de archivos tan pesados que generan problemas que no ocurren al trabajar con otros archivos más pequeños, mientras que otros han sido causados por la capacidad de procesamiento de los equipos usados.

### Eliminar geoposicionamiento

Los archivos resultantes del levantamiento de la ermita y del interior de las cuevas están geoposicionados y, por lo general, los programas dedicados a la edición de modelos 3D no orientados a topografía no están preparados para trabajar con datos de posición con números tan grandes, por lo que al importarlos realizan redondeos en los decimales para simplificar estos números, desvirtuando completamente el 3D en el proceso.

En estos casos, para solucionar estos problemas, se ha importado el modelo en CloudCompare y editado los valores de coordenadas, trasladando el modelo a un punto más cercano al 0,0,0, para hacer que sea más manejable para el resto de programas.

Coordenadas	X	Y	Z
Original	362857.648926	4632313.312655	785.196106
Nuevo	57.64893	13.31266	85.19611

Tabla 13. Ejemplo de la simplificación de coordenadas en el 3D del exterior de la Ermita. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 56. Error en la importación debido al geoposicionamiento. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 57. Visualización correcta tras eliminar el geoposicionamiento. Fuente: *Elaboración propia*

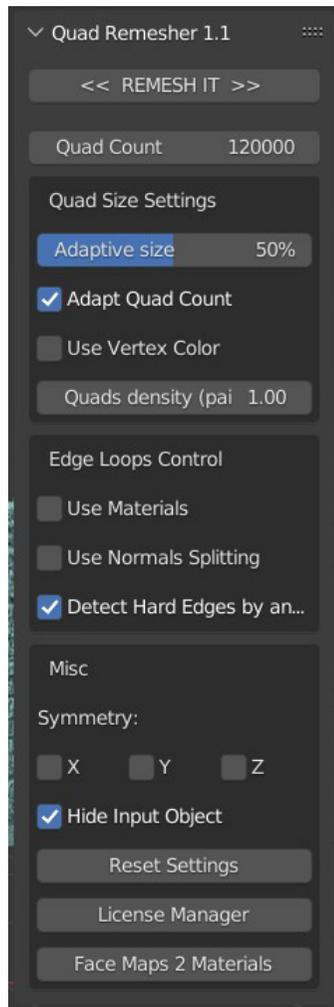


Figura 58. Panel de configuración de Quad Remesher en Blender. Fuente: Elaboración propia

## Retopología con Blender

Para empezar con la optimización se ha utilizado Blender como software de edición 3D y *bakeado* de mapas de texturas, puesto que es un programa de código abierto muy versátil y utilizado para este tipo de procesos.

Hasta la fecha los modelos utilizados en trabajos previo para realizar una retopología no sobrepasaban los 2 millones de polígonos, por lo que el rendimiento del equipo era suficientemente bueno, pero al llegar utilizar en este trabajo modelos de hasta 25 millones de polígonos la cosa cambia notablemente.

Blender es un programa que consume mucha memoria RAM por lo que cargar estos modelos tan pesados simplemente se convirtió en una tarea que excede las capacidades del equipo disponible (con 16GB de memoria RAM DDR4). Tras multitud de cierres inesperados y bloqueos del programa la conclusión fue que el tamaño máximo de los archivos que puede manejar este equipo ronda los 10-12 millones de polígonos.

Por este motivo hubo que reducir la calidad de los modelos originales en Metashape o en Meshlab mediante el proceso de *decimado*, que colapsa puntos adyacentes en función de la distancia perdiendo así definición, para así después importarlos en Blender.

Una vez ya importado en Blender el modelo decimado, primer paso fue limpiar y colocar correctamente la malla 3D. Para ello hay que centrar, escalar y orientar el 3D, así como situar en origen de coordenadas en el modelo o próximo a él, para que las acciones y movimientos sean más fáciles de realizar.

Este modelo de alta definición o *HighPoly* (HP en adelante) proveniente del levantamiento fotogramétrico siempre contendrá algunos fragmentos sueltos que se hayan generado flotando y sin conexión con el modelo principal, así como aristas y vértices que no generan polígonos. Estos son algunos tipos de elementos conocidos como *non-manifold* que generan multitud de problemas y añaden un peso innecesario al archivo.

Tras un tratamiento inicial de limpieza se procedió a hacer la retopología. Si bien se puede realizar una retopología completamente manual, es un proceso largo y tedioso y existen diversos métodos para realizar una retopología semiautomática.

Para la retopología se utilizó un add-on de Blender llamado *Quad Remesher* cuyas características más destacables son su versatilidad con el número de polígonos resultante y la generación de una topología de quad limpia y continua. Este add-on permite seleccionar un número de polígonos objetivo, así como varias opciones para que los nuevos polígonos en forma de quads se formen adaptándose más o menos a la geometría original.

Debido a la gran cantidad de polígonos que tienen estos modelos además de espacios considerados non-manifold, han supuesto que QuadRemesher no finalizase el proceso de retopología.

Se realizó una primera retopología semiautomática empleando Instant Meshes, para después realizar una segunda retopología con QuadRemesher debido a que éste genera una malla más uniforme, continua y adaptada al modelo original.

Tras el procesado por parte del add-on se genera un nuevo modelo de bajo poligonaje que nombraremos como *LowPoly* (LP en adelante) con una topología formada con quads y relativamente ordenada y adaptada a las formas del modelo original HP.

No obstante, debido a la reducción tan grande de polígonos, pasando de decenas de millones a unas decenas de miles, se generan algunos artefactos así como *tris* y *ngones* que hay que arreglar a mano en la medida de lo posible. Llegados a este punto, con un número de polígonos reducido, es cuando se pueden editar los posibles fallos generados

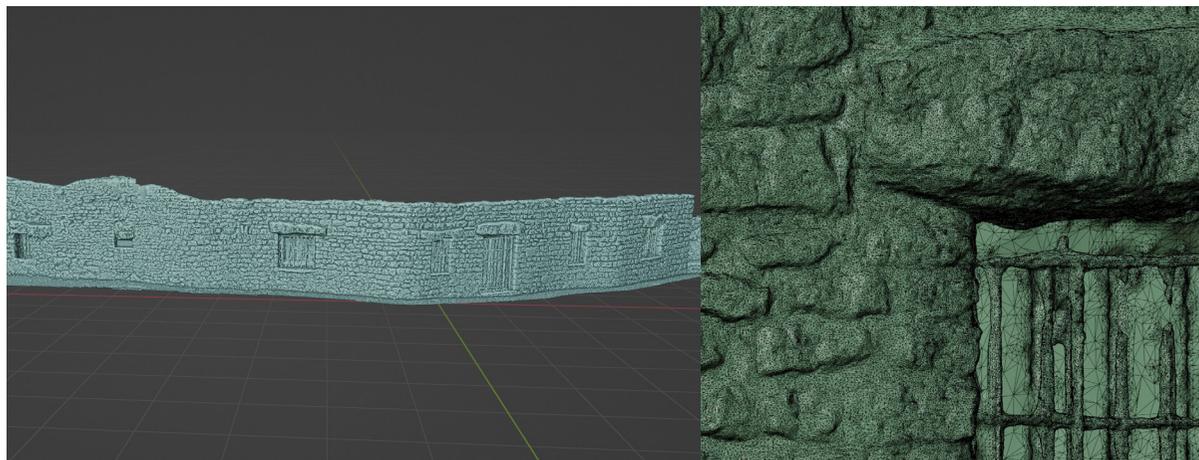


Figura 59. Visualización de aristas del modelo High Poly. Vista general y detalle Fuente: *Elaboración propia*

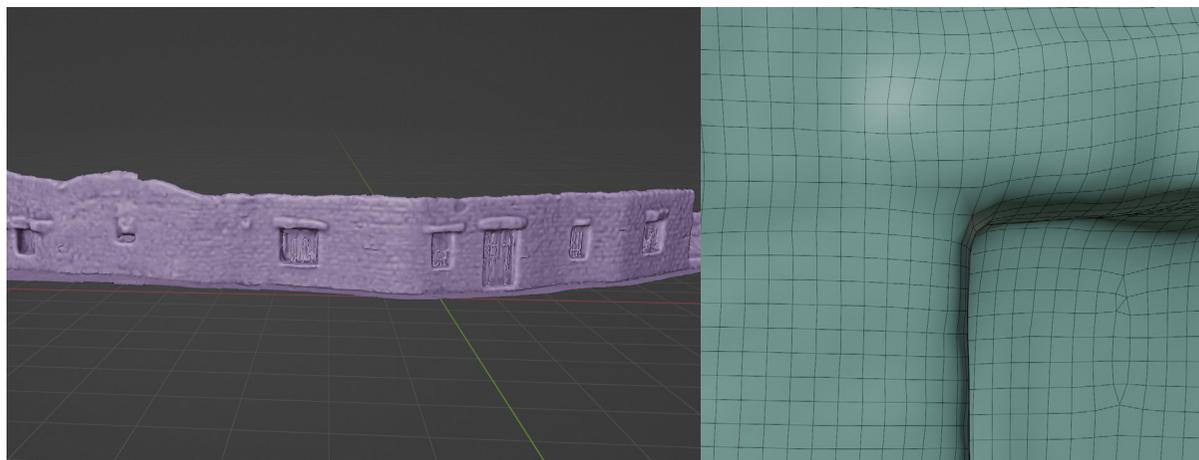


Figura 60. Visualización de aristas del modelo Low Poly. Vista general y detalle Fuente: *Elaboración propia*

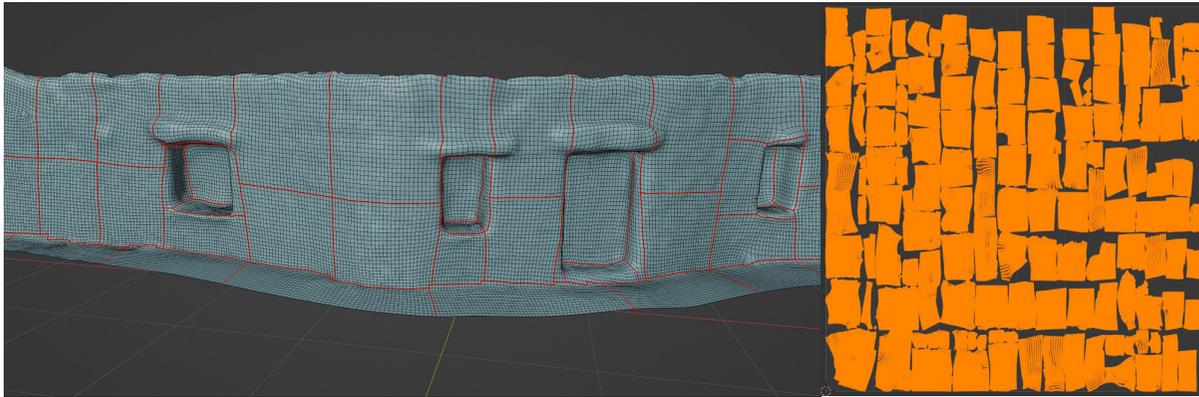


Figura 61. Seams en el modelo LP para desplegar las UV y su mapeado UV correspondiente ya optimizado. Fuente: Elaboración propia

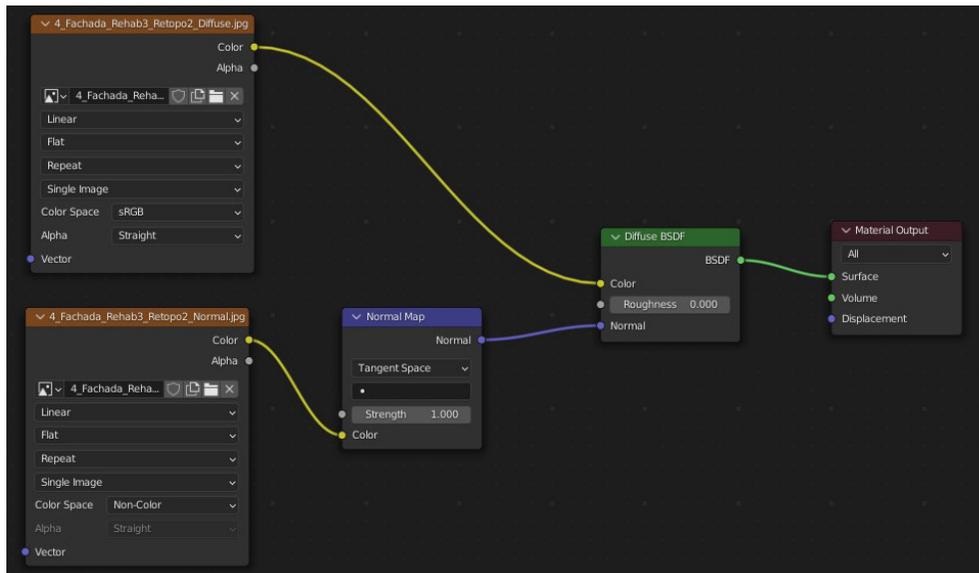


Figura 62. Árbol de nodos del material del modelo LP con los mapas Diffuse y Normal. Fuente: Elaboración propia

por Metashape, eliminar objetos que no se podían evitar en la toma de datos, etc...

Teniendo el LP limpio el siguiente paso es organizar las UV del modelo LP. Este proceso se puede hacer de forma automática en Blender mediante la herramienta "Smart UV Project" o seleccionando vértices de recorte o *seam* de forma manual y usando la herramienta "Unwrap"/Desplegar.

Aunque el propio Blender se encarga de organizar las distintas islas UV de una forma relativamente ordenada, siempre se pueden recolocar a mano para optimizar más el espacio que ocupan en el mapa de textura para tener más resolución.

Con las UV preparadas el siguiente paso fue crear los mapas de texturas para recuperar la calidad perdida mediante el proceso conocido como *bake*. Primeramente se transfiere/bakea la textura fotográfica del HP al LP. Para este proceso hay que ir al apartado de Shading de Blender y preparar los materiales y texturas de cada uno de los modelos en la ventana de nodos. El modelo HP trae integrado ya su mapa de UV y textura al exportarlo de Metashape, así que por lo general ya aparecerá preparado el árbol de nodos.

Para el caso del LP hay que crear un nuevo material sobre el que se van a aplicar las nuevas texturas así como una imagen nueva en blanco para cada mapa que se vaya a bakear. Creada y guardada la imagen se abre un nodo de textura de imagen para cada una y se deja seleccionado cada imagen en su sitio.

El siguiente paso fue configurar los ajustes para el proceso de bakeo. Para ello hay que abrir el panel de renderizado de la paleta de herramientas, seleccionar el motor de renderizado cycles y, en el apartado de “Bake”, elegir el mapa a trabajar y la distancia de extrusión efectiva para transferir la información. Los mapas imprescindibles que hay bakear son el *Diffuse*, el *Normal* y el *Ambient Occlusion*.

Una vez finalizado el proceso de bake, se limpiaron las imperfecciones en las imágenes y se creó el mapa de Roughness con Photoshop, a partir del mapa Diffuse. Para ello basta con crear 3 máscaras de ajuste:

- Tono/Saturación para desaturar la imagen
- Invertir
- Niveles para bajar los tonos medios y aclarar la imagen.

Finalizados estos procesos, el modelo estaría optimizado y listo para ser utilizado en visores como el que trae Windows 10/11 por defecto o en visores web como Sketchfab. En el siguiente enlace de Sketchfab se encuentran subidos en una colección los distintos modelos optimizados para este trabajo.

<https://sketchfab.com/dsenovilla/collections/tfg-casas-cueva-en-trigueros-del-valle>

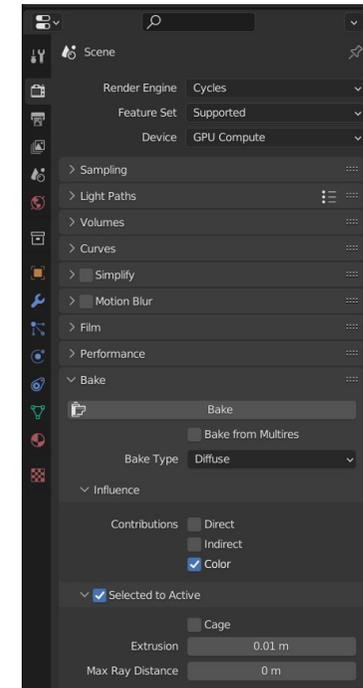


Figura 64. Panel de configuración del motor de render cycles para bakear el mapa Diffuse  
Fuente: Elaboración propia

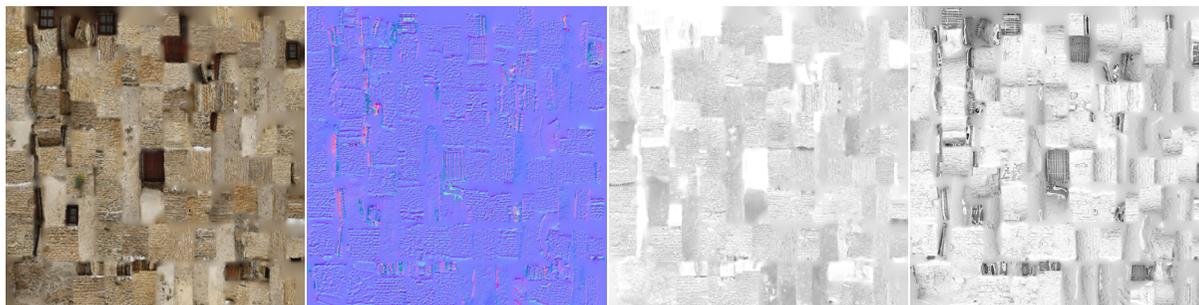


Figura 63. Mapas de textura resultantes: Diffuse, Normal, Roughness y Ambient Occlusion  
Fuente: Elaboración propia



Figura 65. Código QR para visualización de los modelos optimizados en Sketchfab  
Fuente: Elaboración propia

## Modificaciones al esquema de trabajo

Con la forma de trabajo explicada anteriormente el modelo resultante tenía cerca de 300 mil polígonos que, si bien son una parte ínfima de los cerca de 20 millones originales, siguen siendo demasiados para la visualización fluida en tiempo real a través de Sketchfab en tablets y smartphones. Finalmente, se optó por optimizar el modelo reduciendo el poligonaje a valores cercanos a 100 mil. Dado que se iba a repetir la optimización, se aprovechó para realizar algunos cambios para optimizar mejor el tiempo y flujo de trabajo.

Si bien el flujo de trabajo anterior es completamente válido, Blender es un programa que utiliza una gran cantidad de memoria RAM en algunos procesos como la importación o el bakeado, y el gran tamaño de los modelos que se han levantado para este trabajo han supuesto muchos problemas de rendimiento y cierres de programa en el PC utilizado. Para intentar solventar este problema se duplicó la capacidad de memoria RAM en dicho equipo, pasando de 16GB a 32GB DDR4.

Si bien el rendimiento mejoró sustancialmente en muchos procesos, no solucionó completamente el problema. Debido a esto, se buscaron alternativas para depender menos de Blender para ciertos procesos que consumen mucha RAM y tiempo de cara a los siguientes modelos 3D.

El primer gran cambio fue introducir en el flujo de trabajo el programa Substance Painter para el proceso de bakeado, pues realiza el bakeado de todos los mapas a la vez, excepto el diffuse, con gran rapidez y consumiendo muy pocos recursos del ordenador. Simplemente hay que cargar el modelo LP y en el panel de bakeado seleccionar el modelo HP de referencia y los mapas a ejecutar.

Para generar el mapa diffuse con las nuevas UV del modelo LP la solución tomada pasó por importar el modelo LP al archivo de trabajo de Metashape para volver a proyectar la textura a través de las cámaras originales, consiguiendo además mejor definición que si hubiese bakeado el mapa desde el HP al LP. No obstante, para que esto funcione perfectamente ambos modelos tienen que estar colocados exactamente en la misma posición, de modo que a la hora de editar en Blender no se ha de cambiar ni el origen ni la escala del modelo, así como revertir los giros y/o traslaciones que haya realizado antes de reimportar a Metashape.

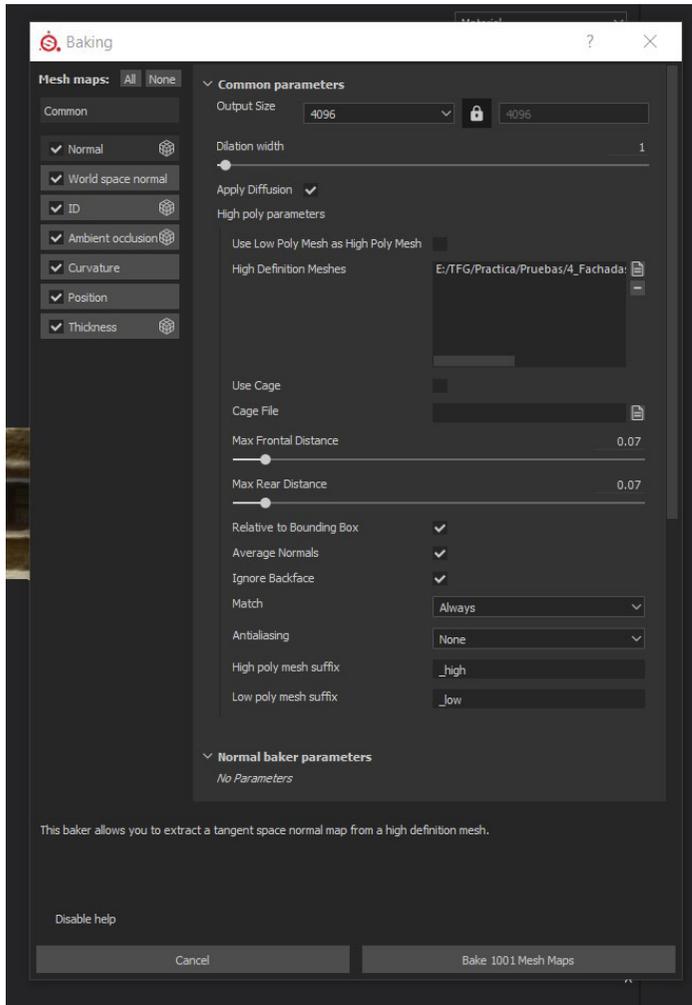


Figura 66. Panel de configuración para el bakeado de mapas en Substance Painter.  
Fuente: Elaboración propia

## Utilización de Nanite en Unreal Engine 5

Uno de los principales motivos que sirvieron de idea generadora de este TFG fue la presentación de la tecnología *Nanite* en *Unreal Engine 5* (UE5 en adelante) por parte de Epic Games, la empresa que lo desarrolla. Esta nueva tecnología permite utilizar modelos 3D con una gran cantidad de polígonos sin que el rendimiento se vea afectado. Esta tecnología combina muy bien con los modelos fotogramétricos, así que por ese motivo se pensó en realizar una visita virtual utilizando ambas tecnologías.

Durante la realización de este trabajo de fin de Grado, fueron necesarias varias sesiones de formación y búsqueda de documentación para la correcta utilización de Unreal Engine. Debido a que la versión 5 es de reciente lanzamiento (Abril de 2022) y contiene multitud de novedades y cambios en interfaz, no existe apenas información completa que facilite su manejo y en algunos aspectos ha sido complicado empezar.

Una vez levantados los modelos fotogramétricos se hizo la prueba de importarlos a UE5, pero debido al tamaño la carga no llegaba a realizarse y por ese motivo se procedió a la optimización por retopología. Una vez optimizados, al importar estos modelos a UE5 el resultado no fue el esperado pues no se aprovechaban de la tecnología Nanite y además la gestión de texturas no era del todo correcta debido al flujo de trabajo utilizado.

Investigando la causa de estos problemas se observó que se debe a una incompatibilidad entre formatos, pues Blender utiliza para el mapa de normales el formato de OpenGL, mientras que Unreal utiliza el formato de DirectX. El mapa de normales es una imagen RGB en la que cada uno de los canales posee información de movimiento en cada uno de los ejes XYZ. Pues la diferencia entre los sistemas OpenGL y DirectX es que el canal verde está invertido uno respecto del otro. En todos los programas de 3D hay opción de voltear este canal, por lo que no hay ningún problema, pero hay que ser consciente de ello y voltearlo cuando sea necesario.

Durante la investigación de estos problemas se encontró un video en Youtube de William Faucher en el cual realiza un proceso completo de levantamiento fotogramétrico, preparación e importación a UE5. En el video explica que Nanite si bien soporta modelos de 1 a 6 millones de polígonos, los modelos resultantes del levantamiento fotogramétrico superan este valor con creces, alcanzando los 19 a 25 millones. También explica que Unreal trabaja siempre con tris, por lo que si se importa un modelo con quads lo va a reconvertir en tris igualmente.



Figura 67. Edición de puertas y ventanas con Booleanas. Vista frontal Fuente: Elaboración propia



Figura 68. Edición de puertas y ventanas con Booleanas. Vista en planta Fuente: Elaboración propia

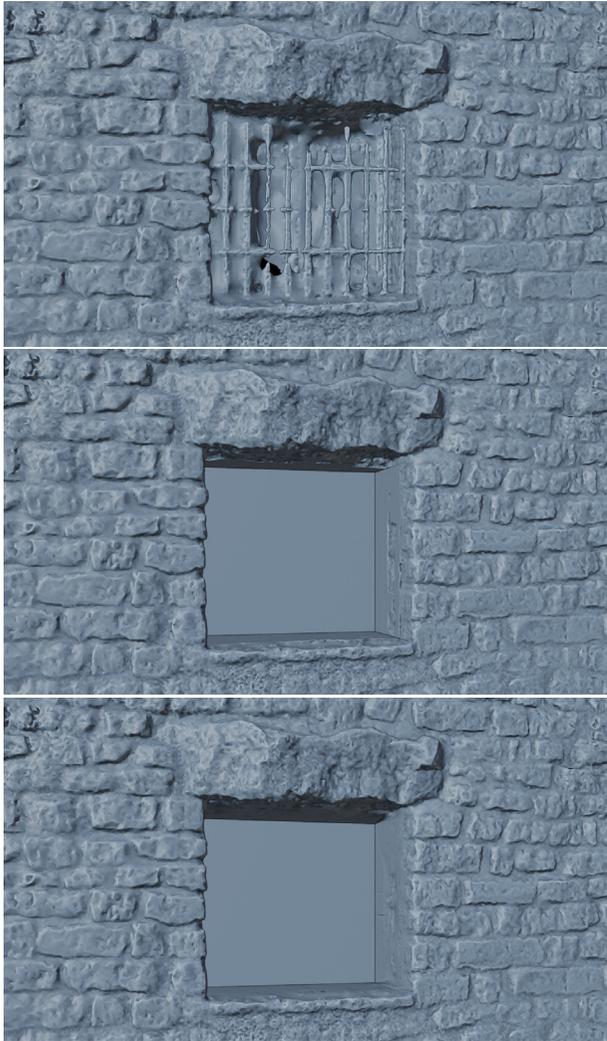


Figura 69. Edición de ventana: Original, tras la booleana y tras el esculpido y suavizado.  
Fuente: Elaboración propia

Con esta nueva información se comenzó una nueva versión partiendo desde el modelo fotogramétrico y obviando las versiones optimizadas con quads. Directamente desde Metashape se ha decimado el modelo original HP para crear un modelo MidPoly (MP) de unos 5 millones de polígonos, proyectando las cámaras para crear la textura Diffuse y creando un mapeado de normales desde el HP al MP desde el propio Metashape.

El siguiente paso fue exportarlo a Blender para hacer una limpieza básica, eliminando geometría sobrante y non-manifold, y editar o esculpir si fuese necesario. Al estar lejos del límite de RAM que puede trabajar el PC usado con Blender, de unos 10-12 millones de polígonos, el rendimiento es mucho mejor, rápido y fluido que en la forma de trabajo anterior.

En los modelos de las fachadas, las ventanas tienen un enrejado que se superpone a la carpintería y esos son unos elementos que siempre resultan problemáticos en los levantamientos fotogramétricos. Para solucionar esto se han editado los huecos de ventanas y puertas utilizando *booleanas* y suavizando los resultados con la herramienta de esculpido.

Al borrar elementos o generar nueva geometría al editar el modelo se volvió necesario rehacer las UV pues había elementos que sobraban o faltaban, respectivamente. Por ello y al igual que en la anterior versión de trabajo, hay que conservar el origen de coordenadas y revertir giros y traslaciones antes de reimportar el modelo en Metashape para que esté situado exactamente en el mismo sitio y se puedan reproyectar las texturas y bakear los mapas. En esta ocasión, en vez de crear el mapeado UV a mano o realizarlo de forma automática en Blender es mejor realizarlo en Metashape, pues el algoritmo que tiene organiza de una forma más óptima las distintas islas dentro de la imagen final y deja menos espacios vacíos.

Llegados a este punto el modelo debería funcionar bien con Nanite en UE5, pero aparecieron nuevos problemas, en este caso relacionados con los formatos de archivos a utilizar. Habitualmente se ha trabajado con el formato .OBJ (más su archivo .MTL que contiene la información de las UV y los mapas de textura asociados), que es un formato libre, pero UE5 trabaja mejor con el formato .FBX, propiedad de Autodesk aunque ampliamente utilizado en la industria también. Además, Unreal requiere que la opción de "suavizado de caras" esté activada a la hora de guardar el archivo .FBX o de lo contrario no importará el archivo.

Por estos motivos y dado que Metashape no da la opción de activar el suavizado de caras al exportar en .FBX la solución fue volver a pasar por Blender, para orientar y ajustar el origen así como para exportar el .FBX correctamente.

### Corrección de errores para el sistema UDIM

Con los pasos anteriores ya se pudo importar correctamente el modelo 3D a UE5, activar Nanite y que se visualice correctamente. No obstante, durante el proceso se ha observado que la configuración de los mapeados UV no están bien organizados según el sistema *UDIM* y si bien el 3D se visualiza bien todas las UV están superpuestas sobre la misma celda, lo que impide hacer modificaciones y que funcione todo como un único material en UE5.

La problemática radicaba en que en Metashape existe una opción a la hora de exportar el modelo que permite utilizar en sistema de trabajo UDIM, separando las UV en distintas celdas y guardando los mapas de texturas según la nomenclatura UDIM. Por algún motivo, esta opción solamente está disponible al exportar en formato .OBJ.

Se rehizo de nuevo todo el proceso evitando crear los mapas Diffuse y Normal desde el principio en el modelo MP de Metashape, puesto que para la limpieza y edición en Blender no son necesarios. Terminada la edición se reimporta en Metashape para crear los dos mapas, exportando en esta ocasión el 3D en formato .OBJ y habilitando el sistema UDIM.

En el siguiente paso por Blender, además de centrar el 3D hubo que hacer un pequeño ajuste respecto a las UV, pues si bien Blender ya acepta de forma nativa el sistema UDIM y separa las UV en las distintas celdas, no relaciona las celdas con los mapas de textura correspondientes y crea un material para cada celda UDIM. Solucionar esto es sencillo, simplemente hay que borrar todos los materiales menos uno y en el apartado de "UV Editing" cambiar el origen de la imagen de "Single Image" a "UDIM Tiles" y crear tantas celdas como sea necesario, seleccionando el archivo correspondiente a cada celda.

Hecho esto los siguientes pasos serían igual que los realizados anteriormente aprovechando lo mejor de cada iteración, es decir, exportar el 3D desde Blender en formato .FBX con el suavizado de caras activo, bakear el resto de mapas desde Substance Painter, retocarlos en Photoshop para finalmente importar a UE5.

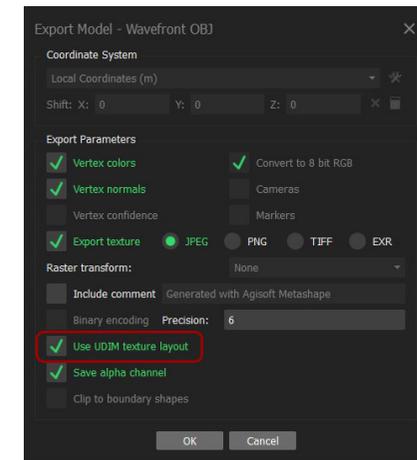


Figura 70. Configuración de exportación en formato .OBJ en Metashape. Fuente: Elaboración propia

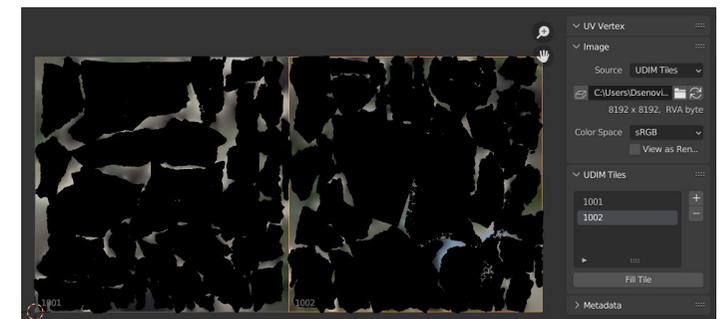


Figura 71. Configuración de "UDIM Tiles" en Blender. Fuente: Elaboración propia

## Esquema resumen métodos de trabajo

Después de todos estos procesos, modificaciones y cambios que se han producido mientras se realizaba la optimización de los modelos, puede resultar algo confuso seguir la lectura, por lo que el esquema siguiente refleja de forma resumida y en formato gráfico todos estos pasos que se han seguido en cada una de las iteraciones.

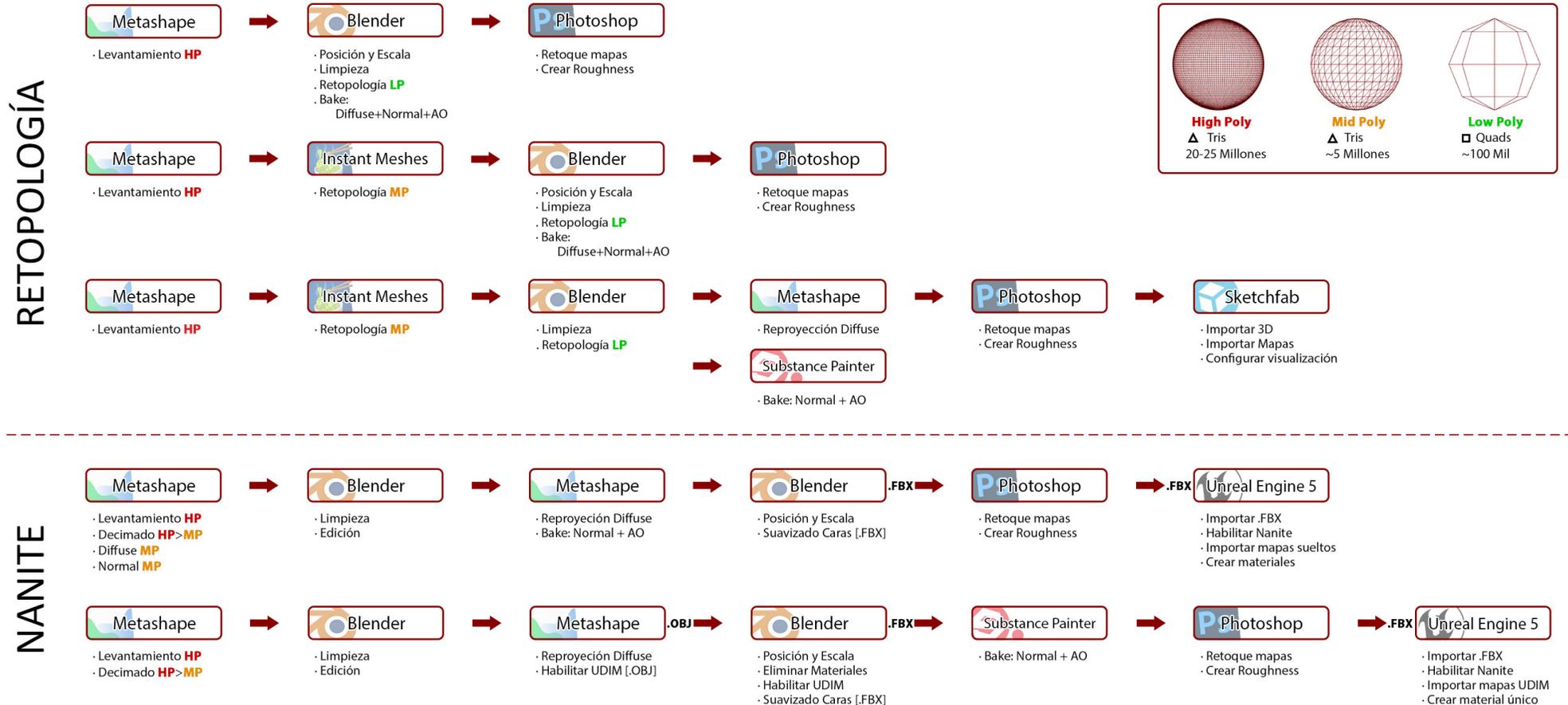


Figura 72. Esquema resumen de los métodos de trabajo utilizados. Fuente: Elaboración propia

#### 2.2.4. Reconstrucción de las cuevas

La zona principal del trabajo es la que se centra en dos de las cuevas que actualmente están en un proceso de obras de rehabilitación. La toma de datos se ha realizado en medio de este proceso de obras, por lo que en los modelos 3D levantados nos encontramos con piedras sueltas, materiales y aperos de obra y zonas derrumbadas. Por este motivo, el proceso de retopología y limpieza básica que se ha utilizado en el resto de modelos 3D no es suficiente y hubo que realizar un trabajo de edición más exhaustivo y reconstrucción del estado hipotético en el que se encontraban estas cuevas cuando estaban habitadas entre principios y mediados del siglo pasado.

Son dos los modelos 3D a editar para este caso: el número 2, que incluye la fachada de las dos cuevas y está levantado mediante fotogrametría; y el número 3, que es el interior de las propias cuevas que está levantado a partir de la nube de puntos del escáner de mano Zeb Horizon. Cada uno de los modelos tiene sus problemáticas y objetivo distinto, por lo que la forma de solucionarlas ha sido diferente en cada caso también.



Figura 73. Estado actual del exterior e interior de las casas cueva en proceso de rehabilitación. Fuente: *Elaboración propia*

## 2 Fachada Obras

Cuando se realizó la toma de datos para levantar la fachada ya se había llevado a cabo parte del mantenimiento y se había reconstruido y levantado la fachada de una de las casas cueva hasta una altura de poco más de 3m. No obstante, la otra fachada aún se encontraba en un estado pésimo en el que la mitad de la fachada se había derrumbado, llevándose parte del pasillo de acceso con ella. Por esto mismo había presentes varios puntales que sujetan la zona y multitud de piedras alrededor para reconstruirla. Evidentemente, todos estos objetos han quedado reflejados en el modelo 3D y hay que eliminarlos así como reconstruir la parte que está derrumbada.

Para este proceso se utilizó Blender y una versión MP del 3D con 4 millones de polígonos, procedente del levantamiento fotogramétrico y decimado directamente en Metashape. Este tamaño mantiene una calidad aceptable y es manejable a la hora de editar, además de permitir incorporar Nanite en el resultado final.

La forma de realizar esta reconstrucción se podría asemejar al uso de un “pincel de clonar”, presente en multitud de software de tratamiento de imágenes, pero llevándolo al ámbito 3D. Es decir, no solo hay que clonar la imagen de la textura, sino que también el modelado 3D en sí. Para ello se han seleccionado partes del modelo perteneciente a las zonas derrumbadas, aperos de obra y piedras sueltas y se han eliminado. De la misma forma, se han seleccionado distintas zonas que usar como origen y se han duplicado, llevandonos esa sección de 3D duplicada al lugar que queremos tapar para utilizarla a modo de parche.

La parte complicada de este proceso ha consistido en la fusión de estos distintos parches entre sí y con el modelo 3D base para que la superposición sea imperceptible a simple vista. Para ello se tuvieron en cuenta dos “técnicas” principalmente:

- La intersección tiene que darse entre dos superficies convexas para evitar que haya huecos en la geometría final o que haya normales invertidas a la vista.
- Para minimizar los cambios bruscos de coloración en las texturas, realizar la intersección entre las llagas de la mampostería de piedra o cambios de material. Y en el caso del terreno, elegir un parche de un material y tonalidad que se asemeje al entorno a sustituir.

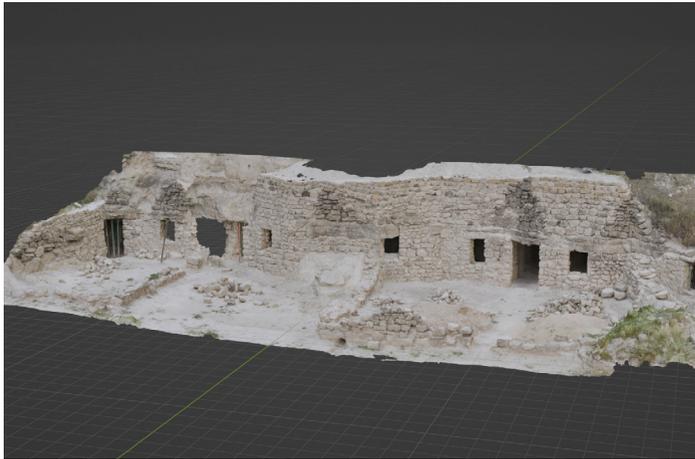


Figura 74. Proceso de recreación de la fachada. Estado Original Renderizado.  
Fuente: Elaboración propia



Figura 75. Proceso de recreación de la fachada. Estado final recreación Renderizado.  
Fuente: Elaboración propia

Aunque ciertas partes de 3D externos podrían ser reutilizadas, esto supondría un problema al trabajar con las UV y los mapas de textura posteriormente, puesto que habría el doble de archivos o sería necesario crearlos de nuevo para unificar el contenido. Sin embargo, al utilizar parches utilizando partes del mismo modelo simplemente hay zonas de las texturas que se ven en varios sitios a la vez.

Dado que de esta zona a reconstruir faltan datos que replicar, se han interpretado de la mejor forma posible basándose en el resto de fachadas de casas cuevas existentes en el entorno, utilizando y adaptando las distintas partes del modelo utilizadas como parches. Obviamente, estos parches no tienen la forma exacta del contorno que se necesita reconstruir y por ello se han utilizado distintas herramientas disponibles en el apartado de esculpido digital de Blender para adaptarla a las necesidades requeridas.

Una vez situados todos los parches requeridos, se procedió a recortar los excedentes de los distintos parches, así como en las zonas de los huecos de puertas y ventanas, reduciendo la profundidad del modelo en estos puntos, en gran medida confuso debido a la diferencia de iluminación entre exterior e interior. Este recorte sirve para aligerar el poligonaje final del modelo.

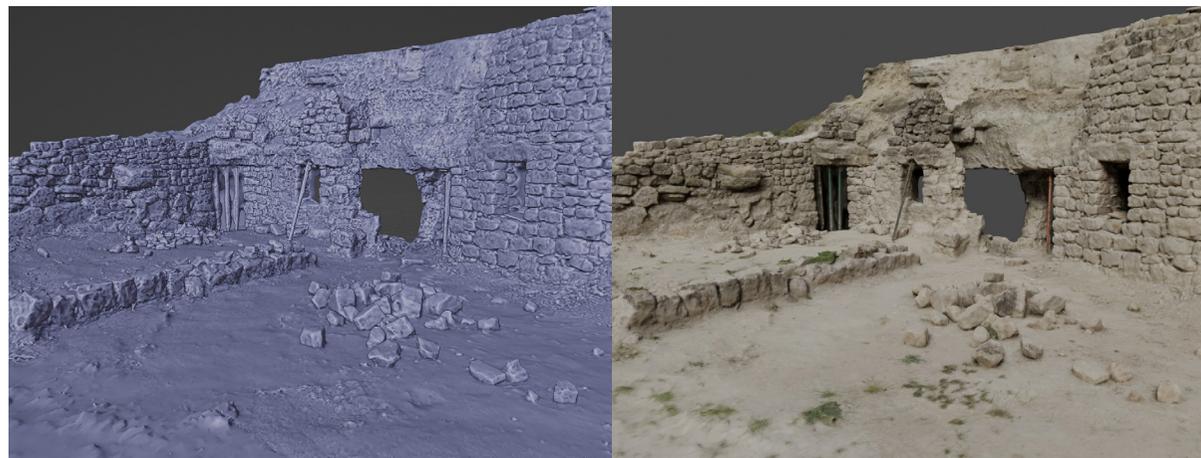


Figura 76. Estado original de la fachada de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado Fuente: *Elaboración propia*

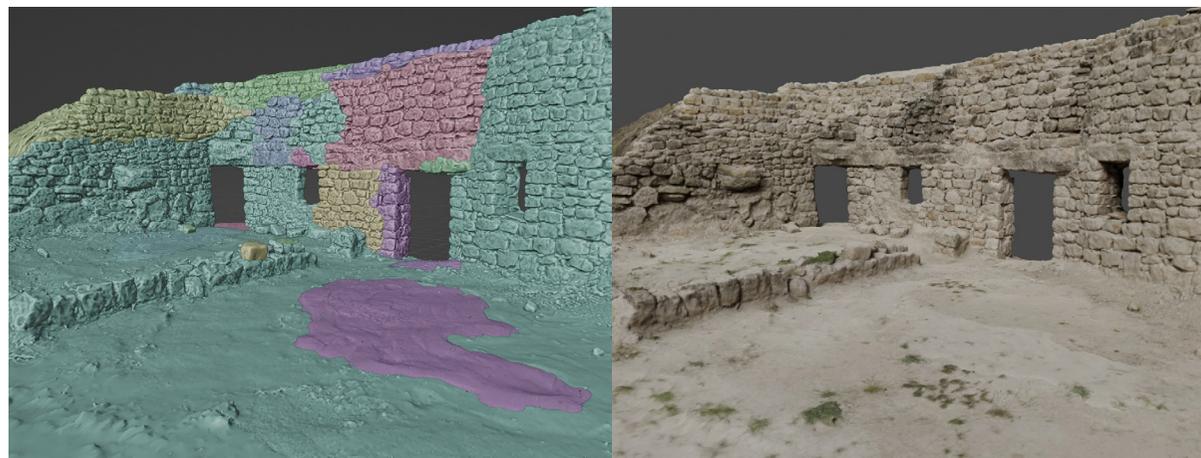


Figura 77. Estado de la fachada de la casa cueva tras la reconstrucción. Visualización en matcap y renderizado Fuente: *Elaboración propia*

### 3 Cuevas

La toma de datos del interior de las cuevas se realizó mediante el escáner de mano Zeb Horizon utilizando únicamente el sensor laser, pues las condiciones de iluminación en el interior no eran las adecuadas para la captura fotográfica. En adición a eso, el mal estado del interior, junto con los materiales y aperos de obra presentes en el momento de la toma de datos dieron como resultado un modelo 3D con múltiples problemas, que ha obligado a una edición y texturizado completo del mismo.

En un primer acercamiento a la edición del modelo se trató de realizar una retopología como en el resto de levantamientos fotogramétricos pero, debido a los problemas anteriormente citados, tras la retopología semiautomática el número de errores era tan alto que se decidió levantar un 3D nuevo tomando el levantamiento como referencia.

Para crear el nuevo 3D se comenzó con una geometría primitiva como es el cubo y se procedió a realizar extrusiones y ajustes de escala para imitar la geometría general de las cuevas. Una vez que la nueva geometría básica se asemejó a la del modelo 3D original el siguiente paso fue subdividir el nuevo modelo para conseguir más resolución y así utilizar el modificador "Shrinkwrap", que ajusta la malla de un objeto al de otro. Dado que la malla original tenía problemas y el modificador intentó ajustarse a ellos, se procedió a realizar un retoque con las herramientas de esculpido digital.

Con la volumetría general ya definida, el siguiente paso fue levantar las particiones interiores y el mobiliario de fabrica existente en algunas habitaciones. Dado que estos elementos poseen una geometría más regular al haber sido construido con adobe y no excavado, el método para el modelado fue ligeramente diferente. Este método utilizado es el conocido como "hard-surface", especialmente indicado para superficies definidas, siendo lo opuesto al modelado "orgánico".

Si bien se partió igualmente de un cubo como geometría primitiva, este método de trabajo se centra en utilizar los loops en combinación con el modificador "Subdivision surface". De este modo se consiguen crear esquinas y bordes con un leve suavizado que aportan un mayor realismo que unas esquinas marcadas por dos planos que se cortan. Para conseguir este efecto fue necesario crear loops de apoyo cercanos a los loops principales. Finalmente, para dotar de más realismo a estos elementos hard-surface se procedió a utilizar las herramientas de esculpido para realizar imperfecciones.

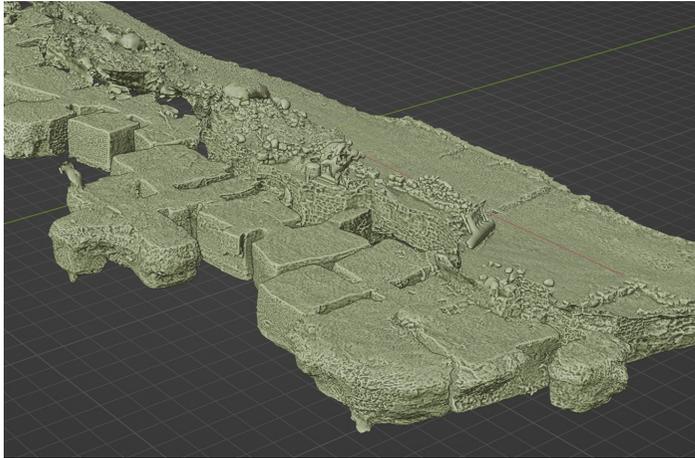


Figura 78. Levantamiento del interior de las cuevas. Fuente: Elaboración propia

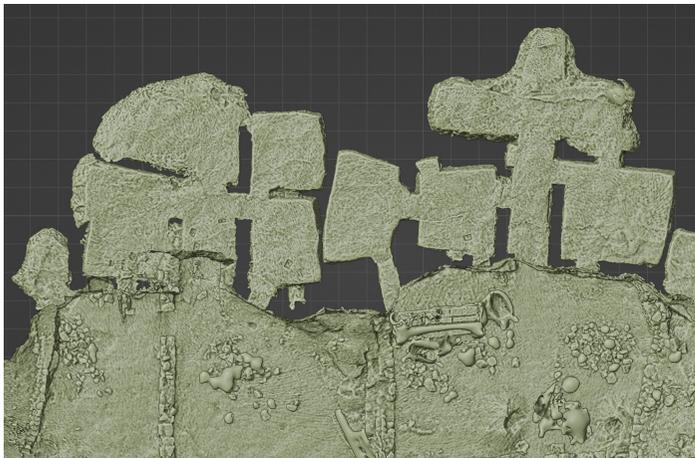


Figura 79. Planta del interior de las cuevas a reconstruir. Fuente: Elaboración propia

Finalizado el proceso de modelado, el siguiente paso fue el texturizado del mismo. Para ello se procedió a marcar los seams y desplegar las UV de forma correcta. Al partir todo de primitivas este paso se ha realizado de forma sencilla y rápida.

En el interior de estas cuevas se diferencian tres tipos de muros: de mampostería de piedra para fachadas, adobe para particiones interiores y la roca viva al fondo de las mismas. A pesar de los diferentes materiales, el acabado de mortero de cal es el mismo en todos los casos.

Con las UV desplegadas el siguiente paso fue crear unos materiales básicos y aplicarlos según los usos requeridos que, en esta ocasión, fueron tres: suelos, paredes y techos, y encimeras.

Para conseguir mayor realismo, se utilizaron materiales PBR descargados de la biblioteca de Quixel Megascans y se importaron en cada uno de los materiales base anteriormente citados.

Si bien para renderizar en Blender con el estado actual ya sería suficiente, dado que el modelo se va a exportar a Unreal es necesario bakear los materiales utilizados en las UV preparadas con anterioridad. El proceso es el mismo que se ha utilizado en otros modelos para bakear las texturas de un HP a un LP con ligeras modificaciones.

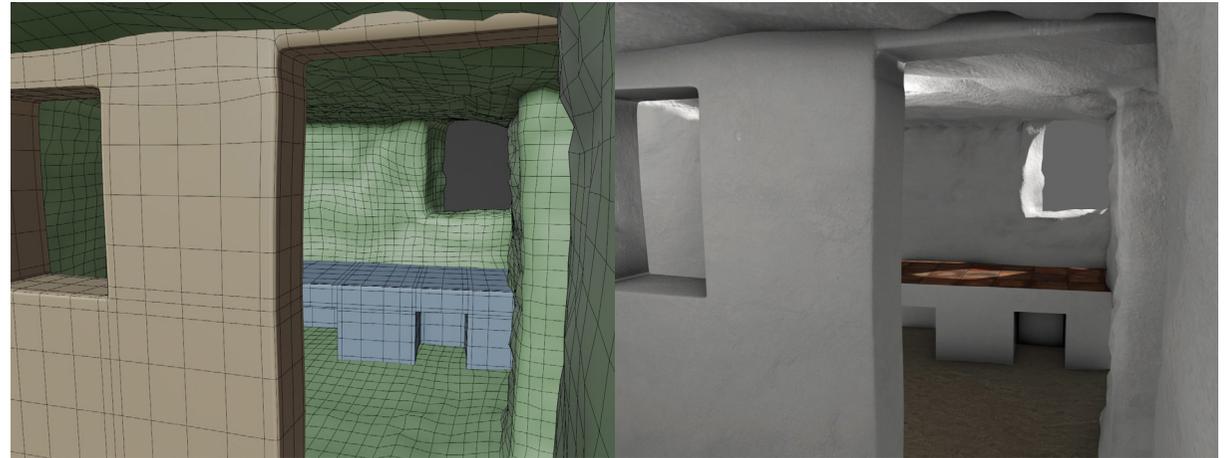


Figura 80. Reconstrucción del interior de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado Fuente: Elaboración propia

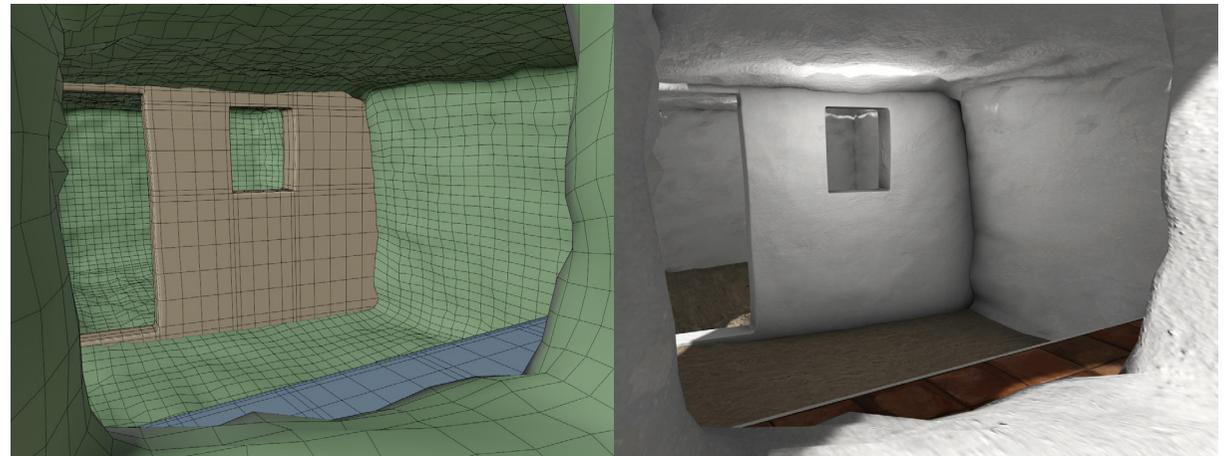


Figura 81. Reconstrucción del interior de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado Fuente: Elaboración propia

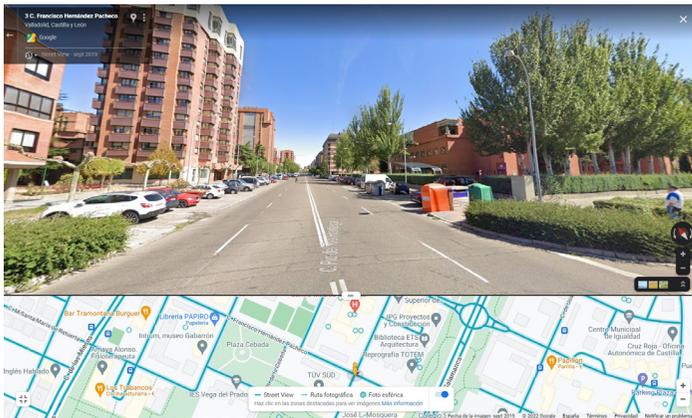


Figura 82. Visor 360º de StreetView de Google Maps. Fuente: [google.com/maps/](http://google.com/maps/)

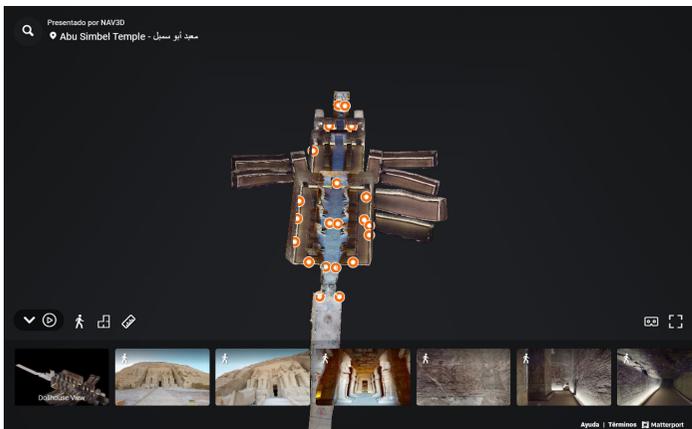


Figura 83. Visor web de Matterport. Modo Dollhouse. Fuente: [matterport.com/discover](http://matterport.com/discover)

## 2.3. Representación

Para la representación de la visita virtual se investigaron y consideraron las distintas opciones que hay disponibles en el mercado para realizar tal cometido.

Desde hace años, el sistema más utilizado para realizar visitas o recorridos virtuales consiste en la concatenación de fotografías 360º cuyo ejemplo más claro es el sistema de StreetView de Google Maps. En este sistema se van realizando fotografías esféricas desde distintos puntos fijos que posteriormente se enlazan entre sí, permitiendo saltar de un punto a otro creando la ilusión como si estuviésemos avanzando en un recorrido.

Una evolución de este sistema es el que utiliza la compañía Matterport y sus competidores, como Metareal, Asteroom o EyeSpy360. Si bien hay ligeras diferencias entre lo que ofrece cada compañía, todas se basan igualmente en la captura de fotografías esféricas, que en este caso las procesan para realizar una suerte de levantamiento fotogramétrico. Gracias a este levantamiento permiten tener distintas ventajas respecto al sistema anterior. La más representativa es que generan una representación del conjunto capturado en lo que llaman "Dollhouse" (Casa de muñecas), que de forma muy visual te permite comprender la volumetría total, así como las dimensiones y posición de las distintas partes del levantamiento. De igual manera, mediante visualizaciones ortográficas de esta volumetría consiguen representar de manera más o menos exacta las plantas y secciones del conjunto, así como realizar mediciones relativamente precisas.

No obstante, el resultado final sigue siendo el mismo, solo es posible visualizar los puntos desde donde se ha realizado dicha captura 360º y saltar entre ellos. Como mejora al sistema anterior, la transición entre los distintos puntos pretende crear una sensación de movimiento en un entorno real, alargando las imágenes existentes hasta enlazar con el siguiente punto. Como punto final importante, casi todas tienen un visor online muy intuitivo que puede integrarse en cualquier web, lo que es una gran ventaja a la hora de la divulgación del contenido.

Dando un paso más hacia el entorno 3D se encuentran los programas de renderizado en tiempo real enfocados en la arquitectura, como Lumion o Twinmotion. A diferencia del resto de motores de renderizado, utilizan un sistema de iluminación global menos preciso pero que gracias a la potencia de cálculo de las tarjetas gráficas modernas consiguen realizarlos en tiempo real.

Estos programas poseen una interfaz muy intuitiva e incluyen una biblioteca de assets y recursos que pueden incorporarse al 3D importado para crear una ambientación más completa. Aprovechando su capacidad de renderizado a tiempo real tienen recursos en movimiento y la posibilidad de realizar videos directamente desde el motor. Twinmotion además tiene un servicio en la nube que permite subir los proyectos y visualizarlos online.

Si bien estos sistemas son un gran paso adelante en lo que a representación de recorridos virtuales creados desde cero, su interacción con la fotogrametría es su punto débil. Como se ha visto en el anterior bloque, los modelos fotogramétricos tienen una grandísima cantidad de polígonos que a su vez supone archivos muy grandes, y sobrepasan la capacidad de procesamiento de estos programas de renderizado en tiempo real. No obstante, durante el desarrollo de este trabajo, Twinmotion ha ido presentando novedades que mejoran este aspecto, integrando en el propio motor las bibliotecas de assets de Quixel y de Sketchfab, ambas propiedad de Epic Games, al igual que el propio Twinmotion y Unreal Engine.

El último sistema que se valoró es el motor de renderizado de videojuegos Unreal Engine que es un programa muy potente especializado en la creación de videojuegos pero que ha ido expandiendo su uso para visualización de arquitectura, producción audiovisual para cine y televisión, automoción y varios campos más. La versión 5 de Unreal Engine se presentó en 2021 con grandes novedades respecto a su versión anterior, con la inclusión de varias tecnologías nuevas como Nanite, que permite la inclusión de modelos de alto poligonaje sin afectar al rendimiento, o Lumen, su nuevo sistema de iluminación global a tiempo real, entre otros.

Teniendo todas estas opciones, se optó por utilizar Unreal Engine 5 para el desarrollo del trabajo, pues permite el movimiento libre del espectador pudiendo crear diversas interacciones con el entorno, además de representar fielmente los modelos fotogramétricos y las nubes de puntos capturadas.



Figura 84. Visor online de Twinmotion Cloud. Fuente: [twinmotion.com/en-US/twinmotion-cloud](https://twinmotion.com/en-US/twinmotion-cloud)

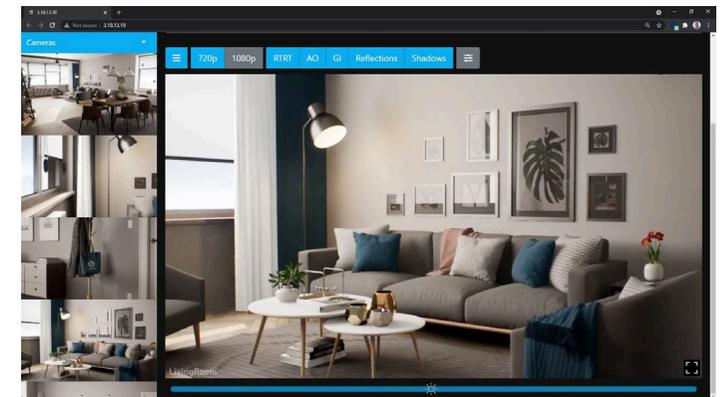


Figura 85. Visor Pixel Streaming de Unreal Engine Fuente: [youtube.com/c/UnrealEngine](https://youtube.com/c/UnrealEngine)

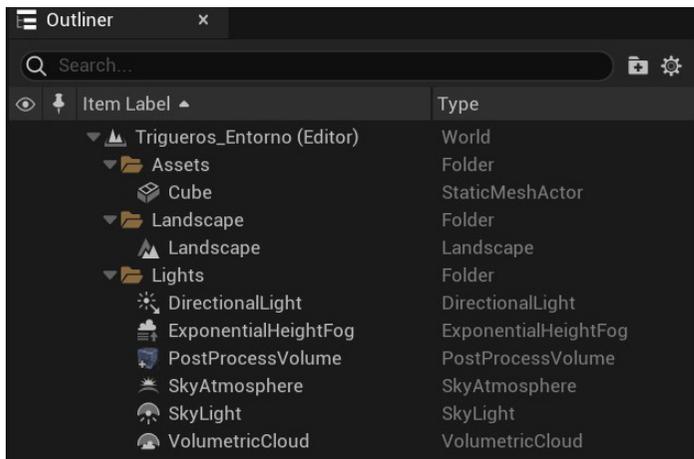


Figura 86. Organización del Outliner y actores necesarios para Lumen. Fuente: Elaboración propia

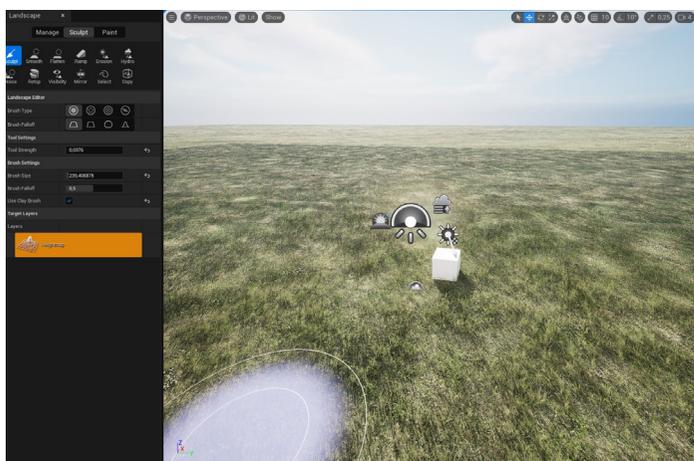


Figura 87. Creación de landscape básico y aplicación de material dinámico. Fuente: Elaboración propia

### 2.3.1. Preparación del proyecto en Unreal Engine 5

Unreal Engine 5 es un programa complejo, en cuya ejecución se consumen bastantes recursos de potencia y espacio en el PC. Cada proyecto creado y ejecutado desde Unreal genera un elevado número de archivos y carpetas, de tal manera que la propia comunidad de usuarios de Unreal invita a utilizar un estándar de nomenclatura de carpetas y prefijos según el tipo de archivo, que permita compartir e intercambiar archivos y manteniendo el orden.

Por lo general, otros softwares 3D tienden a gestionar sus archivos en base a vínculos a carpetas externas. Sin embargo, en Unreal cada archivo importado crea una copia bajo un formato propio dentro de la carpeta raíz del proyecto, lo que permite que no se modifiquen los originales, pero que a su vez incrementa enormemente el tamaño de la ubicación del proyecto.

Partiendo de esas bases, el primer paso fue crear un nuevo proyecto con la plantilla ArchViz y hacer las configuraciones iniciales en el editor del proyecto, activando distintos plugins y opciones de configuración como los necesarios para la importación y correcta visualización de HDRIs y nubes de puntos LIDAR.

Configurado el proyecto, se procedió a crear un nuevo nivel vacío y colocar los distintos actores necesarios para el funcionamiento del sistema de iluminación dinámica Lumen. Estos se pueden diferenciar entre los que proporcionan la iluminación y permiten modificarla (SkyLight, Directional Light y PostProcessVolume), y los que controlan la atmósfera (SkyAtmosphere, ExponentialHeightFog y VolumetricCloud).

Una vez preparado el sistema de iluminación, se creó un terreno básico con la configuración por defecto mediante la herramienta integrada "Landscape". Dicha herramienta permite ampliar o reducir el tamaño del terreno en cualquier momento, así como modelar para crear depresiones y/o elevaciones. Para su texturizado se importó al proyecto y aplicó en el landscape un material dinámico que se incluye dentro de un paquete de contenido llamado "Brushify.io".

A lo largo del desarrollo del proyecto en UE5 se incorporaron otros paquetes de contenido, assets y blueprints que, si bien son de pago, se han ido adquiriendo a lo largo del tiempo a través de los regalos y descuentos mensuales de la EpicGamesStore.

### 2.3.2. Creación entorno

Una vez preparada la configuración básica del nivel, se procedió a la personalización del entorno. En un primer momento, se planteó la utilización de un domo HDRI personalizado que sirviese de telón de fondo del escenario además de aportar la información lumínica.

Antes de realizar la toma de datos y levantamiento del HDRI se procedió a utilizar un archivo de prueba. Para ello se descargaron varios ejemplos de HDRI con una apariencia similar al entorno de Trigueros del Valle desde la web PolyHeaven. Para incorporar el HDRI dentro de UE5 primero hay que importar los archivos descargados y activar plugin "HDRI Backdrop", que añade un nuevo actor con toda la configuración preparada para insertar un HDRI dentro del nivel.

Una de las características principales que aportan los HDRI es la información lumínica que, aunque pueda ser muy buena y encaje a la perfección con la imagen que se visualiza, el problema es que es una iluminación estática. Por lo tanto, el hecho de utilizar el HDRI supondría no utilizar el nuevo sistema Lumen de iluminación dinámica, junto con sus nubes en movimiento.

Por este motivo se trató de buscar otra solución para realizar el entorno. Tras diversas pruebas se decidió utilizar una combinación de una nube de puntos proveniente de la base de datos del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) para recrear el horizonte junto con un landscape modelado a mano para el entorno cercano. Vista desde cerca, la nube de puntos es demasiado difusa y molesta, por lo que se dividió en dos partes en el programa CloudCompare, dejando un hueco central para el landscape y manteniendo el perímetro para visualizar el horizonte. En referente al landscape, se utilizó la nube como referencia general y la ortofoto realizada con el dron para situar con detalle el entorno inmediato a los levantamientos 3D. Con la herramienta de pintura integrada en el editor del landscape se remarcaron los caminos con un material distinto dentro de los incluidos en el material dinámico.

Con la parte relacionada con el entorno preparada, se procedió a la importación de los modelos 3D a UE5 y a activar Nanite, siguiendo los distintos pasos del flujo de trabajo que se había probado y relatado en los apartados anteriores. Para ello basta con arrastrar al content browser el modelo 3D en cuestión en formato .FBX para que salga una ventana emergente que permite configurar los parámetros de la importación y conversión al formato propio de UE5 (.uasset). En esta ventana hay que marcar la opción de Nanite y desmarcar la opción que te genera materiales automáticamente.

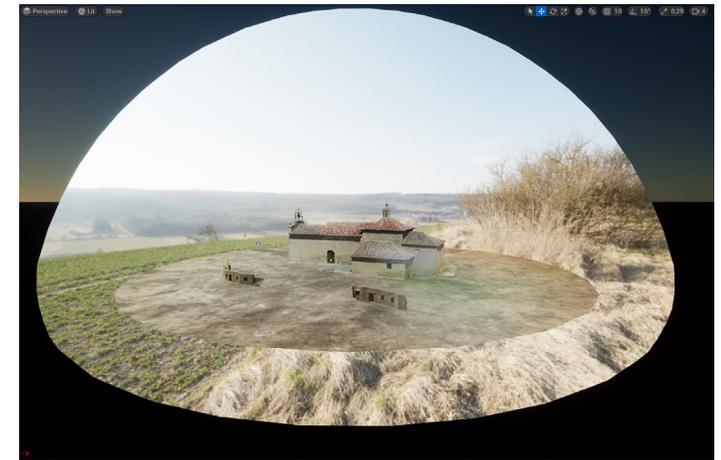


Figura 88. Prueba con el domo HDRI. Fuente: Elaboración propia



Figura 89. Prueba con la nube de puntos del PNOA y el landscape. Fuente: Elaboración propia

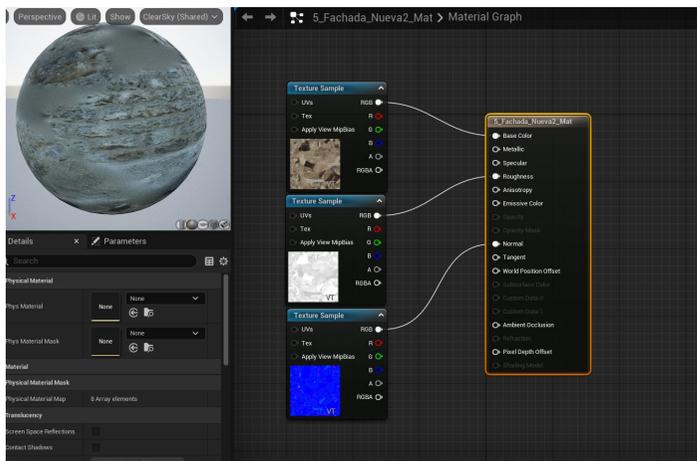


Figura 90. Creación de material mediante los blueprint. Fuente: Elaboración propia

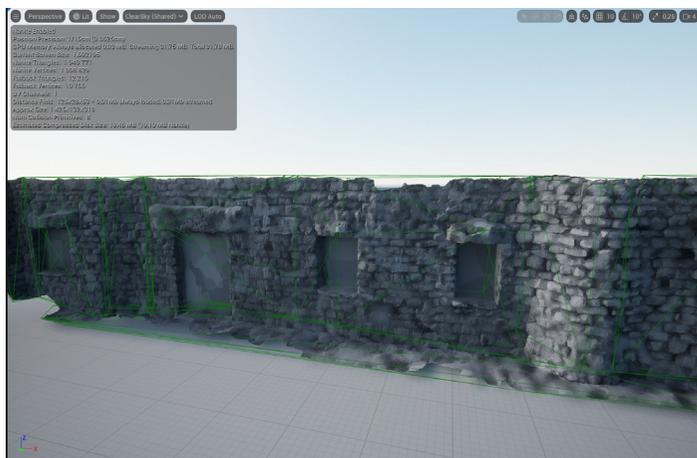


Figura 91. Visualización en verde de la colisión simple generada. Fuente: Elaboración propia

Como se dijo anteriormente, en Unreal es imprescindible tener los archivos ordenados, por lo que se crearon distintas carpetas para modelos, mapas de textura, materiales, niveles, etc...

Una vez que se importaron los modelo 3D el siguiente paso fue configurar y aplicar el material correspondiente a cada uno de ellos. Para ello se importaron los distintos mapas de textura renombrados según el sistema UDIM arrastrando las imágenes a la carpeta correspondiente del *content browser*. Seguidamente, desde la carpeta de materiales, se añadió un nuevo asset de material vacío para cada modelo 3D. Al abrir el material vacío aparece una ventana emergente con el sistema de Blueprints, que esencialmente es un sistema de nodos como el que tiene Blender y cada vez más programas. gracias a utilizar el sistema UDIM simplemente fue necesario arrastrar el primer mapa de cada serie para que UE5 reconociese el resto automáticamente. Una vez enlazado cada mapa con su valor correspondiente, se guardó el material y se aplicó al modelo 3D correspondiente.

El último paso necesario para terminar de configurar los modelos 3D fue añadir el sistema de colisiones. Si bien en versiones anteriores era necesario crear un modelo simplificado que sirviese de colisión para impedir que el jugador atravesase los modelos y superficies, en UE5 viene incluida una herramienta que simplifica enormemente el proceso. Para ello solamente es necesario abrir el modelo en cuestión y en el apartado de colisiones generar automáticamente una de las diferentes opciones de colisión simple que ofrece. Si por algún motivo no funciona correctamente, se puede indicar que use el propio modelo como sistema de colisión complejo.

### 2.3.3. Ambientación e interactividad

Configurados el entorno y los modelos 3D, los últimos pasos que quedan para finalizar la visita virtual son los relacionados con la mejora cualitativa del conjunto, es decir, añadir modelos de objetos que complementen el entorno, luces, sonidos, efectos especiales y una interfaz gráfica de usuario que que sirva de portada y guíe al jugador en lo referente a comandos y configuración.

El primer paso que se realizó fue abrir la biblioteca de Quixel Bridge que se encuentra integrada en el propio motor de UE5. Quixel posee una amplia biblioteca de materiales de altísima calidad procedentes de levantamientos fotogramétricos que se pueden descargar e incorporar al proyecto de UE5 de forma gratuita y que están preparados para funcionar perfectamente en el motor desde el primer momento, incluido el sistema Nanite.

Tras descargar y situar distintos assets tanto de objetos y muebles, como de rocas y elementos naturales para enmascarar las uniones de los modelos 3D con el landscape, el siguiente paso fue la incorporación de actores para sonido ambiental, puntos de luz en el interior de la cueva y efectos especiales de fuego para las cocinas. Para todos estos citados efectos existen actores preconfigurados integrados en el propio motor, por lo que su preparación resultó sencilla.

Para la interfaz de usuario se utilizó un paquete de contenido llamado "ArchViz Interactive UI and Tools" que, si bien es una versión desarrollada para Unreal Engine 4, se puede actualizar a UE5 sin mayores problemas. Este paquete de contenido incorpora multitud de blueprints y elementos de interfaz preconfigurados, además de estar bastante bien estructurado y documentado en su página web donde explica mediante pequeños tutoriales cómo editar y personalizar cada uno de los elementos configurables.

Dado que dicho paquete de interfaz estaba diseñado para UE4, en el cual siempre se compilaba la iluminación estática bakeada en las texturas para mejorar el rendimiento y la fluidez, y en UE5 se ha utilizado la iluminación dinámica proporcionada por el sistema Lumen, ha habido que realizar unos cuantos cambios y ajustes que estaban perfectamente indicados en la documentación web.

Para finalizar con la interfaz se sustituyeron las imágenes predefinidas para las pantallas de carga, se eliminaron elementos innecesarios en los menús de inicio y se realizaron algunos ajustes para mejorar la fluidez de movimiento del jugador.

El último paso que se realizó fueron los distintos métodos de interacción con el jugador. Si bien se pueden realizar complejísimo procesos por medio de los blueprint (como ocurre en las misiones de los videojuegos), únicamente se realizaron sencillas interacciones basadas en un *trigger*, un actor que detecta una acción concreta que le indiques, y una respuesta a ese trigger en forma de un evento.

Los eventos que se prepararon fueron activar/desactivar puntos de luz en el interior de la cueva, paneles informativos flotantes, y teletransporte desde la puerta exterior de la ermita a un nivel distinto de juego donde solo aparece el interior de la ermita (y viceversa).

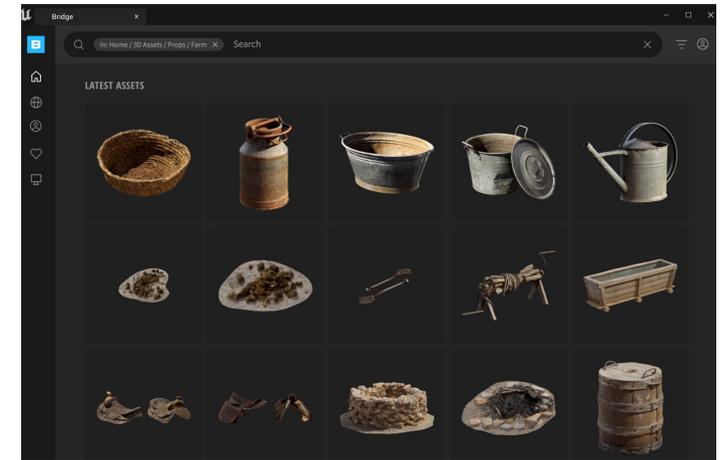


Figura 92. Biblioteca de assets en la herramienta integrada en UE5 de Quixel Bridge. Fuente: Elaboración propia

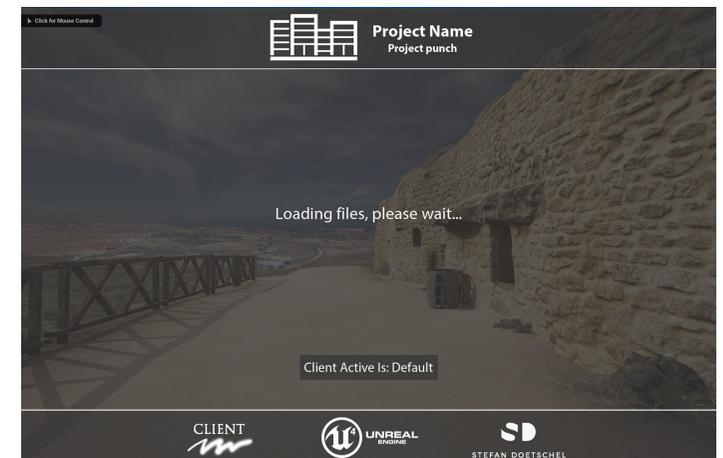


Figura 93. Pruebas de la pantalla de carga de la Interfaz de Usuario. Fuente: Elaboración propia

# TFG Fundamentos de la Arquitectura. David Senovilla Ramos

Fotogrametría para la representación interactiva de la arquitectura. Casas cueva en Trigueros del Valle

## Acerca del TFG



El presente trabajo tiene como objetivo relatar el proceso completo por el cual se ha desarrollado una visita virtual interactiva de las casas cueva de Trigueros del Valle y su entorno inmediato, aunando la precisión y calidad de un levantamiento fotogramétrico con el realismo e interacción que aporta el renderizado hiperrealista del motor de videojuegos Unreal Engine 5. Para ello se relata el proceso completo con sus aciertos y errores, problemas y soluciones, desde la toma de datos in situ, el procesado de estos datos y su levantamiento fotogramétrico, la optimización y texturizado de los modelos 3D resultantes y la creación con ellos de un espacio virtual interactivo.

Figura 94. Vista de la portada de acceso al blog. Fuente: Elaboración propia

## 2.4. Resultado y difusión

Finalizado el levantamiento fotogramétrico, su optimización y edición, así como el montaje de la visita virtual en UE5, en este punto se mostrarán los resultados obtenidos.

Como se mencionó en el apartado de objetivos, uno de los propósitos de este TFG es establecer estrategias de difusión transmedia, por lo que a continuación se expondrán las distintas herramientas y plataformas utilizadas para la divulgación de los resultados en los formatos disponibles más comunes.

### Blog

El primer método a mencionar es el blog realizado ex profeso para este TFG. Este blog pretende servir como escaparate digital y punto de encuentro entre las distintas plataformas utilizadas para la difusión digital del trabajo.



Figura 95. Código QR para acceder al blog dedicado del TFG. Fuente: Elaboración propia

## Vistas y planimetrías

Si bien el trabajo en su conjunto gira siempre en torno al 3D en sus diferentes formatos y visualizaciones, la imagen en 2D seguirá siendo siempre el método de difusión y visualización por antonomasia.

Por ello es imprescindible mostrar distintas imágenes del resultado final del trabajo, tanto en forma de diversas vistas en perspectiva de la visita virtual, realizada en Unreal Engine 5, como en su representación ortográfica, extraídas directamente de los levantamientos fotogramétricos, las cuales se pueden consultar en el anexo correspondiente dedicado a tal fin.



Figura 96. Vista aérea del conjunto. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 97. Vista por el camino junto a las casas rehabilitadas. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 98. Vista de la rampa de acceso hacia la Ermita, entre las casas de nueva construcción. Fuente: *Elaboración propia*

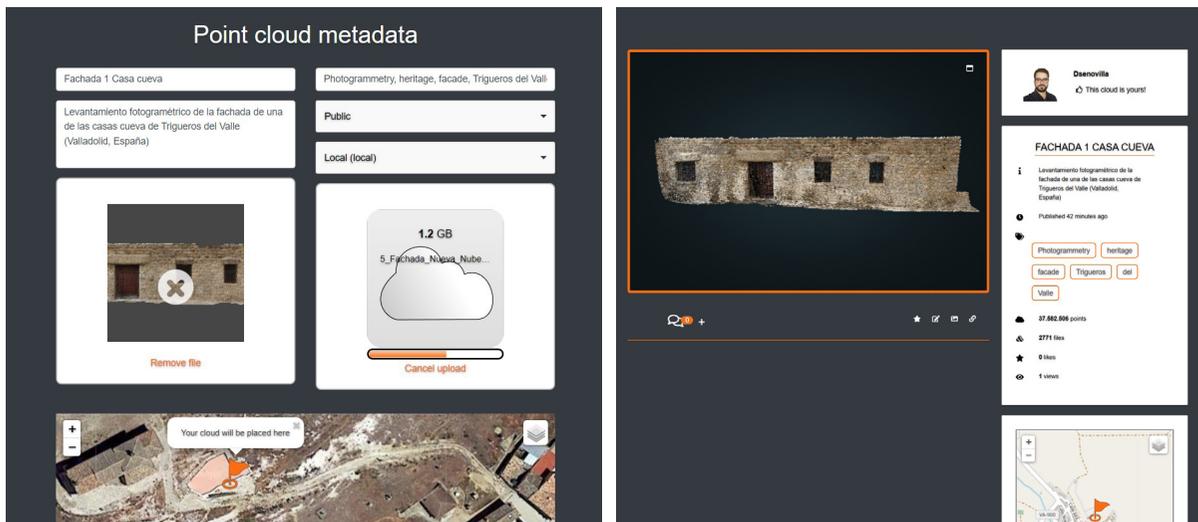


Figura 99. Pantalla de carga y configuración de archivo. Fuente: Elaboración propia. Figura 100. Pantalla de previsualización de cada archivo. Fuente: Elaboración propia

## Nubes de puntos

Las nubes de puntos procedentes tanto de los escáner láser, como de la fotogrametría digital son una herramienta fundamental para la extracción de datos dimensionales, así como para diagnósticos de volumetrías y deformaciones.

No obstante también es posible extraer de las nubes de puntos documentación gráfica a través de los ortomosaicos y utilizar herramientas de visualización para utilizarlas como método de divulgación de contenido.

Una de esas herramientas es el visor web de PointBox, que mediante una interfaz sencilla pero potente permite visualizar sin problemas grandes nubes de puntos, incluso en dispositivos móviles.

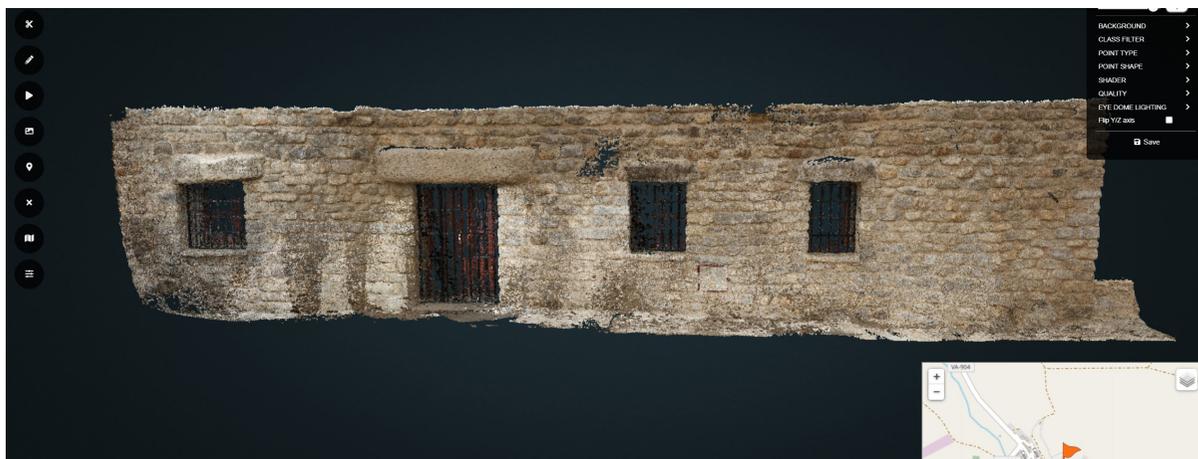


Figura 101. Vista a pantalla completa del visor y sus opciones de visualización. Fuente: Elaboración propia



Figura 102. Código QR para acceder al perfil de PointBox. Fuente: Elaboración propia

## Mallas tridimensionales

Los modelos 3D basados en mallas poligonales son el eje fundamental de este trabajo, y el sistema más accesible y a la vez interactivo para la difusión de estos modelos son los visores de contenido 3D en línea.

Actualmente las plataforma más extendidas para este uso son Sketchfab y Artstation, aunque esta segunda se encuentra más enfocada al uso profesional.

Si bien estas herramientas son muy completas e intuitivas, el problema radica en que la capacidad y la velocidad de renderizado depende de la potencia gráfica del equipo utilizado. Por este motivo es importante optimizar los modelos para que puedan ser visualizados hasta en dispositivos móviles y equipos poco potentes.



Figura 103. Código QR para acceder a la colección de Sketchfab. Fuente: Elaboración propia

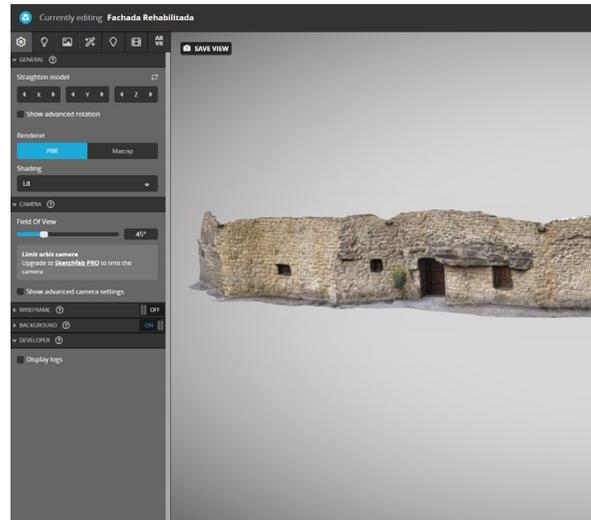


Figura 104. Pantalla de carga y configuración de archivo. Fuente: Elaboración propia

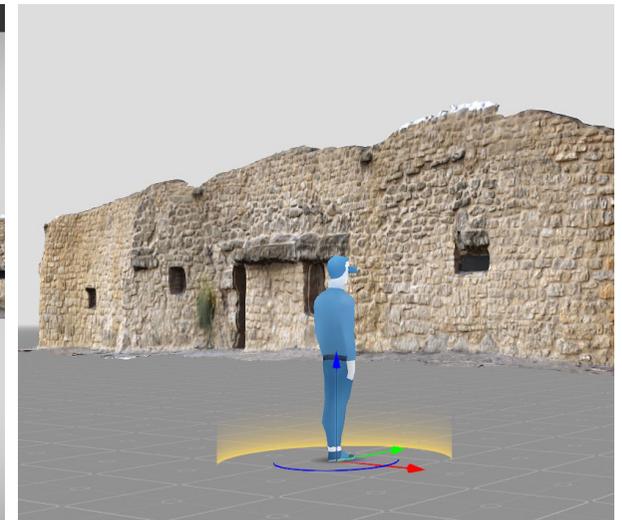


Figura 105. Configuración de posición y tamaño para RV. Fuente: Elaboración propia



Figura 106. Vista de la página de visualización de los modelos 3D. Fuente: Elaboración propia

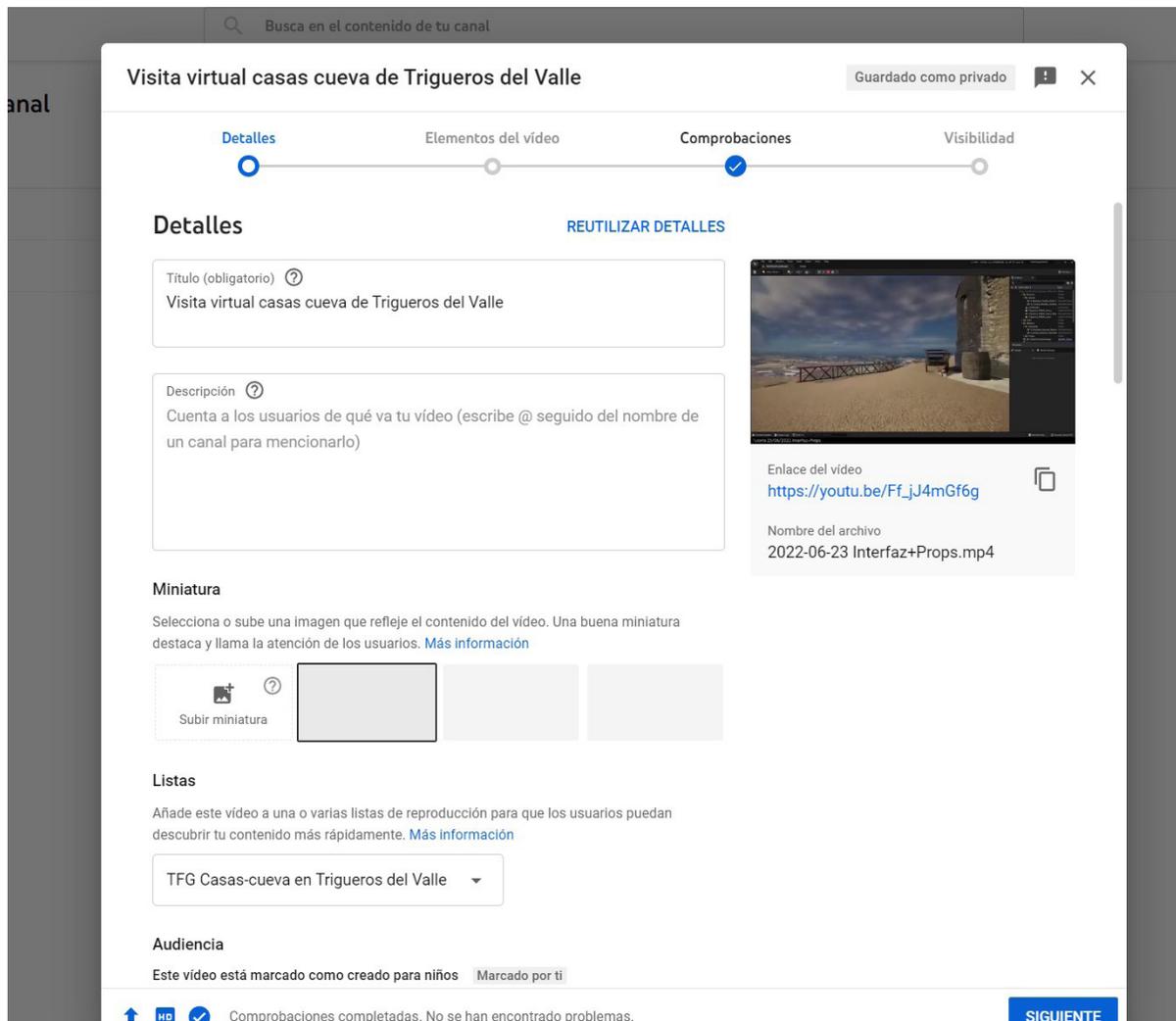


Figura 107. Panel de subida de videos y configuración en YouTube. Fuente: Elaboración propia

## Vídeo

Los métodos de visualización 3D citados anteriormente cumplen su propósito perfectamente para modelos independientes como son las distintas fachadas levantadas para este trabajo. No obstante, el hecho diferenciador de la visita virtual realizada es el movimiento libre por el entorno recreado y las anteriores herramientas no son capaces de transmitir esa sensación.

Por este motivo se ha utilizado la plataforma Youtube para subir un pequeño vídeo que se ha creado en el cual se muestra un recorrido por la visita virtual, permitiendo observar los distintos modelos 3D realizados, a la vez que comprender el entorno de una forma guiada.



Figura 108. Código QR para acceder a la lista de reproducción. Fuente: Elaboración propia

## Visita virtual

Unreal Engine 5, como motor de videojuegos que es, permite exportar el proyecto realizado en un paquete de archivos que funcionan como una demo *jugable*. Esta serie de archivos contienen todo lo necesario para poder ejecutar la visita virtual en cualquier equipo que cumpla con los requerimientos mínimos de potencia gráfica.

La utilización de este método de exportación es el fin último de este trabajo, permitiendo visualizar todos los modelos 3D realizados con la máxima calidad posible a la vez que permite un movimiento libre por el entorno, sin limitaciones de puntos prefijados o rutas marcadas. No obstante, estas ventajas traen el inconveniente de requerir estar en posesión de el paquete de archivos así como un equipo que pueda ejecutarlos de forma satisfactoria.

Una de las posibilidades de exportación que se propusieron en un principio y que no han podido llevarse a cabo por falta de tiempo es la que resuelve esos inconvenientes. UE5 posee una herramienta llamada Pixel Streaming que permite exportar un paquete ejecutable y vincularlo a una dirección IP. Ejecutando esa demo desde un equipo o servidor web con conexión a internet cualquiera que acceda a dicha dirección IP mediante un navegador web podrá interactuar con la demo mediante streaming como si estuviera ejecutandola desde su propio equipo.

Twinmotion posee una versión simplificada de este sistema, permitiendo subir directamente a los servidores de EpicGames unos recorridos o renderizados prefijados con antelación. En este caso es el propio servidor de EpicGames el que se encarga de la ejecución de los archivos permitiendo visualizarlos mediante streamign a cualquiera que tenga acceso al hipervínculo correspondiente.

Otras posibilidades de exportación que se propusieron fueron las relacionadas con la Realidad Virtual y con la Realidad Aumentada. Estas opciones no se han realizado para este trabajo por falta de tiempo, como en el caso anterior, además de por no disponer de unas gafas de realidad virtual para poder ejecutarlas.

Nombre	Tipo
Engine	Carpeta de archivos
TFG_Casas Cueva Trigueros	Carpeta de archivos
Manifest_NonUFSFiles_Win64.txt	Documento de tex...
TFG_Casas Cueva Trigueros.exe	Aplicación

Figura 109. Archivos necesarios para ejecutar la visita virtual. Fuente: *Elaboración propia*

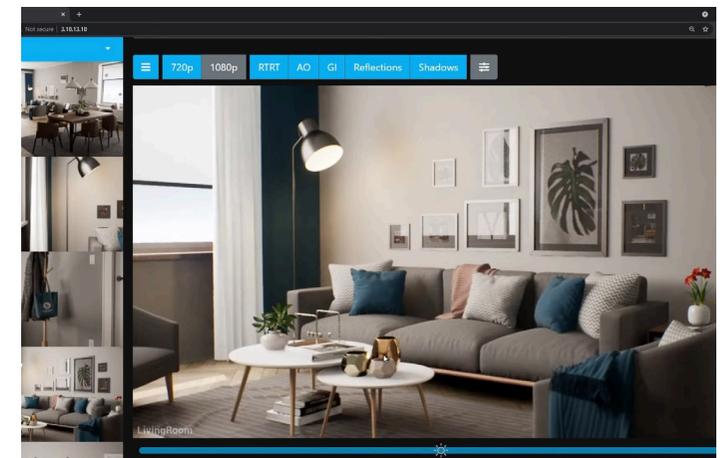


Figura 110. Visor Pixel Streaming de Unreal Engine Fuente: [youtube.com/c/UnrealEngine](https://youtube.com/c/UnrealEngine)



## **3. Conclusiones**

## 3.1. Conclusiones

Como en todo proceso de investigación, el desarrollo de este trabajo ha supuesto el aprendizaje de multitud de conceptos y procesos, así como la utilización de herramientas y distintos softwares no utilizados con anterioridad.

### Tomas de datos

Durante la elaboración y edición de los trabajos fotogramétricos se generan una cantidad ingente de archivos de distinta naturaleza pero interrelacionados entre sí, con tamaño y peso sustancial. Es por este motivo, que se hace imprescindible la planificación y organización previa en cada uno de los pasos a realizar.

Este hecho es destacadamente importante durante el proceso inicial de toma de datos, pues cuanto mejor y más detallada se haya realizado esta, menos problemas surgirán en los procesos siguientes y, por tanto, menos tiempo habrá que dedicar a subsanarlos. Para ello es importante conocer el modelo y entorno a documentar y estudiar la estrategia correcta para no dejar elementos sin capturar, o capturarlos de forma inadecuada.

Lo idóneo es realizar la toma de datos fotogramétrica en un día completamente nublado y con claridad para evitar sombras arrojadas, pero como eso no siempre es posible se debe disponer de herramientas físicas y digitales para subsanarlo, como parasoles, focos con iluminación difusa y una buena cámara que permita la captura en formato RAW. Otras herramientas, que si bien no son imprescindibles suponen un buen complemento, son los estabilizadores de cámara o disparadores a distancia, las cartas de color (o colorchecker) y sistemas de medición de mano precisos.

### Tiempos de procesado

Si durante la realización de las tomas de datos hay que enfrentarse a la climatología con preparación y precisión, para el procesado de los datos hay que enfrentarse al tiempo y tamaño de los archivos con equipos y software competente. Los cientos de imágenes capturadas *in situ* necesitan de un revelado

digital para equilibrar su información lumínica que facilite el levantamiento, por lo que cuanto mejor se haya realizado el trabajo previo menos tiempo llevará este paso.

La correcta elaboración de los pasos anteriores supondrán una mayor cantidad de puntos coincidentes entre las distintas fotografías, que a su vez derivará en un modelo resultante más preciso y con una superficie más homogénea y sin ruido. Esta última afirmación no es baladí, puesto que cada paso de este proceso automático de levantamiento supone largas horas de espera y cada error en la alineación de cámaras, puntos o creación de mallas requiere desechar el resultado, corregir los errores y volver a esperar mientras se procesa de nuevo.

Es aquí donde cobra importancia el hecho de trabajar con un PC actualizado y potente, pues cuanto mejor sea éste, menos tiempo tardarán en realizarse todos estos procesos. Si bien la CPU y la GPU son las que determinan la velocidad de estos procesos, es la cuantía de memoria RAM la que determina la calidad de los resultados, llegando a ser incluso limitante para poder finalizar los procesos si no se tiene una cantidad mínima determinada en función del total de imágenes a procesar.

Si bien se está trabajando y mejorando de forma continua en los algoritmos de procesado, así como en la potencia de los equipos, los tiempos que requieren estos procesos siguen teniendo un gran peso en el cómputo global de un trabajo de estas características.

### Optimización

Para un uso técnico de la fotogrametría, centrado en la precisión, documentación y catalogación, la parte compleja y larga del proceso acabaría en este punto. No obstante, para un uso de difusión y divulgación apenas es el punto de partida.

Los modelos resultantes de la fotogrametría tienen una altísima calidad debido al gran número de polígonos que contiene, lo que supone unos tamaños de archivos de varios GB de peso y que requieren equipos potentes para editarlos, moverlos y visualizarlos. Por ello es imprescindible realizar una optimización y limpieza de estos modelos que permitan su visualización independientemente de la potencia del dispositivo utilizado para verlo.

Este proceso es el que más tiempo consume con diferencia del total de un flujo de trabajo de estas características. La retopología manual es un proceso muy laborioso aunque preciso para optimizar los modelados 3D y si bien se están dando grandes avances en el desarrollo de herramientas de retopología automática que agilizan este trabajo, dichas herramientas no son completamente precisas y siempre requieren de un retoque manual posterior. Así mismo, siempre es aconsejable editar los modelos para crear envoltentes cerradas y continuas que facilitarán su uso y visualización en múltiples programas.

### UVs y Texturizado

De nada sirve tener un modelo 3D optimizado si debido a ello en el camino se pierde toda la calidad obtenida en el levantamiento fotogramétrico. Por este motivo, es imprescindible un correcto texturizado y desplegado, así como la utilización de diversos mapas que permitan recuperar toda esa calidad perdida.

Durante el proceso de texturizado se traslada una geometría 3D a una superficie 2D mediante las UV y cualquiera que sepa un poco de la problemática de las proyecciones cartográficas y la multitud de metodologías que existen para ello entenderá que este proceso no es trivial.

Es importante realizar los cortes en los lugares adecuados para que el modelo 3D se despliegue correctamente sin que se generen grandes deformaciones, que posteriormente derivarían en estiramientos en la textura 2D. Tan importante es realizar un correcto despliegue (unwrap) como distribuir de forma equitativa las islas en las distintas UV con el tamaño adecuado y por ello es necesario utilizar el método UDIM. El uso del sistema PBR para los mapas de textura y el bakeado de éstos es lo que permite recuperar la calidad perdida en el optimizado, además de aportar valores adicionales como el brillo o la reflexión metálica que no se pueden capturar en un proceso fotogramétrico.

### Representación

Los resultados que ofrece un motor de renderizado como es Unreal Engine son impresionantes, no obstante, la curva de aprendizaje que tiene también lo es, especialmente para alguien que no tenga unos mínimos conocimientos de programación o de otros softwares de renderizado avanzados. La

cantidad de opciones y parámetros de configuración y su abarrotada interfaz es una brecha que hace que sea complicado empezar a utilizar el software.

No obstante, sus creadores (Epic Games) son conscientes de ello y en la última versión que han publicado recientemente, Unreal Engine 5, han mejorado notablemente en este apartado, haciendo una interfaz mucho más amigable y accesible. Igualmente son conscientes del creciente interés que tiene el sector de la arquitectura en su motor de renderizado y por ello están haciendo grandes mejoras en Twinmotion, que se puede definir como una versión simplificada de Unreal Engine enfocada en el renderizado en tiempo real de arquitectura.

### Futuras líneas de actuación

El concepto inicial sobre el que se ha desarrollado este trabajo es lo suficientemente ambicioso para que no haya podido realizarse completamente y deja varias líneas de trabajo por las que se podría continuar:

- El objetivo de este trabajo se ha concentrado en el levantamiento de las fachadas de las casas cueva que han reconstruido en la pasada década, así como el levantamiento y reconstrucción de las fachadas y el interior de las dos cuevas que están actualmente en obras de rehabilitación. Según los resultados obtenidos con el escáner de mano, existen al menos 3 cuevas semienterradas y parcialmente derrumbadas que podrían documentarse y reconstruirse digitalmente.
- Uno de los motivos de la elección de UE5 para el desarrollo de la visita virtual son las múltiples posibilidades de interacción con los elementos del entorno. La complejidad y desconocimiento del software, así como el limitado tiempo para el desarrollo del trabajo ha supuesto que este apartado sea reducido y haya un amplio margen de mejora al respecto.
- Con los mismo motivos y justificaciones que en el punto anterior existen más líneas de actuación en lo relacionado a la exportación del trabajo, como la ejecución de la visita virtual a través de un navegador web gracias a la tecnología Pixel Streaming incorporada en UE5 o la posibilidad de visualizar dicha visita por medio de Realidad Virtual o Realidad Aumentada.

### Sobre la tecnología

- La fotogrametría en conjunto con la documentación con escáneres láser son una tecnología en auge y que sin duda cada vez va a estar más presente en los flujos de trabajo para documentación y representación. La tecnología de los escáner láser mejora año a año con modelos más rápidos, sencillos de usar y económicos, no obstante, han de mejorar los sistemas de captura fotográfica integrados para que capturen fotografías HDR y tengan un mejor postprocesado, al nivel del software integrado en cualquier smartphone del mercado.
- En los últimos años estamos dirigiéndonos hacia una democratización de la fotogrametría. Si bien siempre ha sido una disciplina altamente especializada y que requería de un costoso equipamiento específico, esto está cambiando drásticamente. Actualmente todo el mundo carga en su bolsillo con una cámara fotográfica muy capaz gracias a los smartphones (como se ha podido comprobar en la ejecución de este TFG), así como se están haciendo intentos de integrar en ellos tecnología LIDAR (iPad Pro y iPhone Pro). Además, como se ha mencionado anteriormente, los sistemas de escáner láser se están haciendo más accesibles y económicos (como la familia BLK de Leica). De la misma manera, en el apartado del software poco a poco aparecen alternativas gratuitas o reduciendo su precio para ser más accesibles, como es el caso del ecosistema que está creando Epic Games con el flujo de trabajo completo de RealityCapture para el levantamiento fotogramétrico, Mixer para el texturizado, Sketchfab y Quixel para el almacenamiento y difusión, y Twinmotion y Unreal Engine para la visualización.

## 3.2. Agradecimientos

Aquellos que me conocen sabrán que lo relativo a expresar emociones no es mi punto fuerte, no obstante y como dice el refrán, "Es de bien nacidos ser agradecidos". De este modo quiero agradecer a todas aquellas personas que me han estado apoyando a lo largo de los años en este viaje que ha sido la universidad y, en particular, la finalización de este viaje mediante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

A mis tutores de TFG, David Marcos González y José Martínez Rubio, por su implicación, correcciones e información, así como al resto del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, en especial a Jesús San José Alonso y Juan José Fernández Martín por su apoyo y predisposición cada una de las veces que fui a proponerles realizar este trabajo.

A mis compañeros y amigos, tanto de la universidad como del pueblo, que me han hecho más amable todo este camino con su compañía.

A Fran, David Lozano y Jesús que siempre han estado ahí tanto en los buenos como en los malos momentos para darme su ayuda y su apoyo.

A Beatriz, por ayudarme, escucharme y empujarme para poder finalizar todo este proceso universitario que me estaba consumiendo.

Y como no, a mi familia: mi hermana, mi padre y en especial a mi madre que ha estado siempre detrás, empujandome y sufriendo conmigo y por mí.



## **4. Anexos**

## 4.1. Glosario de términos

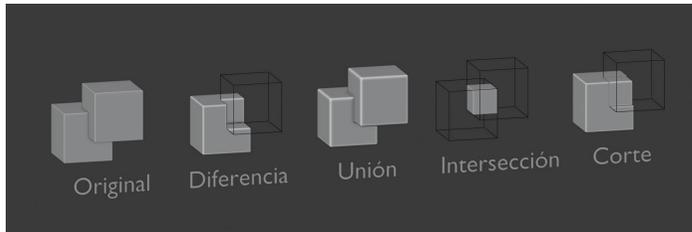


Figura 111. Operaciones booleanas comunes. Fuente: renderblue.com



Figura 112. Ejemplo de imagen 360° para su uso como HDRI. Fuente: polyheaven.com

### **Bake**

Término inglés que significa cocinar/hornear. Aplicado al mundo del 3D se traduce al hecho de transferir o generar los distintos mapas de texturas de un modelo High Poly a uno Low Poly.

### **Booleana**

Son un tipo de operaciones geométricas que se pueden realizar entre dos objetos 3d cuando se superponen. Pueden ser de tres tipos: unión, diferencia e intersección.

### **CameraRAW**

Plugin gratuito integrado en Adobe Photoshop que sirve para el revelado digital de imágenes en formato RAW. Es exactamente lo mismo que el apartado de revelado de Adobe Lightroom.

### **Decimado**

Proviene del término inglés decimate, cuya traducción correcta al castellano es diezmar, aunque en el ámbito del 3D se haya popularizado el término decimado. El significado sigue siendo el mismo, es decir, reducir o simplificar el número de polígonos de una malla 3D.

### **Georadar**

Es un radar de prospección terrestre no invasivo que utiliza pulsos electromagnéticos para la detección de discontinuidades, cavidades u objetos enterrados en el subsuelo.

### **HDRI**

Siglas de High Dynamic Range Image (Imagen de alto rango dinámico). Es un formato de imagen con profundidad de 32 bits (a diferencia de los 8 o 16 bits de las imágenes habituales) que combina varias tomas con distintos rangos de exposición lumínica.

Aplicado al mundo del 3D se trata de imágenes esféricas en formato hdri que además de utilizarse como fondo del entorno permite utilizarse como método de iluminación debido a la información lumínica que incorpora.

### High Poly

Término inglés que significa alto poligonaje. Se utiliza en el ámbito del 3D y la animación digital para referirse a modelos con un gran número de polígonos, que se traduce en un altísimo nivel de detalle y complejidad. Este nivel de detalle tiene la principal desventaja de generar archivos muy pesados y que requieren de una alta potencia para su visualización.

### LOD

Siglas de Level Of Detail (nivel de detalle). Es una técnica utilizada principalmente en el mundo de los videojuegos consistente en tener varias versiones de un mismo modelo 3D con distinto grado de resolución y cantidad de polígonos. A medida que el objeto se encuentra más lejano del punto de vista se va sustituyendo de forma gradual el modelo por uno con menos detalle con la intención de reducir la carga de procesamiento de la escena.

### Low Poly

Término inglés que significa bajo poligonaje. Se trata de los modelos 3D que tienen un número mínimo de polígonos, siendo modelos simples y hasta cierto punto algo abstractos. El bajo número de polígonos hace que sean archivos optimizados y de poco peso, fáciles de visualizar independientemente de la potencia del equipo.

Hay una corriente estilística que se ha generado a raíz de este sistema y que lleva este concepto como bandera.

### Lumen

Es el nuevo sistema de iluminación global dinámica implementado en la versión 5 de Unreal Engine. Este sistema reacciona en tiempo real a los distintos orígenes de luz resolviendo la iluminación indirecta y las reflexiones e influencias de color de los objetos cercanos. Está a un paso por debajo del nivel de

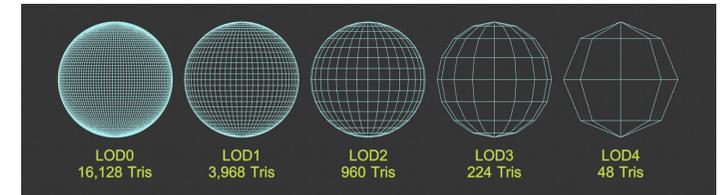


Figura 113. Ejemplo de niveles de detalle (LOD) en una esfera. Fuente: [artstation.com/samslover/blog](http://artstation.com/samslover/blog)

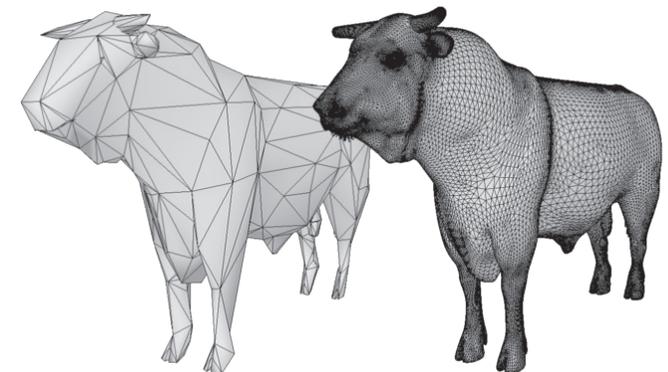


Figura 114. Diferencia entre Low poly y High poly. Fuente: [lightshape.net/en/blog](http://lightshape.net/en/blog)

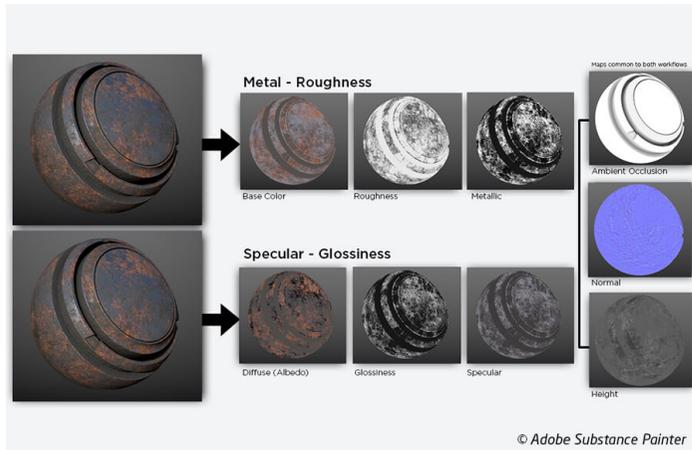


Figura 115. Mapas PBR y sus sistemas de trabajo Fuente: [substance3d.adobe.com](https://substance3d.adobe.com)

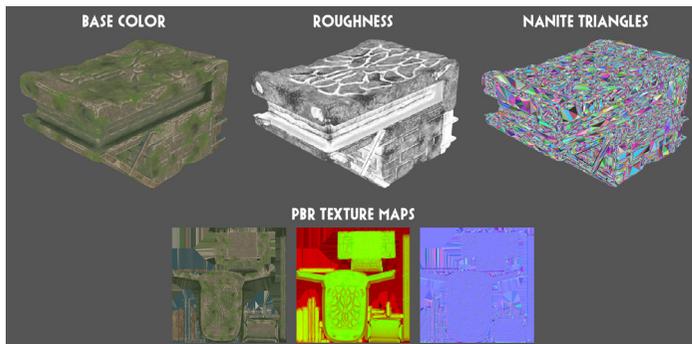


Figura 116. Ejemplo de visualización de la geometría Nanite y sus mapas PBR Fuente: [artstation.com/artwork/eJX5aJ](https://artstation.com/artwork/eJX5aJ)

calidad del sistema de RayTracing pero para muchos casos es más que suficiente y su velocidad de procesamiento compensa en gran medida su utilización.

### Mapa de texturas

Son una serie de imágenes bidimensionales que se aplican a modelos tridimensionales para otorgarles una apariencia específica realista. Son parte fundamental del sistema de texturas y materiales PBR. Los principales mapas son:

- Color/Diffuse/Albedo
- Metallic
- Roughness
- Specular
- Glossiness
- Normal
- Height/Displacement
- Ambient Occlusion

### Materiales PBR

Siglas de Physically-Based Rendering. Es un método de renderizado estandarizado basado en las propiedades físicas de los materiales y la forma en la que incide la luz en ellos. Existen dos formas de trabajo PBR: el Metal-Roughness y el Specular-Glossiness, que se diferencian en la forma de gestionar el mapa de color, reflejos y los metales, mientras que comparten el resto de mapas que otorgan relieve, opacidad, etc.

## Nanite

Es una nueva tecnología de virtualización de geometría implementada en la versión 5 de Unreal Engine. El algoritmo detrás de este sistema funciona de forma muy eficiente permitiendo trabajar con geometrías de un tamaño imposible hasta la fecha.

Cuando se activa la opción de Nanite en una malla 3d ésta se descompone en triángulos que se organizan de forma jerarquizada en grupos y clusters de distintos tamaños. A la hora de renderizar, el propio UE5 se encarga de seleccionar automáticamente los clusters dependiendo del punto de vista para aportar mayor o menor nivel de detalle, de modo que ya no es necesario crear los LOD de forma manual.

## Ngon

Polígono de “n” lados mayores de cuatro. Por norma general es un tipo de polígono a evitar debido a la dificultad de interpretar y subdividir por los programas de edición y renderizado 3D.

## Non-Manifold

La geometría “non-manifold” se podría decir que es un tipo de geometría que no existe o debería existir en la naturaleza, y que en el caso de los programas de 3D genera múltiples problemas. Hay varios tipos de problemas que se denominan de esta manera como:

- Geometría no continua y/o con huecos
- Geometría que se atraviesa y/o superpone
- Geometría o caras internas dentro de otro volumen
- Geometría separada del volumen principal
- Áreas sin superficie o espesor
- Normales opuestas

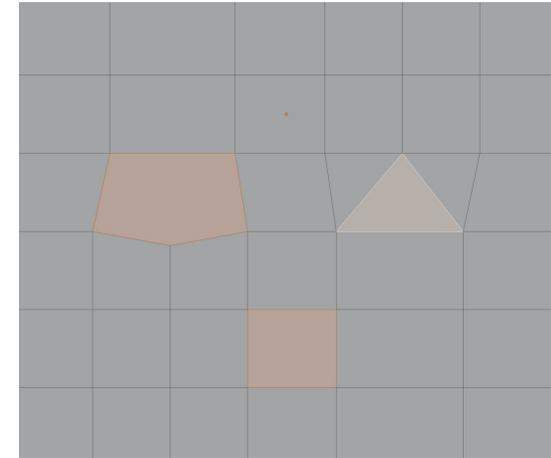


Figura 117. Diferencias entre ngon, tris y quads. Fuente: Elaboración propia

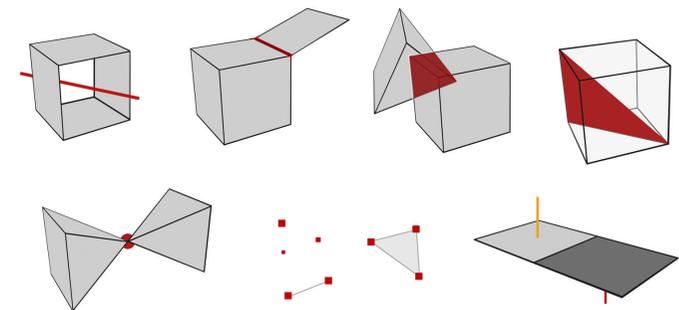


Figura 118. Ejemplos de algunos tipos de geometría non-manifold. Fuente: Elaboración propia

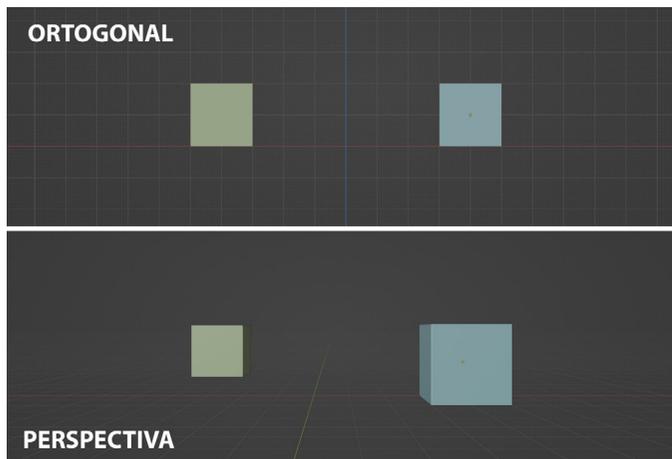


Figura 119. Diferencias entre proyección ortogonal y perspectiva. Fuente: Elaboración propia

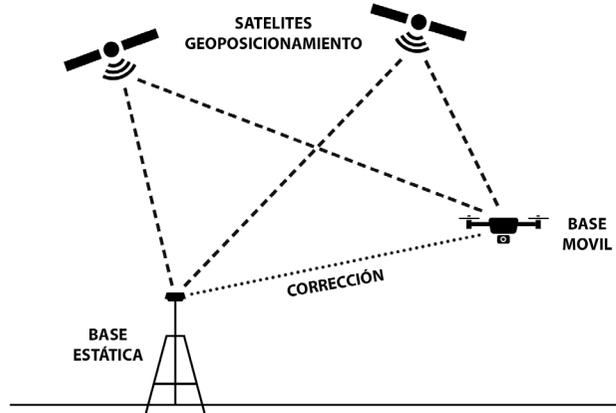


Figura 120. Esquema de funcionamiento del sistema RTK. Fuente: Elaboración propia

### Ortofoto

Imágen rectificada para tener una proyección ortogonal. A menudo asociada a la fotografía aérea utilizada para los mapas, que además de la textura como tal incorpora información adicional como el geoposicionamiento o la altimetría.

### Posicionamiento RTK

Siglas de Real Time Kinematic o posicionamiento cinemático en tiempo real. Es un sistema de geoposicionamiento con una precisión centimétrica. Se utiliza con el uso combinado de una estación base en tierra y otra móvil que están directamente comunicadas. Cada estación toma sus referencias satelitales y posteriormente utilizan los datos combinados a modo de corrección para reducir la precisión a apenas un centímetro.

### Quads

Polígono de cuatro lados. Muy utilizado para los modelos optimizados y Low Poly debido a la facilidad de poder seleccionar loops (concatenación de vértices que crean una línea, a ser posible, cerrada) y anillos (igual que los loops pero en vez de vértices serían caras). Además permiten una reducción o subdivisión de polígonos que no deforman la malla debido a que se tratan de potencias de dos. No obstante hay programas, principalmente del mundo de los videojuegos, que utilizan el modelo de tris, por lo que dividen un quad en 2 tris.

### RAW

Del inglés "crudo". Es un tipo de imagen que contiene toda la información en bruto sin procesar ni comprimir. Por este mismo motivo son archivos bastante pesados y que requieren de un procesamiento o revelado digital que establezca unos valores concretos de exposición, color, etc.

### Retopología

Es el proceso por el cual se transforma una malla 3D de alto poligonaje en una versión simplificada y de bajo poligonaje de la misma. El objetivo es reducir el número de polígonos para que sea más fácil editar, visualizar y renderizar el modelo 3D. Se puede realizar de forma automática/semiautomática

o de forma manual, siendo este último un proceso más lento y laborioso, pero que permite controlar mejor la forma y organización de la nueva topología.

### Seam

Significa costura, junta o cicatriz en inglés. En el ámbito 3D es el nombre que se le otorga a los vértices que delimitan las distintas islas que conforman los mapas de UV.

### Topología

En el ámbito del 3D se refiere a la forma y disposición en la que están ordenados los vértices y aristas de los polígonos para crear la superficie de una malla 3D.

### Tris

Polígono de tres lados. Es la unidad mínima de superficie para poder crear un modelo 3D. Si bien el estándar se centra en la utilización de quads, hay programas que trabajan con tris, como en la industria del videojuego o los programas de levantamiento fotogramétrico.

### UDIM

El sistema de trabajo UDIM es una evolución del sistema UV que permite ampliar la superficie efectiva de un mapa UV. Esto se consigue mediante una retícula en la cual cada celda es una imagen independiente asociada a un mapeado UV con la misma superficie. El sistema se basa en un sistema de coordenadas en el cual se numera cada celda, empezando por la 1001, hasta un máximo de 100 filas y 100 columnas dando así un máximo de 9999 mapas de UV enlazados.

Cada mapa de texturas tendrá la numeración asociada a su celda udim en el nombre del archivo para identificarlo.

### Unreal Engine 5

Se trata de la quinta generación del motor de videojuegos creado por la compañía Epic Games. Se anunció por primera vez en mayo de 2020, saliendo una versión preliminar en mayo de 2021 y la versión final en abril de 2022. Además de una revisión de la interfaz del programa incluye muchas

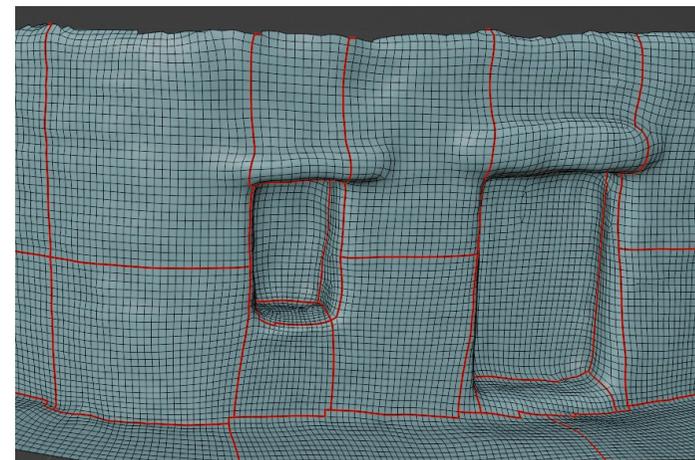


Figura 121. Seams en el modelo optimizado de la fachada rehabilitada. Fuente: Elaboración propia

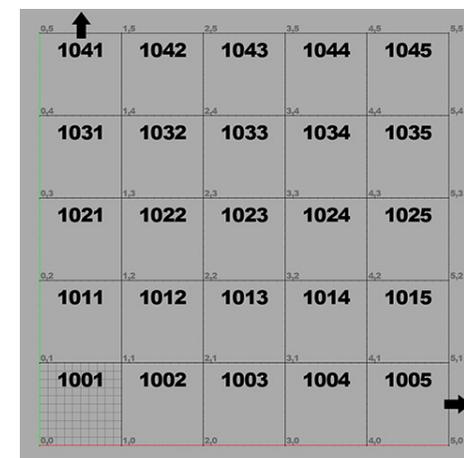


Figura 122. Sistema de coordenadas para la organización de celdas UDIM. Fuente: Elaboración propia

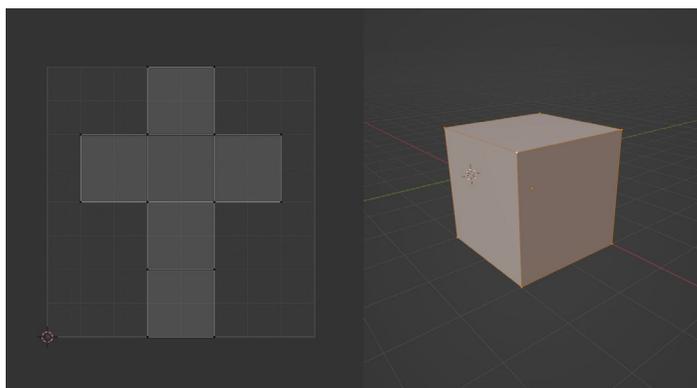


Figura 123. UV de un cubo realizada por el proceso de unwrap. Fuente: *Elaboración propia*

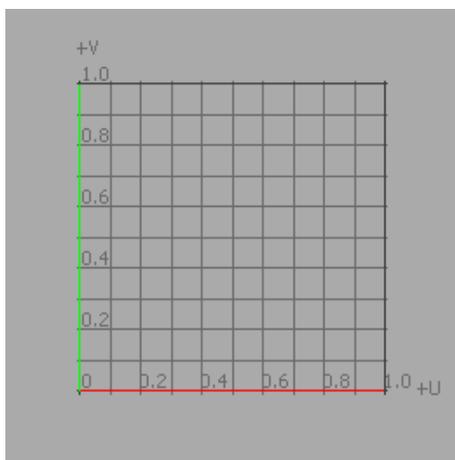


Figura 124. Representación de un sistema de coordenadas de un mapa UV. Fuente: [learn.foundry.com/modo/](https://learn.foundry.com/modo/)

nuevas tecnologías como Lumen para la iluminación, Nanite para la virtualización de grandes geometrías, Niagara para la simulación de efectos especiales, Chaos para la simulación de destrucción y deformaciones de objetos, y otras tantas novedades más.

### Unwrap

Del inglés desenvolver, es el proceso por el cual se despliegan las islas que conforman el mapa UV de un modelo 3D para visualizarlo sobre una superficie 2D. Para que la malla tenga la menor distorsión posible hay que realizar los cortes o seams de forma lógica y ordenada.

### UV

El mapeado UV es la traslación de una superficie tridimensional a un sistema de coordenadas en dos dimensiones bajo los ejes U y V, llamados así para diferenciar los x, y, z del modelo 3D. Este sistema sirve para poder aplicar las distintas texturas bidimensionales al modelo tridimensional.

## 4.2. Índice de figuras y tablas

### 4.2.1. Índice de figuras

<b>Figura 1.</b>	Alberto Durero, La perspectiva, 1525. <i>Fuente: Extraído de Buill 2008, p. 25</i>	8
<b>Figura 2.</b>	Colecciones virtuales fotogramétricas de distintos museos en Sketchfab. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	9
<b>Figura 3.</b>	Producción audiovisual de la serie “Mandalorian” con fondos fotogramétricos. <i>Fuente: Industrial Light &amp; Magic. The Emmy-winning Special Visual Effects of The Mandalorian: Season Two. Disponible en: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=Rd39daKZCI8">https://www.youtube.com/watch?v=Rd39daKZCI8</a></i>	10
<b>Figura 4.</b>	Representación del sistema Structure from Motion de fotogrametría digital. <i>Fuente: Stereo and kinect fusion for continuous 3D reconstruction and visual odometry. Disponible en: <a href="https://researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-process-is-illustrated-The-structure-in-the_fig2_269327935">researchgate.net/figure/Structure-from-Motion-SfM-process-is-illustrated-The-structure-in-the_fig2_269327935</a> [accedido 11 Sep, 2022]</i>	10
<b>Figura 5.</b>	Ilustración del fototeodolito diseñado y utilizado por Aimé Laussedat. <i>Fuente: Extraído de Maldonado 2020, p. 60</i>	11
<b>Figura 6.</b>	Representación de la fotogrametría aérea. <i>Fuente: 3D City Modelling by Photogrammetric Techniques - Scientific Figure on ResearchGate. Disponible en: <a href="https://researchgate.net/figure/12-Illustrate-the-geometry-of-aerial-photogrammetry-13_fig1_334164581">researchgate.net/figure/12-Illustrate-the-geometry-of-aerial-photogrammetry-13_fig1_334164581</a> [accedido 24 Ago, 2022]</i>	12
<b>Figura 7.</b>	Restituidor analógico mecánico Wild B-8. <i>Fuente: Extraído de Buill 2003, p. 57</i>	12
<b>Figura 8.</b>	Giovanni Battista Piranesi, Tempio antico, 1748/1749. <i>Fuente: <a href="https://nga.gov/collection/art-object-page.54568.html">nga.gov/collection/art-object-page.54568.html</a></i>	13
<b>Figura 9.</b>	van Doesburg, Theo. Construcción espaciotemporal II, 1924. <i>Fuente: <a href="https://museothyssen.org/coleccion/artistas/doesburg-theo-van/construccion-espaciotemporal-ii">museothyssen.org/coleccion/artistas/doesburg-theo-van/construccion-espaciotemporal-ii</a></i>	14
<b>Figura 10.</b>	Collage realizado por Rem Koolhaas para la ampliación del MOMA (NY). <i>Fuente: <a href="https://moma.org/collection/works/167648">moma.org/collection/works/167648</a></i>	14
<b>Figura 11.</b>	Captura de Radar CH (más tarde ArchiCAD), origen del modelado BIM en 1984. <i>Fuente: <a href="https://archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim">archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim</a></i>	15
<b>Figura 12.</b>	ArchViz interactivo realizado con Unreal Engine 5. <i>Fuente: <a href="https://www.s-dot.de">https://www.s-dot.de</a></i>	15
<b>Figura 13.</b>	Vista aérea de Trigueros del Valle. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	21
<b>Figura 14.</b>	Foto aérea de Trigueros del Valle. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	24
<b>Figura 15.</b>	Situación Trigueros del Valle, provincia de Valladolid. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	25

<b>Figura 16.</b> Emplazamiento Casas-Cueva en Trigueros del Valle. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	25
<b>Figura 17.</b> Tipologías Casas cueva. <i>Fuente: Extraído de Neila 2004, p.401, 402</i>	26
<b>Figura 18.</b> Situación de abandono y derrumbe a principios de 2005 <i>Fuente: Fotografías cedidas al Ayto de Trigueros del Valle por Mercedes Cano</i>	27
<b>Figura 19.</b> Situación de abandono y derrumbe a principios de 2005 <i>Fuente: Fotografías cedidas al Ayto de Trigueros del Valle por Mercedes Cano</i>	27
<b>Figura 20.</b> Estado del proyecto de recreación durante su paralización hacia 2017. <i>Fuente: Extraído de Contreras 2017, p.38, 41</i>	28
<b>Figura 21.</b> Estado de la zona durante las obras de rehabilitación de la segunda fase en 2022. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	28
<b>Figura 22.</b> Preparación del equipo para la toma de datos. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	29
<b>Figura 23.</b> Cristóbal y Federico preparando la toma de datos. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	30
<b>Figura 24.</b> Jose comenzando el escaneo de la ermita. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	30
<b>Figura 25.</b> Estación móvil D-RTK 2 para geoposicionamiento del dron. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	31
<b>Figura 26.</b> Jose montando el dron DJI Matrice 300 RTK. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	31
<b>Figura 27.</b> Preparando el plan de vuelo del dron DJI Matrice 300 RTK. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	32
<b>Figura 28.</b> Escaneando la ermita con el dron DJI Phantom 4 Pro. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	32
<b>Figura 29.</b> Estado actual de la fachada en obras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	32
<b>Figura 30.</b> Esquema organización de archivos y trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	33
<b>Figura 31.</b> Sistema organizativo de carpetas de los archivos de trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	34
<b>Figura 32.</b> Revelado digital de las fotografías mediante CameraRAW. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	34
<b>Figura 33.</b> Esquema organización de archivos y trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	35
<b>Figura 34.</b> Esquema organización de archivos y trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	35
<b>Figura 35.</b> Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Abril. Resultado texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	36
<b>Figura 36.</b> Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Abril. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	36
<b>Figura 37.</b> Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Mayo. Resultado texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	37

<b>Figura 38.</b>	Levantamiento de la fachada en obras con los datos de Mayo. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	37
<b>Figura 39.</b>	Visualización en CloudCompare de la nube de puntos completa obtenida con el ZebHorizon. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	38
<b>Figura 40.</b>	Recorte de la nube de puntos por el entorno de las cuevas en obras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	38
<b>Figura 41.</b>	Valores de configuración para el cálculo de normales. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	38
<b>Figura 42.</b>	Malla 3D resultante del plugin PoissonRecon en CloudCompare. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	39
<b>Figura 43.</b>	Recorte de la malla 3D mediante los Campos Escalares. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	39
<b>Figura 44.</b>	Levantamiento de la fachada rehabilitada. Resultado texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	40
<b>Figura 45.</b>	Levantamiento de la fachada rehabilitada. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	40
<b>Figura 46.</b>	Levantamiento de la fachada nueva. Resultado texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	41
<b>Figura 47.</b>	Levantamiento de la fachada nueva. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	41
<b>Figura 48.</b>	Levantamiento exterior de la Ermita. Alzado sur texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	42
<b>Figura 49.</b>	Levantamiento exterior de la Ermita. Modelo sólido. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	42
<b>Figura 50.</b>	Levantamiento interior y exterior de la Ermita. Sección con mapa de Oclusión Ambiental. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	43
<b>Figura 51.</b>	Levantamiento de la panorámica. Resultado texturizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	44
<b>Figura 52.</b>	Levantamiento de la panorámica. Modelo sólido y posicionamiento de cámaras. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	44
<b>Figura 53.</b>	Ortofoto de la zona realizada con el dron DJI Matrice 300 RTK. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	45
<b>Figura 54.</b>	Diferencia de resolución de la ortofoto de GoogleMaps frente a la realizada. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	45
<b>Figura 55.</b>	Visualización de la malla 3D, solido y renderizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	46
<b>Figura 56.</b>	Error en la importación debido al geoposicionamiento. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	47
<b>Figura 57.</b>	Visualización correcta tras eliminar el geoposicionamiento. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	47
<b>Figura 58.</b>	Panel de configuración de Quad Remesher en Blender. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	48
<b>Figura 59.</b>	Visualización de aristas del modelo High Poly. Vista general y detalle <i>Fuente: Elaboración propia</i>	49

<b>Figura 60.</b>	Visualización de aristas del modelo Low Poly. Vista general y detalle <i>Fuente: Elaboración propia</i>	49
<b>Figura 61.</b>	Seams en el modelo LP para desplegar las UV y su mapeado UV correspondiente ya optimizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	50
<b>Figura 62.</b>	Árbol de nodos del material del modelo LP con los mapas Diffuse y Normal. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	50
<b>Figura 63.</b>	Mapas de textura resultantes: Diffuse, Normal, Roughness y Ambient Occlusion <i>Fuente: Elaboración propia</i>	51
<b>Figura 64.</b>	Panel de configuración del motor de render cycles para bakear el mapa Diffuse <i>Fuente: Elaboración propia</i>	51
<b>Figura 65.</b>	Código QR para visualización de los modelos optimizados en Sketchfab <i>Fuente: Elaboración propia</i>	51
<b>Figura 66.</b>	Panel de configuración para el bakeado de mapas en Substance Painter. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	52
<b>Figura 67.</b>	Edición de puertas y ventanas con Booleanas. Vista frontal <i>Fuente: Elaboración propia</i>	53
<b>Figura 68.</b>	Edición de puertas y ventanas con Booleanas. Vista en planta <i>Fuente: Elaboración propia</i>	53
<b>Figura 69.</b>	Edición de ventana: Original, tras la booleana y tras el esculpido y suavizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	54
<b>Figura 70.</b>	Configuración de exportación en formato .OBJ en Metashape. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	55
<b>Figura 71.</b>	Configuración de "UDIM Tiles" en Blender. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	55
<b>Figura 72.</b>	Esquema resumen de los métodos de trabajo utilizados. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	56
<b>Figura 73.</b>	Estado actual del exterior e interior de las casas cueva en proceso de rehabilitación. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	57
<b>Figura 74.</b>	Proceso de recreación de la fachada. Estado Original Renderizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	58
<b>Figura 75.</b>	Proceso de recreación de la fachada. Estado final recreación Renderizado. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	58
<b>Figura 76.</b>	Estado original de la fachada de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado <i>Fuente: Elaboración propia</i>	59
<b>Figura 77.</b>	Estado de la fachada de la casa cueva tras la reconstrucción. Visualización en matcap y renderizado <i>Fuente: Elaboración propia</i>	59
<b>Figura 78.</b>	Levantamiento del interior de las cuevas. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	60
<b>Figura 79.</b>	Planta del interior de las cuevas a reconstruir. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	60
<b>Figura 80.</b>	Reconstrucción del interior de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado <i>Fuente: Elaboración propia</i>	61
<b>Figura 81.</b>	Reconstrucción del interior de la casa cueva. Visualización en matcap y renderizado <i>Fuente: Elaboración propia</i>	61

<b>Figura 82.</b> Visor 360° de StreetView de Google Maps. <i>Fuente: google.com/maps/</i>	62
<b>Figura 83.</b> Visor web de Matterport. Modo Dollhouse. <i>Fuente: matterport.com/discover</i>	62
<b>Figura 84.</b> Visor online de Twinmotion Cloud. <i>Fuente: twinmotion.com/en-US/twinmotion-cloud</i>	63
<b>Figura 85.</b> Visor Pixel Streaming de Unreal Engine <i>Fuente: youtube.com/c/UnrealEngine</i>	63
<b>Figura 86.</b> Organización del Outliner y actores necesarios para Lumen. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	64
<b>Figura 87.</b> Creación de landscape básico y aplicación de material dinámico. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	64
<b>Figura 88.</b> Prueba con el domo HDRI. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	65
<b>Figura 89.</b> Prueba con la nube de puntos del PNOA y el landscape <i>Fuente: Elaboración propia</i>	65
<b>Figura 90.</b> Creación de material mediante los blueprint. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	66
<b>Figura 91.</b> Visualización en verde de la colisión simple generada. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	66
<b>Figura 92.</b> Biblioteca de assets en la herramienta integrada en UE5 de Quixel Bridge. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	67
<b>Figura 93.</b> Pruebas de la pantalla de carga de la Interfaz de Usuario. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	67
<b>Figura 94.</b> Vista de la portada de acceso al blog. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	68
<b>Figura 95.</b> Código QR para acceder al blog dedicado del TFG. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	68
<b>Figura 97.</b> Vista por el camino junto a las casas rehabilitadas. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	69
<b>Figura 96.</b> Vista aérea del conjunto. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	69
<b>Figura 98.</b> Vista de la rampa de acceso hacia la Ermita, entre las casas de nueva construcción. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	69
<b>Figura 99.</b> Pantalla de carga y configuración de archivo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	70
<b>Figura 101.</b> Vista a pantalla completa del visor y sus opciones de visualización. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	70
<b>Figura 100.</b> Pantalla de previsualización de cada archivo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	70
<b>Figura 102.</b> Código QR para acceder al perfil de PointBox. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	70
<b>Figura 103.</b> Código QR para acceder a la colección de Sketchfab. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	71

<b>Figura 104.</b> Pantalla de carga y configuración de archivo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	71
<b>Figura 106.</b> Vista de la página de visualización de los modelos 3D. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	71
<b>Figura 105.</b> Configuración de posición y tamaño para RV. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	71
<b>Figura 107.</b> Panel de subida de vídeos y configuración en YouTube. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	72
<b>Figura 108.</b> Código QR para acceder a la lista de reproducción. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	72
<b>Figura 109.</b> Archivos necesarios para ejecutar la visita virtual. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	73
<b>Figura 110.</b> Visor Pixel Streaming de Unreal Engine <i>Fuente: youtube.com/c/UnrealEngine</i>	73
<b>Figura 111.</b> Operaciones booleanas comunes. <i>Fuente: renderblue.com</i>	84
<b>Figura 112.</b> Ejemplo de imagen 360° para su uso como HDRI. <i>Fuente: polyheaven.com</i>	84
<b>Figura 113.</b> Ejemplo de niveles de detalle (LOD) en una esfera. <i>Fuente: artstation.com/samslover/blog</i>	85
<b>Figura 114.</b> Diferencia entre Low poly y High poly. <i>Fuente: lightshape.net/en/blog</i>	85
<b>Figura 115.</b> Mapas PBR y sus sistemas de trabajo <i>Fuente: substance3d.adobe.com</i>	86
<b>Figura 116.</b> Ejemplo de visualización de la geometría Nanite y sus mapas PBR <i>Fuente: artstation.com/artwork/eJX5aJ</i>	86
<b>Figura 117.</b> Diferencias entre ngon, tris y quads. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	87
<b>Figura 118.</b> Ejemplos de algunos tipos de geometría non-manifold. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	87
<b>Figura 119.</b> Diferencias entre proyección ortogonal y perspectiva. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	88
<b>Figura 120.</b> Esquema de funcionamiento del sistema RTK. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	88
<b>Figura 121.</b> Seams en el modelo optimizado de la fachada rehabilitada. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	89
<b>Figura 122.</b> Sistema de coordenadas para la organización de celdas UDIM. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	89
<b>Figura 123.</b> UV de un cubo realizada por el proceso de unwrap. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	90
<b>Figura 124.</b> Representación de un sistema de coordenadas de un mapa UV. <i>Fuente: learn.foundry.com/modo/</i>	90

#### 4.2.2. Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b>	Equipo e instrumentos utilizados para la realización del trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	17
<b>Tabla 2.</b>	Programas utilizados para la investigación y realización del trabajo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	19
<b>Tabla 3.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D realizado con videomapping. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	35
<b>Tabla 4.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D de la fachada en obras con los datos de Abril. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	36
<b>Tabla 5.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada en obras con los datos de Mayo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	37
<b>Tabla 6.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D del interior de las cuevas. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	39
<b>Tabla 7.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada rehabilitada. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	40
<b>Tabla 8.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada nueva. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	41
<b>Tabla 9.</b>	Datos del levantamiento del 3D del exterior de la ermita. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	42
<b>Tabla 10.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D final de la fachada nueva. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	43
<b>Tabla 11.</b>	Datos y tiempos del levantamiento del 3D del entorno del pueblo. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	44
<b>Tabla 12.</b>	Resumen de los distintos modelos realizados. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	45
<b>Tabla 13.</b>	Ejemplo de la simplificación de coordenadas en el 3D del exterior de la Ermita. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	47

### 4.3. Planimetrías

Dado que se ha generado mucha documentación con el trabajo de la cual en su gran mayoría no hay precedentes, se ha considerado conveniente adjuntarla a modo de anexo en las siguientes páginas.



Figura 125. Ortofoto de la zona. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 126. Ermita de Nuestra Señora del Castillo. Alzado Sur. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 127. Ermita de Nuestra Señora del Castillo. Alzado Oeste. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 128. Ermita de Nuestra Señora del Castillo. Alzado Norte. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 129. Ermita de Nuestra Señora del Castillo. Alzado Este. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 130. Cueva de nueva construcción. Planta y Alzado. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 131. Cuevas rehabilitadas. Planta y Alzado. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 132. Cuevas en obras. Planta y Alzado. Fuente: *Elaboración propia*



Figura 133. Cuevas en obras. Planta con distribución interior. Fuente: *Elaboración propia*

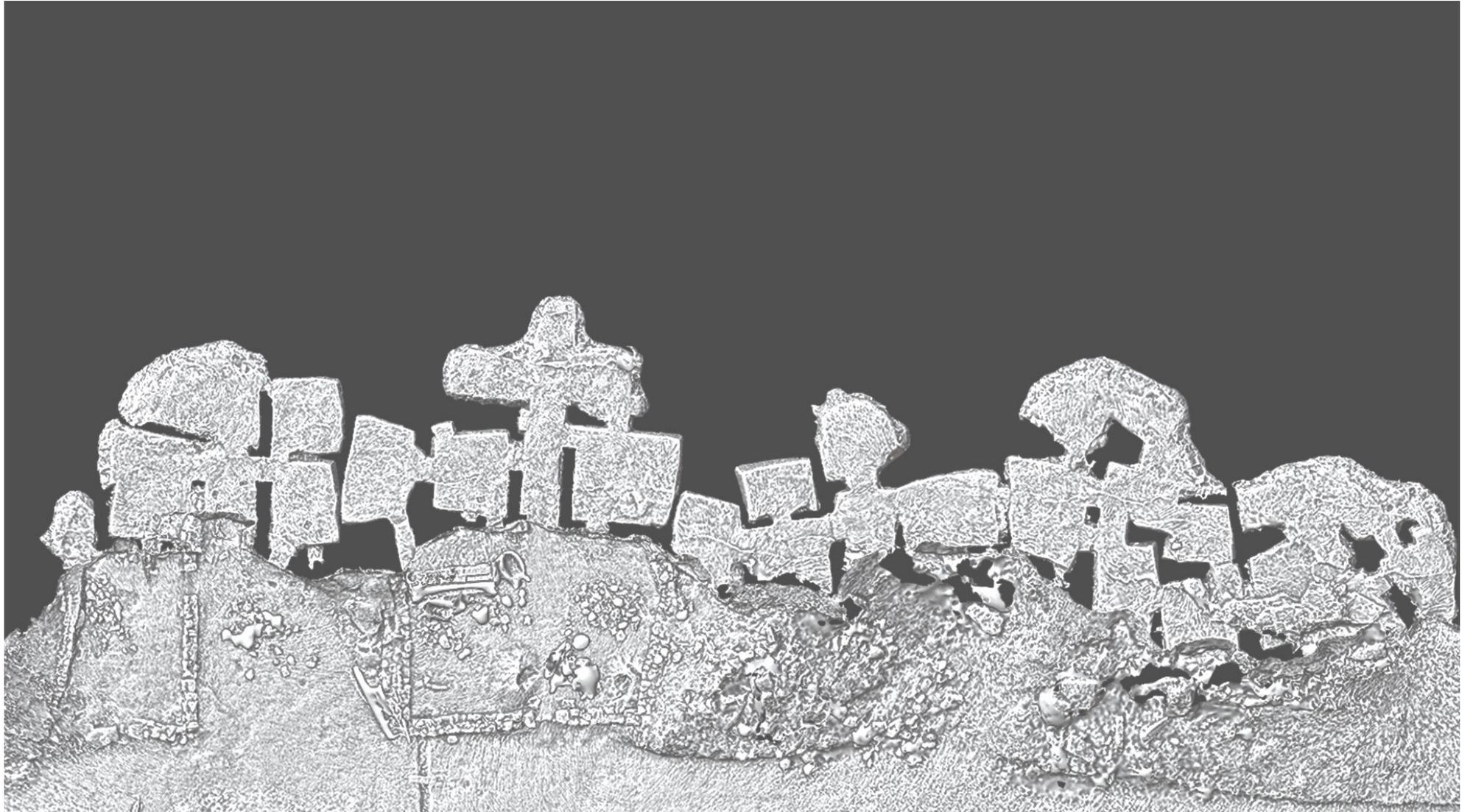


Figura 134. Distribución interior en planta de las cuevas de la ladera oeste. Fuente: *Elaboración propia*



## **5. Bibliografía**

## 5.1. Libros y artículos

A Brief History of 3D Visualizations: The Ins and Outs. (s. f.). [Easyrender.com](https://www.easyrender.com/a/a-brief-history-of-3d-visualizations-the-ins-and-outs). [Consulta: 14 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.easyrender.com/a/a-brief-history-of-3d-visualizations-the-ins-and-outs>

ALMAGRO, Antonio. Fotogrametría para arquitectos. El estado de la cuestión. 2000.

ALMAGRO, Antonio. Levantamiento arquitectónico. Universidad de Granada, 2004.

BANFI, Fabrizio; BRUMANA, Raffaella; STANGA, Chiara. Extended reality and informative models for the architectural heritage: from scan-to-BIM process to virtual and augmented reality. 2019.

BECKER, K., 2021. Welcome to the future of 3D Virtual Art. Medium [en línea]. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://soulbank.medium.com/welcome-to-the-future-of-3d-virtual-art-f4957055b49c>

BENICIO DA FONSECA, Geraldo. La representación gráfica arquitectónica. Entre la continuidad y la innovación. *Arquitextos*, São Paulo, año 11, n. 132.04, Vitruvius, mayo 2011

BUILL POZUELO, Felipe; RODRÍGUEZ JORDANA, Joan J.; NÚÑEZ ANDRÉS, María Amparo. Fotogrametría analítica. Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.

BUILL POZUELO, Felipe; RODRÍGUEZ JORDANA, Joan J.; NÚÑEZ ANDRÉS, María Amparo. Fotogrametría arquitectónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2008.

CARO, José L.; HANSEN, Salvador. De la fotogrametría a la difusión del patrimonio arqueológico mediante game engines: Menga un caso de estudio. *Virtual archaeology review*, 2015, vol. 6, no 12, p. 58-68.

CERKEC, Beatriz Tómsic. El nacimiento del dibujo arquitectónico. *Arte, individuo y sociedad*, 1999, no 11, p. 69.

- CONTRERAS LEIVA, Paloma. Las casas cueva de Trigueros del Valle en Valladolid. Análisis funcional y constructivo. 2017.
- DE CASTILLA Y LEÓN, D., 2021. Trigueros desentierra un tesoro único. Diario de Castilla y León [en línea]. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://diariodecastillayleon.elmundo.es/articulo/castilla-y-leon/trigueros-desentierra-tesoro-unico/20210307205412024508.amp.html>
- DE SEVILLA, Principios. Los Principios de Sevilla: Principios Internacionales de la Arqueología Virtual. Forum Internacional de Arqueología Virtual. 2012.
- DE VALLADOLID, D., 2017. La vuelta a la vida de las cuevas. Diario de Valladolid [en línea]. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://diariodevalladolid.elmundo.es/articulo/provincia/la-vuelta-a-la-vida-de-las-cuevas/20171002134421232945.html>
- FORAMITTI, Hans. The use of photogrammetry in restoration. *Studies in Conservation*, 1980, vol. 25, no sup1, p. 57-59.
- HAMILTON, Andrew; BROWN, Ken. Photogrammetry and Star Wars Battlefront. *GDC 2016*. EA DICE.
- HERNÁNDEZ, Luis, et al. La percepción del espacio en la visualización de arquitectura mediante realidad virtual inmersiva. *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 2011, vol. 16, no 18, p. 252-261.
- LÓPEZ FRAILE, Francisco José. La infografía 3D como sistema de documentación y divulgación. *Técnicas aplicadas a la Arqueología. Estudios de diseño gráfico*, 2007, p. 429-444.
- MALDONADO RUIZ, Alexis. *La aplicación de la fotogrametría (SFM) y las nuevas tecnologías para la mejora de la documentación, difusión y divulgación del patrimonio arqueológico*. 2020. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- MARCOS GONZÁLEZ, David. *Virtualización del patrimonio. Definición de una metodología de documentación y difusión del patrimonio arquitectónico*. 2022. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid.

- MARTÍN CRIADO, Arturo. Casas subterráneas en los Torozos orientales. 2016.
- MARTÍN CRIADO, Arturo. Paisajes subterráneos en Castilla y León: Casas-cueva, bodegas y santuarios. 2019.
- OLIVER GAÑÁN, Raúl. Levantamiento topográfico y fotogramétrico del anfiteatro romano de Tarragona. 2013. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya.
- PAREDES MALDONADO, Miguel; BUTRAGUEÑO DÍAZ-GUERRA, Belén. Arquigrafías. En *XIV Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*. Universidad de Valladolid, 2012. p. 947-953.
- PAUL, Catherine. Evolution of 3D Modeling In Architecture and Design: a 30-year Retrospective. [ArchiCGI.com](https://archicgi.com) [Consulta: 14 agosto 2022] Disponible en: <https://archicgi.com/cgi-news/evolution-of-3d-modeling-retrospective/>
- PÉREZ GÓMEZ, Alberto. Perspectiva y representación arquitectónica. *EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 2005, no 10, p. 94-105.
- Photogrammetry: making Nanite meshes for UE5. [Inu-games.com](https://inu-games.com) [en línea]. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://inu-games.com/photogrammetry/>
- R., G.R., 2021. Más casas cueva en Trigueros del Valle. El Día de Valladolid [en línea]. [Consulta: 6 julio 2022]. Disponible en: <https://www.eldiadevalladolid.com/noticia/Z3B8261C2-FD63-1712-07BE531EB2724000/202111/Mas-casas-cueva-en-Trigueros-del-Valle>.
- SAINZ AVIA, Jorge. El dibujo de arquitectura: teoría e historia de un lenguaje gráfico. 1990.
- TARRAFA RAMOS, Luis. Real-Time 3D ArchViz. 2015.
- TORRES JIMÉNEZ, Raúl. Levantamiento fotogramétrico del destacamento militar de "El Portitxol"(1936-39). 2019.

## 5.2. Webs y vídeos

### Webs

ADOBE SUBSTANCE 3D Community Assets. Disponible en: <https://substance3d.adobe.com/community-assets>

ArchViz Interactive UI. Disponible en: <https://www.s-dot.de/php/projectcollection.php?index=216>

ARTSTATION. Disponible en: <https://www.artstation.com>

POLY HEAVEN. Disponible en: <https://polyhaven.com>

QUIXEL MEGASCANS. Disponible en: <https://quixel.com/megascans/>

SKETCHFAB. Disponible en: <https://sketchfab.com>

UNREAL ENGINE 5 Documentation. Disponible en: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/>

### Canales Youtube:

BLENDER GURU. Disponible en: <https://www.youtube.com/user/AndrewPPrice>

BLENDTUTS-ES. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/Blendtutses>

GLUKOZ. Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UC5903Mlph-EcsmVb78bZeoQ>

ISCAR SOFTWARE DE ARQUITECTURA S.L. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/iscarsoftwarearquitectura>

JOE GARTH. Disponible en: <https://www.youtube.com/user/HavokSage>

KORE FORMACION. Disponible en: [https://www.youtube.com/channel/UCxwPeWM7xUcC\\_UHpMZu-PVaA](https://www.youtube.com/channel/UCxwPeWM7xUcC_UHpMZu-PVaA)

PABLO SERRANO. Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UC44rGY8nD9XIZpOkKO5MQSA>

PROFE IVAN. Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UCGMI9OOKlwVEfrbEu0T3mww>

PWNISHER. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/pwnisher>

QUIXEL. Disponible en: <https://www.youtube.com/user/quixelteddy>

STEFAN DOETSCHEL. Disponible en: [https://www.youtube.com/channel/UCG4P6f6\\_i4oq9AdiZMpl2mA](https://www.youtube.com/channel/UCG4P6f6_i4oq9AdiZMpl2mA)

TUTORIALES KAMES. Disponible en: [https://www.youtube.com/channel/UCJcLpJDVj\\_dbbT7HmH6Q61w](https://www.youtube.com/channel/UCJcLpJDVj_dbbT7HmH6Q61w)

TWINMOTION. Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UCOjK8lWjcjDowBMKV7n3xhA>

UNF GAMES. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/unfgames>

UNREAL ENGINE. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/UnrealEngine/>

UNREAL SENSEI. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/UnrealSensei>

VR DIVISION. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/VRDivision>

WILLIAM FAUCHER. Disponible en: <https://www.youtube.com/c/WilliamFaucher>

## Videos

- ACADEMIC PHOENIX PLUS, 2021. How to Bake Normal Maps using Substance Painter. [en línea]. [Consulta: 1 junio 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/WmDGGKxEL8M>
- ASPLAND, M., 2020. How to make A hole in the landscape - Unreal Engine 4 tutorial. [en línea]. [Consulta: 4 julio 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/vgx40DhXYtA>
- BOOST, C.G., 2021. Introduction to UDIMs in Blender. [en línea]. [Consulta: 16 junio 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/55sGQLX7iho>
- C-MEDIA, 2018. Tutorial | Photogrammetry Asset. [en línea]. [Consulta: 17 febrero 2020]. Disponible en: <https://youtu.be/BrRzeMY-aQI>
- CHERNOBOG STUDIO, 2021. Enable Collision on Nanite Meshes | Unreal Engine 5. [en línea]. [Consulta: 26 enero 2022]. Disponible en: [https://youtu.be/4k\\_\\_YjrXlus](https://youtu.be/4k__YjrXlus)
- CLAREMONT, B., 2021. Matterport vs. Matterport ALTERNATIVES: Which is the best? [en línea]. [Consulta: 17 noviembre 2021]. Disponible en: <https://youtu.be/Tfh1MkwajYE>
- DAVIDMARTIMAR, 2020. Indesign TUTORIAL español BASICO. [en línea]. [Consulta: 27 agosto 2021]. Disponible en: [https://youtu.be/JSM\\_TJHdZOM](https://youtu.be/JSM_TJHdZOM)
- DEALERS, C.G., 2022. Create a massive open world map in 15 minutes - Unreal Engine 5. [en línea]. [Consulta: 6 abril 2022]. Disponible en: [https://youtu.be/NZR\\_lqTZlu4](https://youtu.be/NZR_lqTZlu4)
- EVERYPOINT, 2021. How to Turn a Point Cloud to a Mesh Using CloudCompare. [en línea]. [Consulta: 4 abril 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/m43usERF33M>
- FANTASY, F., 2021. Import and use HRDI's in Unreal Engine 5. Light and add depth to your scenes. [en línea]. [Consulta: 22 mayo 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/IBouYe-3Jj4>

- FOSTER, S., 2021. LiDAR in Unreal (02) Visualization & Performance Basics. [en línea]. [Consulta: 21 diciembre 2021]. Disponible en: <https://youtu.be/DXwekpXbuCM>
- JOVE, G., 2022. UE5 - Simple Landscape Auto Material Tutorial. [en línea]. [Consulta: 20 junio 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/XppHH4USJIs>
- LEBROV, A., 2018. How to create an HDRI map. [en línea]. [Consulta: 22 mayo 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/etOkjirTfa8>
- MAWI UNITED GMBH, 2021. MAWI Tutorial | Unreal Engine 5 - Scandata to Nanite. [en línea]. [Consulta: 13 junio 2022]. Disponible en: [https://youtu.be/0jfq6Lj\\_mYA](https://youtu.be/0jfq6Lj_mYA)
- OTTER, S., 2020. How to open new level with box trigger in UE4. [en línea]. [Consulta: 4 julio 2022]. Disponible en: <https://youtu.be/nSDIGj0Pqbg>
- SURIN, 2021. Ray Tracing on your Web browser ! Unreal engine 4 Tutorial. [en línea]. [Consulta: 20 diciembre 2021]. Disponible en: <https://youtu.be/uG6kybkxlac>
- TOPOGRAFÍA, A.-T., 2020. Trimble X7 Escáner y Trimble Perspective. [en línea]. [Consulta: 31 enero 2022]. Disponible en: [https://youtu.be/9i\\_uGqoxcdM](https://youtu.be/9i_uGqoxcdM)



