

***Facultad
de
Ciencias***

**RECONSTRUCCIÓN Y VISUALIZACIÓN 3D
DE FONDOS MARINOS A PARTIR DE
VÍDEOS**
(3D Reconstruction and Visualization of
Seafloors from Videos)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

Autor: Pablo Díaz Díaz

Director: Adolfo Cobo García

Co-Director: Luis Rodríguez Cobo

Junio - 2024

Resumen

La exploración de cuevas submarinas presenta grandes desafíos debido a las cambiantes y extremas condiciones del entorno así como su inaccesibilidad. La reconstrucción tridimensional (3D) de estas cuevas no solo facilita su estudio científico, sino que también contribuye a la preservación de su biodiversidad y estructura, además de promover la exploración de zonas desconocidas. Este trabajo de fin de grado se enfoca en el desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas de reconstrucción 3D para mapear y visualizar una cueva submarina, utilizando tecnologías modernas como la fotogrametría.

El objetivo es obtener un modelo 3D detallado que permita explorar la cueva en profundidad y monitorear el hábitat allí presente. Para ello, se emplearán herramientas especializadas como Reality Capture, que permiten generar modelos tridimensionales precisos a partir de imágenes. La captura de vídeos subacuáticos de alta calidad será procesada mediante algoritmos de fotogrametría para acabar creando un modelo digital detallado de la cueva.

Este resultado facilitará tanto el estudio de la morfología de la cueva como el control del ecosistema que alberga. Además, la implementación de estas tecnologías avanzadas abrirá nuevas oportunidades para la exploración y conservación de otros entornos subacuáticos similares, contribuyendo al avance del conocimiento en espeleología submarina y conservación de ecosistemas únicos.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, fotogrametría, modelo, cueva, fondo marino, hábitat marino.

Abstract

Exploring underwater caves presents significant challenges due to the changing and extreme environmental conditions, as well as their inaccessibility. The three-dimensional (3D) reconstruction of these caves not only facilitates their scientific study but also contributes to the preservation of their biodiversity and structure, in addition to promoting the exploration of unknown areas. This undergraduate thesis focuses on the development and application of advanced 3D reconstruction techniques to map and visualize an underwater cave using modern technologies such as photogrammetry.

The goal is to obtain a detailed 3D model that allows for in-depth exploration of the cave and effective monitoring of the habitat present there. To achieve this, specialized tools like Reality Capture will be used, which enable the generation of precise 3D models from images. The capture of high-quality underwater videos will be processed through photogrammetry algorithms to ultimately create a detailed digital model of the cave.

This outcome will facilitate both the study of the cave's morphology and the monitoring of the ecosystem it harbors. Additionally, the implementation of these advanced technologies will open new opportunities for the exploration and conservation of other similar underwater environments, contributing to the advancement of knowledge in underwater speleology and the conservation of unique ecosystems.

Keywords: 3D reconstruction, photogrammetry, model, cave, seafloor, marine habitat.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Introducción	6
1.2. Motivación	8
1.3. Estructura del documento	9
2. Estado del arte	10
2.1. Reconstrucción 3D	10
2.2. Reconstrucciones activas o pasivas	11
2.3. Reconstrucciones aéreas	11
2.4. Reconstrucciones submarinas	14
2.5. Reconstrucciones aéreas vs submarinas	16
3. Software y técnicas de reconstrucción	18
3.1. Etapas de la reconstrucción y algoritmos usados	18
3.1.1. Captura de los datos	18
3.1.2. Preprocesamiento de datos	19
3.1.3. Detección y emparejamiento de puntos clave	20
3.1.4. Triangulación de la geometría	23
3.1.5. Filtrado y refinamiento	24
3.1.6. Colorización de la nube de puntos	25
3.1.7. Texturización	25
3.2. Software de reconstrucción	26
3.2.1. Colmap	26
3.2.2. Meshroom	27
3.2.3. PIX4D	27
3.2.4. Reality Capture	28
4. Software Usado	29
4.1. Tecnologías Utilizadas	29
4.1.1. Da Vinci Resolve	29
4.1.2. Python	29

4.1.3. Reality Capture	30
4.1.4. LaTeX	30
5. Trabajo realizado	31
6. Limitaciones	41
6.1. Físicas	41
6.2. Temporales	41
7. Conclusiones y líneas futuras	43
7.1. Líneas futuras	43
7.2. Conclusiones	44

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los fondos marinos mediante técnicas de reconstrucción 3D, para comprender mejor su morfología y características, y así destacar su importancia para el ecosistema marino y el planeta.

Los océanos ocupan más del 70% de la superficie del planeta, albergando una cantidad considerable de vida y ecosistemas variados, que son clave para la salud de la Tierra. Sin embargo, y a pesar de su extensión y relevancia, explorar y entender estos fondos marinos sigue siendo un reto debido a su inaccesibilidad y su vastedad.

Hemos mencionado que las zonas marinas son clave para el buen funcionamiento del planeta, pero ¿por qué?

- Hábitat para la vida marina: Los fondos marinos proporcionan unas condiciones de vida críticas que sirven como ecosistema para una gran cantidad de animales acuáticos.
- Regulación climática: Los océanos son una pieza clave en la regulación del clima, siendo esta una época en la que el cambio climático es un tema tan importante y de debate, las zonas abisales sirven como control del mismo. El ejemplo perfecto son las algas y corales que absorben dióxido de carbono (CO_2), mitigando así el efecto invernadero y ayudando a estabilizar el clima global.
- Ciclo global de los nutrientes: El lecho marino juega su papel en el ciclo global de los nutrientes, albergando bacterias y microorganismos, de modo que colaboran en la descomposición de la materia orgánica y liberación de nutrientes esenciales para la vida marina.
- Recursos naturales: Estas zonas marinas también son ricas en recursos naturales como minerales, petróleo y gas, lo que las hace zonas de especial interés. Sin em-

bargo, es importante que la extracción de los recursos sea de una manera sostenible con el objetivo de no dañar los ecosistemas submarinos.

- Regulación del ciclo del agua: Las zonas abisales influyen en los patrones de circulación oceánica y en la formación de corrientes marinas, que son fundamentales para la distribución del calor y la energía en la Tierra, de modo que tienen un impacto significativo en los patrones climáticos.

Como hemos dicho, el fondo oceánico es clave en el devenir del planeta por lo que los científicos marinos tienen que buscar la manera de poder estudiar estas áreas tratando de ser lo más efectivos posible, ahorrando tiempo y recursos.

Las Áreas Marinas Protegidas (AMP) son unas figuras claves en la conservación de la biodiversidad presente en la zona abisal. De hecho, podemos apreciar la importancia de estas áreas en algunos datos como que España ha aumentado su espacio marino protegido del 1 % al 12 % en tan solo unos años, y se avanza con el objetivo de poder declarar el 30 % de nuestros mares para el año 2030. Además, existen organismos de protección ambiental en territorio español como son la Red de Parques Nacionales, que avalan la protección de los espacios y soportan la investigación en la amplia red de parques que controlan.

De hecho, son tan importantes los fondos marinos que algunos espacios se declaran Parques Nacionales por el interés de estos. Concretamente, el Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las islas Atlánticas de Galicia y el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera son declarados Parques Nacionales en gran medida por las zonas acuáticas. En este último precisamente se ha obtenido el vídeo que se usará como base para la reconstrucción 3D, debido a su biodiversidad única y su importancia climática, como reflejan las nacras que allí habitan, un molusco en peligro de extinción que se encuentra principalmente en el Mar Mediterráneo y en el Mar Menor.

La importancia de los fondos marinos está clara, pero también es crucial entender la importancia de cartografiar estas áreas.

- Estudio de la morfología marina: La reconstrucción 3D permite el estudio de la morfología submarina, pudiendo conocer la forma y la estructura del suelo submarino con un alto nivel de detalle, lo cual nos puede ayudar a controlar la interacción entre procesos geológicos y la vida marina.
- Investigación de la distribución de las especies: La investigación de la distribución de especies puede verse mejorada gracias a los modelos creados, permitiendo entender la distribución de animales marinos y los factores que influyen en la distribución de la vida acuática, lo cual es clave para conservar la biodiversidad de las regiones.
- Análisis del cambio ambiental: El modelado de las zonas permite un análisis del cambio ambiental gracias a la posibilidad de comparar los fondos marinos en diferentes momentos, consiguiendo así detectar cambios en la distribución de los hábitats y

en la erosión del terreno.

- Exploración de recursos naturales submarinos: La cartografía sirve para la inspección de recursos como pueden ser los depósitos minerales, yacimientos de petróleo y gas, y áreas de interés para la pesca y la acuicultura. Es importante conocer el terreno para poder planificar la explotación de las superficies de una manera sostenible y garantizar su conservación.



Figura 1.1: Imagen tomada durante el estudio del fondo en Cabrera

1.2. Motivación

El objetivo principal del trabajo es abordar la reconstrucción 3D de una cueva submarina ubicada en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. En concreto, se busca crear un modelo tridimensional a partir de un vídeo de la zona, usando técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y modelado 3D. Con esto se pretende conseguir un conocimiento más profundo sobre la biodiversidad y orografía del terreno de modo que los estudios científicos sean más asequibles de realizar.

Todo esto puede servir como una manera efectiva de gestionar las Áreas Marinas Protegidas, intentando que se pueda automatizar más el proceso ya que una vez que se haya reconstruido el terreno, se podrían llegar a identificar automáticamente las especies de la zona, detectar cambios, tomar distancias..., siendo todo ello una ardua tarea sobre el área debido a la idiosincrasia del mismo. Consiguiendo unos resultados precisos se podría trabajar todo esto a través de la reconstrucción, simplificando todas estas tareas.

La cartografía del terreno tiene diversas utilidades y permite simplificar alguna de las tareas mencionadas. Sin embargo, la propia reconstrucción del terreno es un proceso laborioso y complejo, que supone un desafío por resolver. La falta de visibilidad, la varia-

bilidad de las condiciones del agua y la ausencia de datos complican el proceso. Esto hace que sea necesario el uso de tecnologías avanzadas, unos algoritmos sofisticados y precisos y una cuidadosa calibración para lograr resultados minuciosos y correctos.



Figura 1.2: Trabajos realizados en la isla de Cabrera

1.3. Estructura del documento

Tras esta introducción a la importancia del estudio de los fondos marinos y su control, usando la reconstrucción 3D como herramienta de partida, a continuación, se abordan los conceptos fundamentales sobre la cartografía del terreno y todos los usos que se le pueden dar. Posteriormente, se describe el proceso de reconstrucción y los diferentes softwares que se pueden usar. En el siguiente capítulo se explican las tecnologías utilizadas para llevar a cabo el trabajo. A continuación, se explica todo el proceso realizado para obtener los resultados conseguidos. También, se detallan las diferentes limitaciones que se han encontrado en la realización del trabajo. Por último, se detallan líneas de investigación futuras y se exponen una serie de conclusiones.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo nos centraremos en la actualidad de las reconstrucciones 3D para entender mejor qué son y cuál es su propósito. Principalmente el objetivo es apreciar la diferencia entre las reconstrucciones aéreas y las submarinas para apreciar la dificultad que tiene realizar las segundas.

2.1. Reconstrucción 3D

La reconstrucción 3D es una técnica de computación que permite crear modelos tridimensionales partiendo de objetos, superficies, imágenes o vídeos. Los resultados deben mantener la característica física de aquello que queremos reproducir, es decir, sus dimensiones, volumen, forma, color...

Aunque parezca una técnica novedosa, ya en las décadas de 1960 y 1970 se empezaron a utilizar las reconstrucciones en los campos de la ingeniería y la investigación científica. Incluso, nos podemos remontar a mediados del siglo XX como la época en la que los científicos e ingenieros comenzaron a interesarse por construir los objetos en tres dimensiones, aunque con unos sistemas y una tecnología muy alejada de la actual.

Uno de los primeros adelantos logrados en el campo de las reconstrucciones 3D fue posible gracias al desarrollo de la computación a mediados de 1960, debido al avance de los gráficos por computador. Según la tecnología mejoraba, se fueron desarrollando y optimizando algoritmos y métodos que permitían generar modelos tridimensionales a partir de una serie de datos digitales como imágenes y coordenadas espaciales.

En los años siguientes los resultados se volvieron más precisos gracias al progreso de la visión por ordenador, desarrollando una serie de técnicas como la fotogrametría, el escaneo láser y la captura de imágenes gracias a los satélites, permitiendo de esta manera el modelado 3D en base a diferentes técnicas que permiten comparar y obtener unos resultados más detallados y realistas.

El avance de la capacidad de computación y el desarrollo y optimización de los algoritmos han conseguido que las reconstrucciones tridimensionales sean usadas en una amplia variedad de campos dispares, como son la arqueología, la medicina, la industria del espectáculo, la ingeniería y en diversos ámbitos de nuestra vida.

De hecho, hoy en día los modelos 3D son usados en aspectos críticos de la vida como pueden ser la planificación de cirugías en el campo médico o en ámbitos más ociosos como la creación de efectos especiales en el cine o en los videojuegos.

2.2. Reconstrucciones activas o pasivas

En el mundo de las reconstrucciones 3D debemos diferenciar entre las activas y las pasivas. Su contraste reside en la forma de obtener los datos para luego trabajar con ellos.

Por un lado, en las reconstrucciones activas se necesita la emisión de algún tipo de energía o señal desde el dispositivo de captura hacia el objeto que se pretende escanear. Un ejemplo de reconstrucciones activas son las tecnologías LiDAR o el escaneo basado en la luz.

Por otro lado, en las reconstrucciones pasivas no se emite ningún tipo de señal hacia el objeto, sino que registra la luz que llega al sensor desde la escena. En este enfoque más tradicional, se usan imágenes digitales tomadas desde diferentes ángulos para abarcar toda la zona de estudio.

Ambas opciones tienen sus ventajas e inconvenientes ya que, por un lado, las reconstrucciones activas suelen ser más precisas y controladas pero suelen necesitar de equipos más complejos y de unas condiciones de luz que no siempre es posible tener. En contraste, la reconstrucción pasiva es menos intrusiva y puede no necesitar de equipos tan sofisticados, lo cual tiene consecuencias a la hora de comprobar la calidad del modelo, que será un poco menor si la comparamos con las reconstrucciones activas.

2.3. Reconstrucciones aéreas

La reconstrucción aérea es un tipo de modelado 3D que se basa en el uso de imágenes capturadas a través de aviones, satélites o una opción más novedosa y cada vez más usada como son los drones.

Las fotografías usadas se pueden realizar con una cámara común RGB o con tecnología más avanzada, como los sensores multiespectrales, para aplicaciones específicas. También es común el uso de LiDAR (Light Detection and Ranging), para la captura de datos de elevación de alta precisión, lo cual se basa en la utilización de pulsos láser que permite medir la distancia a los objetos.

Existen diferencias según la manera en la que se capturan los datos. Las cámaras RGB convencionales toman la información a través de los tres colores primarios: rojo, verde y azul. Se utilizan para capturar el entorno visible y se generan con ello modelos 3D desde diferentes ángulos. Respecto a los sensores multiespectrales, las adquisiciones se realizan en varias bandas espectrales, que van más allá del espectro visible y pueden incluir bandas infrarrojas y ultravioletas. Dichos sensores proporcionan información sobre reflectancia de la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda. Por último, las técnicas LIDAR utiliza pulsos láser para medir distancias y generar nubes de puntos tridimensionales del terreno y objetos en el entorno, y permiten trabajar en entornos difíciles donde las cámaras RGB tienen más problemas a la hora de capturar el entorno de una manera óptima.

Una vez capturadas las imágenes, se lleva a cabo un proceso que puede ser parecido tanto en las reconstrucciones aéreas como en las submarinas y se discute en el Capítulo 3.

Es una tecnología de popularidad creciente debido en gran parte al avance de los drones, provocando que estas técnicas sean más accesibles a la gente debido a una disminución en el coste de la captura de imágenes y la posibilidad de que cada persona tome los datos con su propio dron y realice el modelado gracias al uso de algún software y al desarrollo y aplicación de la IA en el proceso, como la segmentación de las imágenes y la detección de características comunes.

Esta actividad sin embargo también tiene dificultades y es que la precisión de las reconstrucciones depende en gran medida de la calidad de las imágenes y de la geolocalización, debiendo ser esta lo más exacta posible para que no haya distorsiones en el modelo generado.

La importancia de todo esto realmente se puede apreciar en las aplicaciones que tiene, las cuales son numerosas y variadas.

- Cartografía y Topografía: Gracias a la captura de imágenes aéreas se pueden crear mapas 3D que permiten observar detalladamente las características de una región, permitiendo esto un estudio y planificación de la gestión medioambiental o la ingeniería civil.
- Agricultura de Precisión: La agricultura es un campo que ha avanzado mucho recientemente y se puede ver en la aplicación que puede tener el modelo tridimensional, permitiendo monitorear cultivos, evaluar la salud de los mismos y detectar problemas a tiempo y de manera más rápida que sobre el terreno como pueden ser las plagas o las sequías. Gracias a esto se puede conseguir una mayor productividad del terreno.



Figura 2.1: Uso del software PIX4D para estudiar los cultivos

- Gestión de Recursos Naturales: Los bosques o las aguas pueden ser monitorizadas gracias a las reconstrucciones, permitiendo observar cambios en la cubierta forestal o evaluar la calidad del agua.
- Gestión de Desastres: En situaciones de catástrofes naturales como pueden ser las inundaciones, los incendios o los terremotos, se pueden usar los modelos construidos para gestionar respuestas de una manera más rápida y estudiar la recuperación de las áreas dañadas. En el terremoto de Kahramanmaraş ya fue usada esta técnica para una veloz evaluación de los daños.

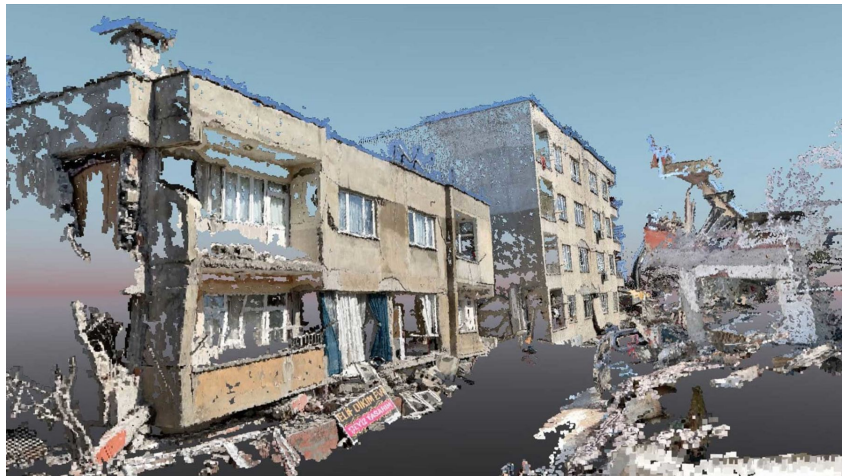


Figura 2.2: Terremoto de Kahramanmaraş visto en 3D

- Planificación Urbana y Arquitectura: Los modelos 3D permiten la visualización de propuestas de diseño, consiguiendo así una vista anticipada de las construcciones.



Figura 2.3: Uso de drones y reconstrucción 3D en la construcción

- Turismo: Se pueden crear experiencias virtuales inmersivas para los turistas de modo que puedan obtener un avance de los lugares y permita planifiquen su destino en función de los modelos creados.
- Seguridad y Vigilancia: Las reconstrucciones tridimensionales pueden ayudar a planificar rutas, vigilar fronteras o detectar cambios en el terreno, permitiendo así visualizar los puntos clave que deben ser controlados, pudiendo ayudar así al cumplimiento de la ley.

2.4. Reconstrucciones submarinas

La reconstrucción 3D submarina es el proceso mediante el cual se generan modelos tridimensionales del lecho marino, los objetos sumergidos y la biodiversidad usando los datos capturados en el medio acuático.

Al contrario que en las reconstrucciones aéreas, la manera de capturar datos en las regiones submarinas supone un desafío debido a la propia complejidad del medio. Hay diversos métodos para conseguir los recursos necesarios, como el sonar, las cámaras submarinas o incluso robots autónomos submarinos que permiten recopilar los datos del entorno. Se pueden capturar tanto imágenes como datos de profundidad y otros parámetros. También es importante la captura de coordenadas geoespaciales aunque en algunas zonas esto se complica y se debe hacer la reconstrucción sin contar con dicha información, lo que provoca que el proceso sea mucho más laborioso.

Respecto a la manera de capturar los datos, los sonar emiten pulsos de sonido que rebotan en los objetos que hay debajo del agua y reflejando el pulso de nuevo, calculando el tiempo que tarda, se puede obtener la distancia a los objetos consiguiendo así información sobre la topografía del suelo y la posición de los diferentes objetos o vida submarina. Los sonares

pueden usar barridos laterales para crear imágenes detalladas o sonares de haz único que obtienen información de manera rápida pero menos precisa, aplicándose normalmente para mapear zonas de gran extensión.

En cuanto a las cámaras submarinas, operan debajo del agua para conseguir las imágenes del suelo marino pero presentan una serie de dificultades y es que, un buceador debe guiar la cámara, lo cual no es un proceso sencillo. Además, la iluminación y la turbidez del agua pueden afectar la calidad de las capturas, lo cual complicará el proceso y la precisión del modelado.

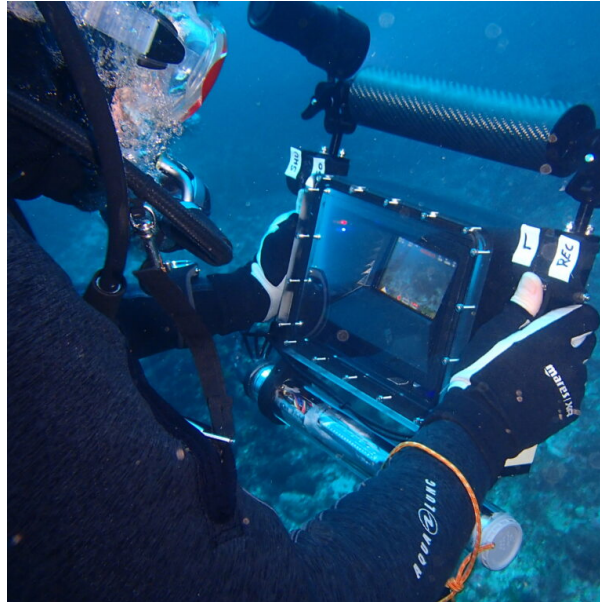


Figura 2.4: Toma de datos submarina para la posterior reconstrucción

También como hemos dicho, existe la opción de recopilar la información mediante robots autónomos submarinos. De manera similar a los drones aéreos, esta tecnología está equipada con cámaras y sensores. Estos dispositivos tienen una ventaja y es que pueden sumergirse a profundidades inaccesibles para los buzos, navegando de manera autónoma, brindando la posibilidad de mapear y estudiar áreas realmente profundas.

Una vez que se cuentan con los datos necesarios, se llevan a cabo unas técnicas de procesamiento especializadas para conseguir obtener los modelos tridimensionales. En el Capítulo 3 discutiremos sobre las diferentes maneras que existen y los algoritmos que se emplean.

Las aplicaciones que puede tener la reconstrucción tridimensional submarina son las siguientes.

- Exploración de recursos naturales: Las profundidades oceánicas cuentan con una serie de recursos energéticos como pueden ser los yacimientos de petróleo y gas o la existencia de depósitos minerales. Todo ello puede ser estudiado y explorado gracias a los modelos tridimensionales, permitiendo una extracción más limpia y sostenible.

- **Arqueología submarina:** Se pueden usar las reconstrucciones 3D para mapear y estudiar naufragios o estructuras antiguas que permanecen bajo los océanos.

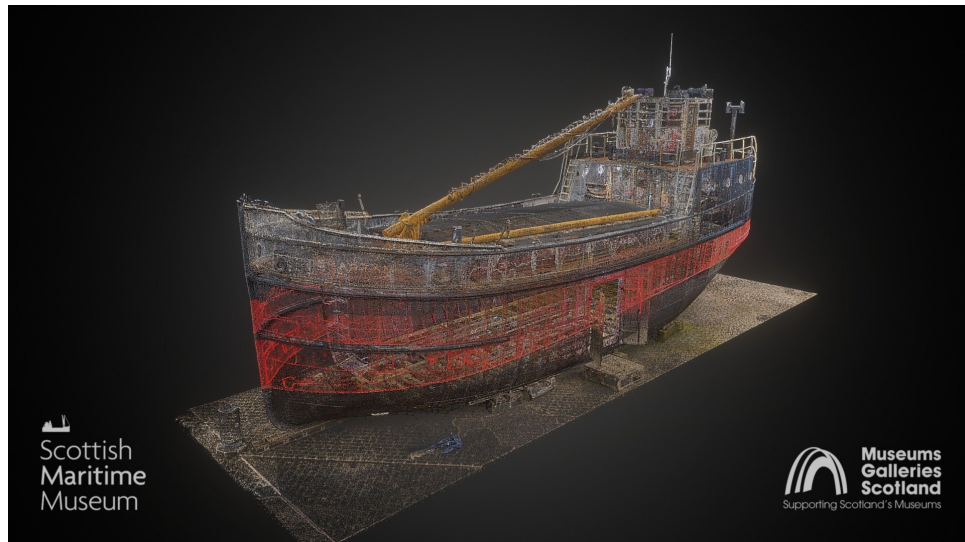


Figura 2.5: Reconstrucción del barco MV Spartan por el Museo Marítimo de Escocia

- **Conservación marina:** Los modelos 3D del hábitat marino sirven como ayuda a los científicos para controlar la salud de los océanos y las diferentes formas de vida que en ellos habitan.
- **Ingeniería submarina:** El conocimiento del suelo submarino es clave en la planificación y el diseño de infraestructuras como son los cables submarinos, tuberías y recientemente los parques eólicos, garantizando así una instalación segura.
- **Investigación científica:** Los científicos nuevamente pueden usar los modelos creado para comprender mejor los procesos oceanográficos y el cambio climático gracias al estudio de fenómenos como la erosión, la sedimentación y la vida marina.

2.5. Reconstrucciones aéreas vs submarinas

Este apartado se trata de comparar las reconstrucciones aéreas y las submarinas para comprender que desafíos presentan una y otra, entendiendo así el porqué de la mayor complejidad que tienen las segundas.

En primer lugar, la diferencia de luz es vital, ya que mientras la reconstrucción aérea se realiza en condiciones de luz natural, en las submarinas es complicado conseguir una iluminación óptima, afectando así la calidad de las imágenes. Además, las corrientes marinas pueden causar movimiento e inestabilidad en los equipos, complicando así la captura de datos.

Por otro lado, las reconstrucciones submarinas requieren de un equipo más costoso y de mayor calidad debido en gran parte a la presión hidrostática, que aumenta con la profundidad, lo cual puede afectar el rendimiento de los equipos y los sensores, necesitando diseños especiales para resistir la presión.

Por último y quizá la diferencia más significativa es la precisión de la geolocalización, ya que en los entornos submarinos muchas veces no se cuenta con estos datos o no son precisos, haciendo mucho más difícil la calibración de las imágenes. Todo ello se suma a la falta de puntos de referencia visuales que pueden provocar que te «pierdas» en el momento de capturar los datos.

Capítulo 3

Software y técnicas de reconstrucción

La reconstrucción 3D del terreno, independientemente de si es submarina o aérea, sigue una serie de etapas para conseguir alcanzar el objetivo final que en este caso es el modelo tridimensional. En este capítulo se pretende explicar cuáles son las diferentes fases que se llevan a cabo y que algoritmos se utiliza en cada una de ellas.

3.1. Etapas de la reconstrucción y algoritmos usados

3.1.1. Captura de los datos

La primera fase que debemos abordar cuando queremos llevar a cabo una reconstrucción 3D es la captura de los datos. Estos se pueden recoger de diferentes maneras en función de que se busca y del tipo de objeto del que se va a llevar a cabo el modelado.

Los datos capturados normalmente suelen ser imágenes del objeto o del terreno sobre el que se va a trabajar. Aún así, no siempre es esto ya que también y como es el caso, se puede realizar un vídeo que se usará como base de la tarea.

La información necesaria debe cumplir con ciertos parámetros que permiten trabajar con ella y permita obtener unos resultados precisos:

- Solapamiento adecuado: Es importante que la información de entrada tenga solapamiento entre sí para que a la hora de llevar a cabo las etapas posteriores los algoritmos usados puedan establecer relaciones entre diferentes imágenes, permitiendo así que la geometría tridimensional pueda ser calculada con precisión.
- Densidad de datos: Para conseguir una buena calidad en la reconstrucción, es necesario una alta densidad de datos, es decir, que en cada imagen o en cada vista

deben existir suficientes puntos clave, de modo que se pueda conseguir reproducir de una manera detallada los objetos o las escenas.

- **Calibración precisa:** En el caso de que los datos estén capturados con diferentes cámaras o escáneres, es importante que haya una calibración precisa de los instrumentos, para poder garantizar que las medidas sean precisas y que exista una buena alineación de imágenes. Además, una óptima calibración ayuda en la corrección de distorsiones ópticas y geométricas.
- **Texturas visibles:** Las capturas deben incluir texturas visibles, permitiendo a los algoritmos emparejar las características claves de las imágenes, mejorando la precisión del modelado.
- **Precisión geométrica:** Es importante que los datos capturados mantengan una precisión geométrica adecuada. Esto significa que las distancias, ángulos y proporciones en las capturas deben reflejar con precisión la geometría real del objeto o escena.
- **Buena iluminación:** Una iluminación adecuada es esencial para capturar detalles claros y precisos en las imágenes. La iluminación uniforme y bien distribuida ayuda a minimizar las sombras y los reflejos, lo que facilita la detección de características y la reconstrucción precisa. Una mala iluminación en los datos o en parte de ellos complica el proceso de modelado.

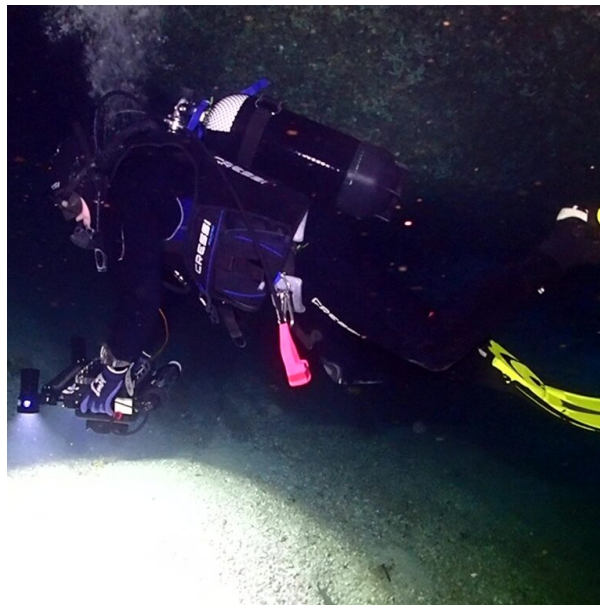


Figura 3.1: Captura de imágenes en el proyecto VirtualMar

3.1.2. Preprocesamiento de datos

En esta etapa se trabaja con la información capturada en la anterior fase y el objetivo es limpiar y preparar esos datos para empezar a usarlos. Se trata de eliminar el ruido en las

imágenes en caso de existir, se procede a la corrección de distorsiones si la hubiere y a la alineación de las diferentes tomas, asegurando de esta manera que la base del trabajo sea precisa y coherente.

3.1.3. Detección y emparejamiento de puntos clave

La detección de puntos claves en los datos disponibles para la reconstrucción 3D es una etapa fundamental del proceso ya que permite, por un lado, establecer correspondencia entre diferentes imágenes, además de alinear las vistas unas con otras. Por otro lado, se logra la triangulación y estimación de la profundidad, usando la información obtenida con los puntos claves de las diferentes tomas, permitiendo estimar la distancia de los puntos respecto de la cámara, consiguiendo así darle profundidad a la reconstrucción. Todas estas salidas generadas serán la entrada de los algoritmos utilizados para generar los modelos 3D, modelos que pueden ser mallas poligonales, nubes de puntos densas, modelos de superficies...

Para conseguir el reconocimiento de los puntos clave, existen una serie de algoritmos disponibles y que según la información, unos pueden funcionar mejor que otros.

- Harris Corner Detection: El algoritmo de detección de esquinas de Harris propuesto por Chris Harris y Mike Stephens en 1988 es una técnica utilizada para identificar esquinas en imágenes y de esa manera detectar puntos claves para garantizar el seguimiento de objetos y la coincidencia de características.

El algoritmo de Harris detecta esquinas calculando la diferencia en la intensidad para un desplazamiento pequeño (Δ_x, Δ_y) en todas las direcciones. Una vez calculada la diferencia de intensidad, se usa una matriz de covariancia en la que se evalúa la similitud de las diferencias de intensidad en todas las direcciones. Se comprueba si la variación de intensidad es grande en cada dirección y si esto ocurre, se considera que ese punto es una esquina, pudiendo utilizarse para el seguimiento de objetos.

- Shi-Tomasi Corner Detection: Se trata de un método que trata de detectar esquinas o puntos interesantes en las imágenes sobre las que trabaja. El algoritmo parte de la base del algoritmo «Harris Corner Detection».

Se trata de crear un valor en cada punto de la imagen de modo que los valores más grandes indican puntos que son mejores para establecer correspondencias entre las distintas imágenes. Los valores que son suficientemente grandes se seleccionan gracias a un valor de corte, permitiendo así identificar los puntos más robustos, los cuáles serán estables con mínimas variaciones en casos de diferente iluminación y distintos puntos de vista.

- Scale-Invariant Feature Transform (SIFT): Algoritmo desarrollado por David Lowe en 1999 usado para detectar y describir características en las imágenes digitales. Se

ha usado en varios campos como la reconstrucción 3D, el reconocimiento de objetos y la coincidencia de imágenes.

Este algoritmo consta de una serie de pasos:

- Detección de puntos clave: Se identifican los puntos de interés potenciales en la imagen. Se trata de puntos distintivos y repetibles, de modo que puedan ser identificados a pesar de cambios en la escala, en la rotación, la iluminación y otros factores de deformación. Para lograr esta consistencia, el algoritmo SIFT usa un espacio de escala gaussiano, donde las imágenes se suavizan con distintos kernels para detectar las características en diferentes escalas.
- Refinamiento de puntos clave: se localizan de manera precisa de estos puntos clave ajustando un modelo continuo.
- Asignación de orientación: : Para lograr invarianza a la rotación de diferentes vistas, se calcula la orientación principal de cada punto clave basada en la distribución de gradientes locales en su vecindad.
- Generación de descriptores: Una vez calculada la orientación de cada keypoint, se generan unos descriptores que calculan la información de la región alrededor de cada punto para que sean robustos a variaciones geométricas y fotométricas.
- Coincidencia de características: Se comparan los descriptores generados, para encontrar coincidencias entre imágenes. Se usan técnicas como la distancia euclidiana entre los descriptores.

Es un algoritmo muy robusto y eficaz incluso en condiciones adversas donde las imágenes no tienen gran calidad pero, sin embargo, su complejidad computacional ha provocado que surjan otras alternativas.

- Speeded-Up Robust Features (SURF): Es un algoritmo que se usa para detectar características en imágenes digitales, al igual que el algoritmo anteriormente descrito y de hecho, este algoritmo surge desarrollado por desarrollado por Bay, H., Tuytelaars, T., y Van Gool, L. como una variante del rápida y efectiva del «SIFT».

Este algoritmo al contrario que el SIFT, presenta una eficiencia computacional elevada al realizar una aproximación del hessiano a la hora de calcular los keypoints. Esto no le impide ser invariante a la escala y a la rotación y además, presenta robustez a los cambios de iluminación entre imágenes. Las etapas de este algoritmo son muy similares a las del SIFT y solamente cambia la manera en la que se calculan los puntos claves.

SURF es ampliamente usado tanto en reconocimiento de objetos como en reconstrucciones 3D debido a la eficiencia computacional y a que puede manejar condiciones variables entre distintas imágenes. Sin embargo, su alta eficiencia tiene como

consecuencia ser menos preciso en algunos escenarios que el SIFT ya que es más sensible a transformaciones geométricas externas.

- FAST (Features from Accelerated Segment Test): Se trata de un algoritmo desarrollado por Edward Rosten y Tom Drummond en 2006 para identificar puntos interesantes en las imágenes.

El algoritmo consta de las siguientes etapas:

- Elección de un pixel: Se selecciona un pixel en la imagen y se considera su intensidad I_p .
- Establecer valor umbral: Se establece un valor T de umbral 20 % del píxel bajo prueba.
- Consideración de la vecindad: Se escogen 16 píxeles rodeando al píxel p elegido.
- «N» píxeles contiguos de los 16 deben estar por encima o por debajo de I_p en el valor T , para que el píxel sea detectado como un punto de interés (en la primera versión del algoritmo se consideró $N = 12$).
- Primera aproximación: Se compara la intensidad de los píxeles 1, 5, 9 y 13 del círculo con I_p . Al menos tres de estos cuatro píxeles deben satisfacer el criterio del umbral para que el punto de interés exista.
- Aceptación / rechazo: Si al menos tres de los cuatro valores de píxeles - I_1 , I_5 , I_9 , I_{13} - no están por encima o por debajo de $I_p + T$, entonces el punto p no es un punto de interés (esquina). En este caso, rechaza el píxel « p » como un posible punto de interés. De lo contrario, si al menos tres de los píxeles están por encima o por debajo de $I_p + T$, entonces verifica los 16 píxeles y comprueba si los 12 píxeles contiguos cumplen con el criterio

Este proceso se repetirá para cada pixel de la imagen.

- BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features): Método propuesto por Michael Calonder, Vincent Lepetit, Christoph Strecha y Pascal Fua en 2010 para detectar características entre imágenes y asociar puntos de diferentes imágenes.

Este algoritmo sigue una serie de pasos:

- Selección de pares de puntos: Se seleccionan pares de puntos de manera aleatoria, vecinos respecto a un punto de interés.
- Generación de patrones de comparación: Para cada par seleccionado, se compara la intensidad de los píxeles en esos puntos. La comparación simplemente mide si la intensidad es mayor o menor respecto a la referencia.

- Construcción del descriptor: Se genera un descriptor binario utilizando los resultados obtenidos en la etapa anterior. Cada bit en el descriptor muestra el resultado de una comparación específica, lo que permite representar la estructura local de la región alrededor del punto de interés de manera compacta.
- Robustez y aleatorización: Para mejorar la robustez frente a cambios en la iluminación y al ruido en las imágenes, se utilizan varios pares de puntos aleatorios para generar múltiples versiones que se acaban fusionando.
- ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF): Este algoritmo de detección y descripción de características en imágenes digitales fue desarrollado por Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige y Gary Bradski en 2011 como una alternativa eficiente y robusta a otros algoritmos como SIFT y SURF.

El algoritmo combina dos de los anteriores: el detector de FAST y el descriptor BRIEF. Los etapas que lo forman son las siguientes:

- Detección de keypoints: Se usa el detector de FAST para identificar puntos de interés en la imagen.
- Asignación para orientación: Se asigna una orientación a cada uno de los puntos clave mediante el cálculo de la orientación dominante de los gradientes de la imagen en la vecindad del keypoint.
- Descripción de keypoints: Utiliza el descriptor BRIEF para describir las características locales alrededor de cada keypoint.
- Coincidencia de puntos clave: Se comparan los descriptores de las imágenes para encontrar coincidencias entre ellos. Esto se puede hacer utilizando técnicas como la distancia de Hamming entre los descriptores binarios generados.

3.1.4. Triangulación de la geometría

La triangulación es un método que normalmente se usa en las reconstrucciones 3D para calcular las coordenadas tridimensionales de un punto a partir de las correspondencias de puntos claves en diferentes imágenes.

Se llevan a cabo una serie de etapas para desarrollar el proceso:

- Correspondencia de puntos clave: Una vez que se han detectado y emparejado los puntos claves de diferentes imágenes como hemos explicado en el paso anterior, se obtienen pares de puntos que representan la misma característica desde diferentes tomas.
- Formación de rayos de proyección: Para cada par de puntos obtenido, se trazan rayos de proyección desde el dispositivo desde el que se han obtenido los datos(cámara,

escáneres...) hasta los puntos en el espacio tridimensional. Estos rayos son formados gracias a que se extiende la línea de la visión desde la posición de la cámara hasta el espacio 3D.

- Intersección de rayos: Una vez trazados los rayos desde los diferentes puntos de vista, es necesario encontrar en que puntos se intersecan. Ese punto de corte de los rayos suponen una estimación de la posición del punto en el modelo tridimensional.
- Cálculo de coordenadas tridimensionales: Usando métodos geométricos o algebraicos, se calculan las coordenadas tridimensionales del punto de cruce, gracias a las ecuaciones de los rayos de proyección y la geometría de la cámara.

Este proceso que se ha detallado se debe repetir para todos los pares de puntos, consiguiendo así reconstruir un objeto tridimensional de puntos (nube de puntos) que representan la estructura del mismo.

3.1.5. Filtrado y refinamiento

Esta etapa de la reconstrucción 3D consiste en la mejora de la nube puntos, de modo que se consiga un modelo más preciso y compacto y por tanto de mayor calidad.

Para llevar a cabo esa optimización del modelo, se siguen varias etapas:

- Eliminación de puntos falsos o ruido: En el proceso de captura de datos y posteriormente en la fase de reconstrucción, pueden aparecer puntos fraudulentos en la nube de puntos o ruido, afectando a la precisión de la misma. Estos puntos no deseados pueden aparecer debido a errores en la captura de datos o a interferencias ambientales (cambios de iluminación, corrientes marinas en el caso de reconstrucciones submarinas...). Por tanto, se usan distintas técnicas de filtrado como el filtrado por distancia, por densidad, filtrado morfológico, filtrado basado en curvatura... Todas estas técnicas ayudan a limpiar la nube de puntos eliminando los no deseados.
- Suavizado: Una vez que hemos eliminado el ruido, la nube de puntos puede tener una apariencia no uniforme. Se aplican por tanto técnicas de suavizado para mejorar la morfología y la apariencia de la superficie. Se lleva a cabo gracias a técnicas como el suavizado Gaussiano o el suavizado bilateral que ayudan a difuminar los detalles y producir una superficie más uniforme.
- Aumento de la densidad: En algunas reconstrucciones debido a los datos capturados puede suceder que no haya suficientes puntos claves capturados de modo que puede ser necesario aumentar la densidad de la nube de puntos para capturar detalles con mayor precisión. Se pueden aplicar técnicas de interpolación (interpolación lineal, interpolación según los vecinos más cercanos...) o submuestreo para aumentar la densidad del resultado.

3.1.6. Colorización de la nube de puntos

Una vez que tenemos construida la nube de puntos tridimensional, se debe añadir color para conseguir un resultado lo más realista posible. Para llevar a cabo este proceso de colorización se pueden usar varias técnicas:

- **Proyección de imágenes originales:** Se proyectan las imágenes tomadas sobre la nube de puntos tridimensional de modo que a cada punto de la nube se le asigna un píxel de la imagen, asignando por tanto a dicho punto el color que tenga el píxel. Con esta técnica se consigue una representación fiel de la apariencia original. Sin embargo, contiene una dificultad y es que cuando hay muchas imágenes superpuestas tiene que ser capaz de distinguir cada punto sin margen de error.
- **Asignación de colores basada en la intensidad de los puntos:** En ocasiones, la información del color ya está directamente capturada en los datos iniciales, como es el caso de las cámaras RGB. Esto permite que el color de los puntos provenga de las imágenes tomadas, usando la información de la intensidad en los píxeles para asignar el color.
- **Colorización basada en características adicionales:** En algunos casos donde se combinan varias entradas de información, se pueden combinar los datos provenientes de las imágenes originales con datos de color obtenidos de fuentes externas como pueden ser los escáneres de color, las cámaras RGB-D o imágenes de alta resolución de textura tomadas desde diferentes puntos de vista.

3.1.7. Texturización

Esta técnica implica la aplicación de texturas mapeadas previamente sobre la superficie reconstruida, lo cual permite proporcionar detalles y realismo adicionales, consiguiendo un salto de calidad considerable respecto al proceso de colorización.

Este proceso se lleva a cabo mediante una serie de fases:

- **Preparación de texturas:** Antes de aplicarlas las texturas al modelo tridimensional, estas se deben preparar, lo cual puede implicar el procesamiento de imágenes originales para obtener las texturas con un elevado nivel de calidad.
- **Mapeo de texturas:** Una vez preparadas, se aplican a la superficie del modelo utilizando técnicas de mapeo de texturas. Se aplican coordenadas de textura a cada punto que constituye el modelo tridimensional, consiguiendo que se apliquen de manera coherente y adecuada.
- **Técnicas de mapeo de texturas:** Hay varias técnicas de mapeo de texturas que se pueden utilizar, como pueden ser el mapeo UV, donde se asignan coordenadas de textura 2D a la geometría 3D del modelo, y el mapeo esférico o cilíndrico, que

proyecta las texturas sobre la superficie del modelo utilizando una esfera o cilindro imaginarios.

- Ajuste de texturas: Una vez que las texturas han sido aplicadas, puede que no hayan quedado de la mejor manera posible, por lo que puede ser necesario realizar ajustes para conseguir una apariencia realista. Esto provoca que puede ser necesario ajustar la escala, la orientación o la alineación de texturas para que se acoplen de la mejor manera al modelo. Además se pueden realizar correcciones de color y brillo para conseguir un resultado final lo más cercano a la realidad.

Por último y aunque no sea una etapa como tal, debemos mencionar que una vez que se ha realizado la reconstrucción tridimensional, se debe visualizar el modelo para verificar su calidad y realizar análisis adicional si se consideran necesarios. Para visualizar se debe usar software especializado para apreciar en detalle el resultado conseguido.

3.2. Software de reconstrucción

Los softwares de reconstrucción 3D son herramientas que se usan para convertir datos capturados por el usuario como pueden ser imágenes 2D o nubes de puntos y convertirlos en modelos tridimensionales detallados y precisos. Este tipo de programa son usados en campos muy dispares como pueden ser la arquitectura, la ingeniería, la arqueología, la medicina, la agricultura o la investigación científica.

El hecho de que este software se use en campos tan dispares, provoca que existan multitud de programas de este tipo, en algunos casos gratuitos y en otros de pago, cada uno con sus características, que provocan que tengan ciertas ventajas respecto de los demás, según la reconstrucción que se quiere buscar.

Como existe tal variedad de software de reconstrucción y es tan complicado tratarlos todos, se explicarán de manera breve aquellos que se han planteado usar para la reconstrucción del trabajo propuesto.

3.2.1. Colmap

COLMAP (Collaborative Large-scale Mapping) fue meditado como software a utilizar debido a que se trata de un programa de código abierto que permite la reconstrucción 3D a partir de imágenes.

Se trata de un programa que usa técnicas de fotogrametría para estimar las geometrías 3D y la posición de la cámara en las diferentes imágenes. Además, para realizar modelado, usa algoritmos avanzados como la estimación de la estructura y la cámara, la triangulación de los puntos, la reconstrucción densa y la texturización de modelos.

Se debe comentar también que la interfaz de usuario sencilla de manejar para usuarios

inexpertos, permitiendo de manera sencilla cargar las imágenes o visualizar los resultados, además de realizar análisis de los resultados obtenidos.

3.2.2. Meshroom

Al igual que Colmap, Meshroom es otro software de código abierto para el mismo propósito de la reconstrucción 3D partiendo de unos datos que en este caso son imágenes.

Permite crear modelos tridimensionales a partir de imágenes gracias a las técnicas de fotogrametría que emplea, permitiendo reconstruir con una vista desde diferentes ángulos. Su flujo de trabajo es basado en nodos, y cada etapa de la reconstrucción es representada como un nodo en un grafo. Esto permite que el usuario pueda añadir o eliminar alguno de los nodos, permitiendo saltarse alguna de las fases de las que hemos hablado. Nuevamente, este software implementa distintos algoritmos avanzados como la detección de características, la estimación de la estructura, la triangulación de puntos, y la reconstrucción de malla y texturización.

Se trata de una aplicación que principalmente se maneja por línea de comandos pero que también proporciona una interfaz de comandos para los usuarios más inexpertos. Además, el hecho de que sea de código abierto y el código fuente esté disponible hace que el usuario lo pueda personalizar a su gusto.

3.2.3. PIX4D

Pix4D es una aplicación de pago especializada en el área de la fotogrametría, especialmente en la aérea, usando imágenes que son capturadas desde drones y otros UAV (vehículos aéreos no tripulados) para obtener modelos tridimensionales y mapas precisos y detallados de la superficie terrestre.

Se trata de un software que ofrece un flujo de trabajo automático, es decir, permite a los usuarios cargar las imágenes, ajustar parámetros y obtener los resultados sin intervención manual. Sin embargo, sí que permite la intervención del usuario para ayudar a conseguir una mejor calidad.

Emplea los algoritmos ya descritos para garantizar precisión y calidad en los resultados obtenidos. Como hemos dicho, Pix4D ofrece opciones de personalización y de configuración para poder adaptarse a las necesidades del proyecto. Este programa incluye software de análisis GIS (Sistemas de Información Geográfica), software de diseño CAD (Diseño Asistido por Computadora) y sistemas de información empresarial (ERP).

Se debe decir que es uno de los softwares más populares y que muchas empresas deciden utilizar, a pesar de su elevado coste, debido a que garantiza unos resultados precisos y realistas. Todo ello hizo que fuera la primera opción para trabajar en el proyecto escogido.

3.2.4. Reality Capture

RealityCapture es un software avanzado de reconstrucción 3D y fotogrametría desarrollado por Capturing Reality. Tiene una gran capacidad para procesar grandes conjuntos de datos y generar modelos 3D detallados y precisos a partir de imágenes digitales y nubes de puntos.

El programa usa técnicas avanzadas de reconstrucción 3D como la detección y emparejamiento de características, la estimación de la estructura y la posición de las cámaras, además de la triangulación de puntos. Tiene una gran ventaja y es que, tiene un rendimiento óptimo por su rápida capacidad de procesamiento, además de manejar grandes conjuntos de datos. Usa algoritmos de procesamiento en paralelo para acelerar el tiempo de procesamiento y de hecho, entre las opciones comentadas es el software con una capacidad de modelado más rápida.

Por otro lado, cuenta con una interfaz de usuario intuitiva que le hace manejable para cualquier tipo de usuarios. Finalmente estas características hicieron que el proyecto se realizase en esta aplicación.

.

Capítulo 4

Software Usado

En este capítulo hablaremos de las distintas tecnologías que se han usado para llevar a cabo la reconstrucción 3D y la creación de la memoria

4.1. Tecnologías Utilizadas

4.1.1. Da Vinci Resolve

DaVinci Resolve es una herramienta de edición de vídeo y corrección de color desarrollada por Blackmagic Design.

Este programa permite realizar una serie de acciones para manipular vídeos de manera profesional realizando acciones como cortar, recortar, fusionar clips, aplicar efectos, transiciones y demás. Además, tiene un conjunto de herramientas de corrección de color, permitiendo ajustar parámetros como el color, el contraste y otros aspectos de manera detallada.

Es un software de pago (Da Vinci Resolve Studio) pero cuenta con una versión gratuita: Da Vinci Resolve, que es la opción que usamos.

Aunque hemos mencionado varias funcionalidades para la edición detallada de vídeo e imágenes, en nuestro trabajo simplemente lo usaremos para cambiar el formato del vídeo base, que está en un formato BRAV, el cual no es muy popular y lo hace poco integrable. Por lo tanto, transformaremos el formato del vídeo a MP4. Precisamente el hecho de que el formato BRAV sea tan poco común nos hace usar este programa, ya que es de los pocos que trabaja con ese tipo de vídeos.

4.1.2. Python

Python es uno de los lenguajes de programación que más se utiliza en campos tan actuales como son la ciencia de datos o la inteligencia artificial. Este programa es ideal

debido a su sintaxis clara y legible, lo cual facilita la comprensión del código. Además, el hecho de que cuente con un número tan elevado de usuarios propicia que tenga una gran comunidad y soporte, permitiendo encontrar gran variedad de recursos, desde bibliotecas de código abierto a foros de ayuda.

Por otro lado, cuenta con una amplia gama de librerías especializadas para diferentes áreas como pueden ser el procesamiento de imágenes o el aprendizaje automático (para el primer propósito lo usaremos como explicaremos en el siguiente capítulo). Algunas de esas bibliotecas son OpenCV, PyTorch o TensorFlow. Este lenguaje de programación será usado en el entorno de Visual Studio Code.

4.1.3. Reality Capture

Reality Capture como ya hemos explicado anteriormente es un software avanzado de reconstrucción 3D y fotogrametría desarrollado por Capturing Reality. En nuestro caso y como se explicará en el siguiente capítulo, ha sido usado para el procesamiento de imágenes y la creación del modelo 3D.

4.1.4. LaTeX

LaTeX es un sistema cuyo propósito es la redacción de documentos en campos académicos y científicos para la creación de documentos de alta calidad tipográfica. Su facilidad para organizar el texto, así como para el uso de imágenes sin alterar la redacción y la posibilidad de introducir código de una manera sencilla, entre otras razones, ha hecho decantarnos ante el uso de este programa frente a otros de escritura como Microsoft Word.

Capítulo 5

Trabajo realizado

Este capítulo tratará sobre el trabajo realizado con las distintas aplicaciones mencionadas en el capítulo anterior.

En primer lugar y como ya se ha comentado, partimos de un vídeo grabado en formato BRAW en el que se observa una cueva del fondo marino grabada en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, zona de la que se pretende realizar la reconstrucción 3D.

El vídeo fue grabado en fecha 11 de octubre de 2023 por el proyecto de investigación *VirtualMar*. Los equipos se desplazaron a la zona y mediante la técnica de grabación submarina, llevado a cabo por un buzo, se tomaron las imágenes mediante la cámara Blackmagic Pocket Cinema Camera, con un objetivo Meike de 12 mm.

Es importante mencionar las dificultades orográficas de la cueva que causaron problemas a la hora de capturar los datos. Por un lado, fue necesario poner cintas métricas en el suelo para guiar los barridos que realizaba el buceador para tomar los datos y conseguir que el solape de las imágenes fuera similar en las diferentes pasadas que realiza. Además, en esa profundidad, es difícil encontrar puntos de referencia y era necesario ajustar la longitud de los barridos. También, se debe destacar la estrechez de algunas angostas zonas que no permitían obtener el vídeo con el mejor enfoque.

El formato del vídeo obtenido es BRAW que como ya hemos tratado, es poco compatible con otros programas y tiene mala integración por lo que lo primero que se ha hecho ha sido cambiar el formato del vídeo a MP4 para poder trabajar con él. Una vez que tenemos el vídeo en formato MP4, el objetivo es rescatar frames del vídeo para que la entrada de los programas de fotogrametría sean las imágenes. Para ello, hemos usado la herramienta Python.

Gracias al uso de Python hemos generado un código con el propósito de obtener las imágenes del vídeo. El código usado fue el siguiente:

```

import cv2

# Ruta del video
video_path = 'C:/Users/34682/Desktop/TFG/video.mp4'

# Ruta para guardar las imágenes
ruta_guardado = 'C:\\Users\\34682\\Desktop\\TFG\\imagenes\\'

# Intervalo en segundos cada cuanto se obtiene un frame
intervalo_segundos = 0.5

# Inicializar el contador
contador = 0

# Abre el video
captura = cv2.VideoCapture(video_path)

# Comprobamos que se pueda abrir el vídeo
if not captura.isOpened():
    print("Error al abrir el video.")
    exit()

# Obtener la cantidad de frames por segundo (FPS)
fps = int(captura.get(cv2.CAP_PROP_FPS))

# Calcular el número de frames para el intervalo de 0.5 segundos
frames_por_intervalo = int(intervalo_segundos * fps)

# Iterar a través de los frames del video
while True:
    # Leer un frame del video
    correcto, frame = captura.read()

    # Verificar si el frame se ha leído correctamente
    if not correcto:
        break

    # Verificar el intervalo de tiempo para guardar la imagen
    if contador % frames_por_intervalo == 0:
        # Nombre que se asignará a la imagen en orden

```

```

    nombre_imagen = f'{ruta_guardado}imagen_{str(contador // frames_por_intervalo)}

    # Guardar la imagen en formato TIFF
    cv2.imwrite(nombre_imagen, frame)

    # Incrementar el contador
    contador += 1

# Liberar los recursos
captura.release()
cv2.destroyAllWindows()

print("Todas las imágenes se han podido extraer de forma exitosa")

```

Con ese código se han podido extraer las imágenes cada 0.5 segundos y guardadas en una carpeta para empezar a trabajar con ellas. Es importante mencionar que en un primer momento, se extrajeron los frames cada segundo (el código es igual y solamente se debe cambiar la variable `intervalo_segundos`, sustituyendo el valor de 1 por 0.5) pero, hubo que modificarlo porque al estudiar las imágenes se observó que no tenían la suficiente superposición y eso provocaría dificultades a la hora de emparejar características.

Una vez extraídas las imágenes, se podían empezar a cargar en algún software de reconstrucción para trabajar con ellas. La primera opción como se ha comentado fue PIX4D, haciendo uso de la prueba gratuita que este software ofrece. Sin embargo, a la hora de crear un proyecto e importar las imágenes apreció un error ya que las imágenes no contaban con la información EXIF necesaria para trabajar con ellas. Por tanto, fue necesario descargar la herramienta exiftool para poder completar las características requeridas (fecha de captura, distancia focal, modelo de cámara utilizado...). Fue por tanto necesaria la creación de un script para rellenar la información de todas las imágenes de la manera más rápida y sencilla.

Dicho script es el siguiente:

```

@echo off
setlocal enabledelayedexpansion

REM Configuración inicial de hora y fecha
set /a "second=0"
set /a "minute=42"
set /a "hour=19"
set /a "half=0"

```

```

REM Configuración de los metadatos de la cámara
set "make=Meike"
set "model=Blackmagic Pocket Cinema Camera 4K"
set "focal_length=12"

REM Ruta a exiftool, asegúrate de cambiarla a la ubicación correcta
set "exiftool_path=C:\ruta\a\exiftool.exe"

REM Procesar cada imagen .tiff
for %%i in (imagen_*.tiff) do (
    REM Alternar entre .00 y .50 segundos
    if !half! equ 0 (
        set "date=2023:10:11 !hour!:!minute!:!second!.00"
    ) else (
        set "date=2023:10:11 !hour!:!minute!:!second!.50"
    )

    REM Mostrar la fecha que se está configurando
    echo Configurando !date! para %%i

    REM Ejecutar exiftool para agregar los metadatos
    "!exiftool_path!" -make="%%make%" -model="%%model%" -focallength="%%focal_length%"

    REM Actualizar la fecha para la siguiente imagen (agregar 0.5 segundos)
    set /a "half+=1"
    if !half! equ 2 (
        set /a "half=0"
        set /a "second+=1"
        if !second! equ 60 (
            set /a "second=0"
            set /a "minute+=1"
            if !minute! equ 60 (
                set /a "minute=0"
                set /a "hour+=1"
            )
        )
    )
)
)

echo Proceso completado.

```


pause

El resultado de esto fue tener todas las imágenes listas para empezar a trabajar con ellas. Una vez cargadas los datos en el proyecto se realizó una prueba de alineamiento automático para comprobar como trabajaba PIX4D en las reconstrucciones submarinas. El resultado fue un desastre ya que, solamente emparejaba algunas fotografías entre sí y muchas de las cámaras se «perdían», es decir, su posición y orientación en el espacio estaban muy alejadas de lo que deberían ser. Por tanto, se optó por alinear las entradas mediante puntos de control manuales, para ayudar al software a detectar más fácilmente puntos comunes. Sin embargo, esto no funcionaba ya que PIX4D le daba más peso a los emparejamientos que él hacía que a los puntos de control que yo le ponía y por tanto, me listaba como errores y mal dispuestas mis aportaciones, no consiguiendo avanzar nada.

Fue el momento de buscar si existía otro programa más especializado en fotogrametría submarina debido a que PIX4D se basa principalmente en la geolocalización, recurso del que no se podía disponer en este proyecto.

Reality Capture fue entonces la aplicación elegida con la que se trataría de llevar a cabo la reconstrucción. Tras importar las imágenes y cargarlas en un nuevo proyecto, se probó nuevamente la capacidad por sí mismo del software para alinear las fotografías pero, nuevamente, el resultado no arrojó ninguna solución positiva. Analizando las salidas generadas, se observó que surgían numerosos componentes. Un componente es un conjunto de datos que han sido procesados juntos y se han fusionado en una estructura coherente tridimensional, es decir, son grupos de imágenes afines entre ellas con las que se ha formado una malla de puntos. El problema de todos esos componentes es que, cada uno tiene una orientación distinta, haciendo imposible la unión entre ellos y por lo tanto la creación de una reconstrucción mínimamente realista.

Por tanto, se emparejaron todas las imágenes mediante puntos de control manuales, para intentar que se unieran todos los datos en un solo componente. Sin embargo y al igual que ocurrió con PIX4D, automáticamente el software no detectaba puntos afines entre las imágenes, por lo que no se pudo crear ningún componente coherente.

Se decidió entonces alinear las imágenes de manera progresiva, en vez de hacerlo con todas a la vez. Se cogieron las primeras 150 imágenes, las cuáles estaban capturadas en el mismo sentido y sin cambios de dirección ni orientación. Estas imágenes, asignándolas puntos de control manuales, se consiguió obtener un primer resultado positivo ya que, se obtuvo una malla con la dirección correcta y con la inclinación buscada (lo cual es muy importante que sea preciso ya que es crucial para determinar la distribución de hábitats marinos). Una vez que se contaba con esa malla inicial, se trató de añadir otras 150 imágenes, emparejando las características de unas con las de las viejas, donde el solape que había entre ellas (un poco escaso) lo permitía. Sin embargo, esto no funcionó debido

a que en este caso existe un giro que implica un cambio de sentido, provocando que el plano desde el que se ha tomado sea totalmente distinto, lo que hace que la aplicación no detecte características comunes, excluyendo los puntos de control manuales, por lo que aunque se consiguieron unir las 300 imágenes en un componente, la dirección de algunas cámaras era muy errónea, sacando como resultado una malla sin coherencia ninguna.

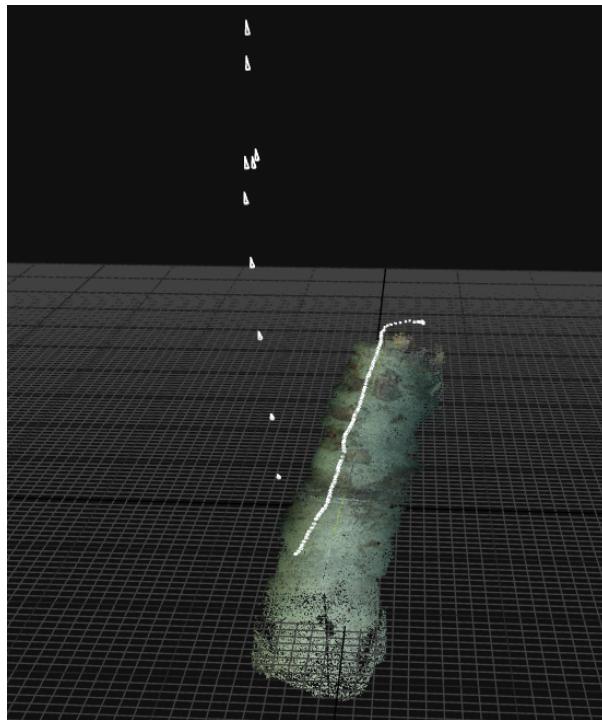


Figura 5.1: Posición de las cámaras alineando las imágenes

Se puede observar en la figura 5.1 como la mayoría de cámaras (objetos blancos de la imagen) siguen una misma dirección. Sin embargo, un gran número de ellas, se aprecia como cambian drásticamente la dirección, apuntando en perpendicular a las ya alineadas. Esto provoca que la malla que se genera tenga errores y no se pueda avanzar desde ese punto.

Por tanto, toca deshacer las imágenes añadidas para volver a partir de una malla bien alineada como era la primera y cambiar la estrategia. La solución planeada fue eliminar la segunda tanda de imágenes incluidas y añadir en este caso las del tercer barrido, es decir las que llevan el mismo sentido que las 150 primeras. Aunque se crearon dos componentes, estos tenían mismo sentido y similar inclinación (la distancia de la cámara al suelo influye en esto por lo que aunque debería ser la misma, en el modelo es sencillo reflejarlo) por lo que la idea era unir ambos componentes. De hecho, se consiguió hacerlo buscando todos los puntos comunes de ambos barridos (no eran muchos) y añadiendo ahí los puntos de control manuales, consiguiendo así juntar los dos componentes y solo existía entre ellos una mínima diferencia de altura que más tarde se intentaría suavizar.

Una vez conseguido esto, añadir las imágenes del segundo barrido (el de dirección opuesta a los dos ya alineados) fue más sencillo ya que teníamos características comunes en ambos lados por lo que se pudieron alinear las primeras 400 imágenes de las 1975 que se debían procesar.

Resumiendo este proceso para no ser repetitivo, se fueron añadiendo de dicha manera las imágenes que integraban los sucesivos barridos. El mayor problema enfrentado se encontraba a la hora de realizar los cambios de sentido y es que, las cámaras se desviaban con suma facilidad, provocando que fuera difícil mantener la coherencia. La clave para conseguir avanzar era añadir imágenes de manera controlada al proceso (unas 30 imágenes a lo sumo cada vez) y en ellas buscar puntos claves que las harían emparejar con las ya alineadas.

Trabajando de esta manera era posible avanzar (no a muy buen ritmo debido a las limitaciones computacionales de las que ya hablaremos) pero, a partir de las 1000 imágenes surgió un problema y es que, sin importar el número de fotografías añadidas al proyecto, se desconfiguraba entero por lo que era necesario cambiar la estrategia.

La primera solución intentada, que no la buena, fue generar otra malla de puntos con las imágenes restantes y luego unir ambas. Sin embargo realizar esto era una quimera y de hecho, no se pudo llegar a conseguir ya que, eran demasiados datos para unirlos, y no era posible conseguir alcanzar el objetivo de tener todas las imágenes en un solo componente.

Por tanto, investigando en la documentación de referencia de Reality Capture, se encontró la opción de bloquear las cámaras elegidas, de modo que aunque añadieras imágenes, las ya procesadas se quedaban en su lugar y con la la orientación que ya tenían.

Así que, de esa manera se pudieron procesar finalmente todas las capturas del proyecto, consiguiendo la malla del modelo.

Una vez que conseguimos el alineado de los datos, el resultado es una nube de puntos. Dicha nube se puede modelizar, consiguiendo así un resultado más uniforme. Este modelizado tiene varias opciones ya que se puede crear en vista preliminar, detalle normal o alto detalle. Esta opción afectará en el tiempo de procesamiento y en la calidad del resultado obtenido.

El modelo 3D creado ahora se debe colorear, pudiendo escoger varios algoritmos de los mencionados en el capítulo 3, y escogiendo en este caso colorización basada en la intensidad de los puntos que hemos explicado previamente de que se trataba.

Por último y para obtener ya el modelo final, se debe texturizar el modelo, que nuevamente permite varias opciones, usando el mapeado de las texturas desde las imágenes descrito en el capítulo 3.

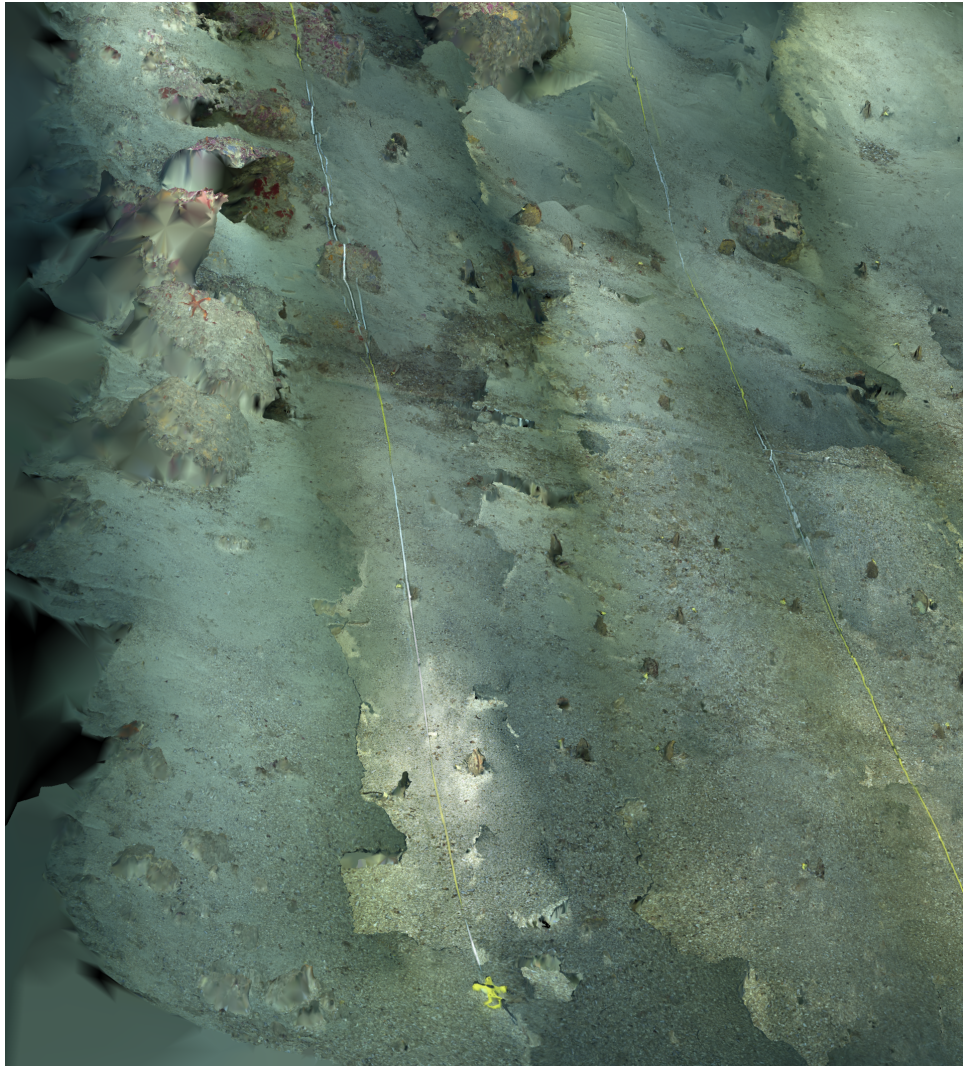


Figura 5.2: Parte del modelo creada sobre la cueva submarina de Cabrera

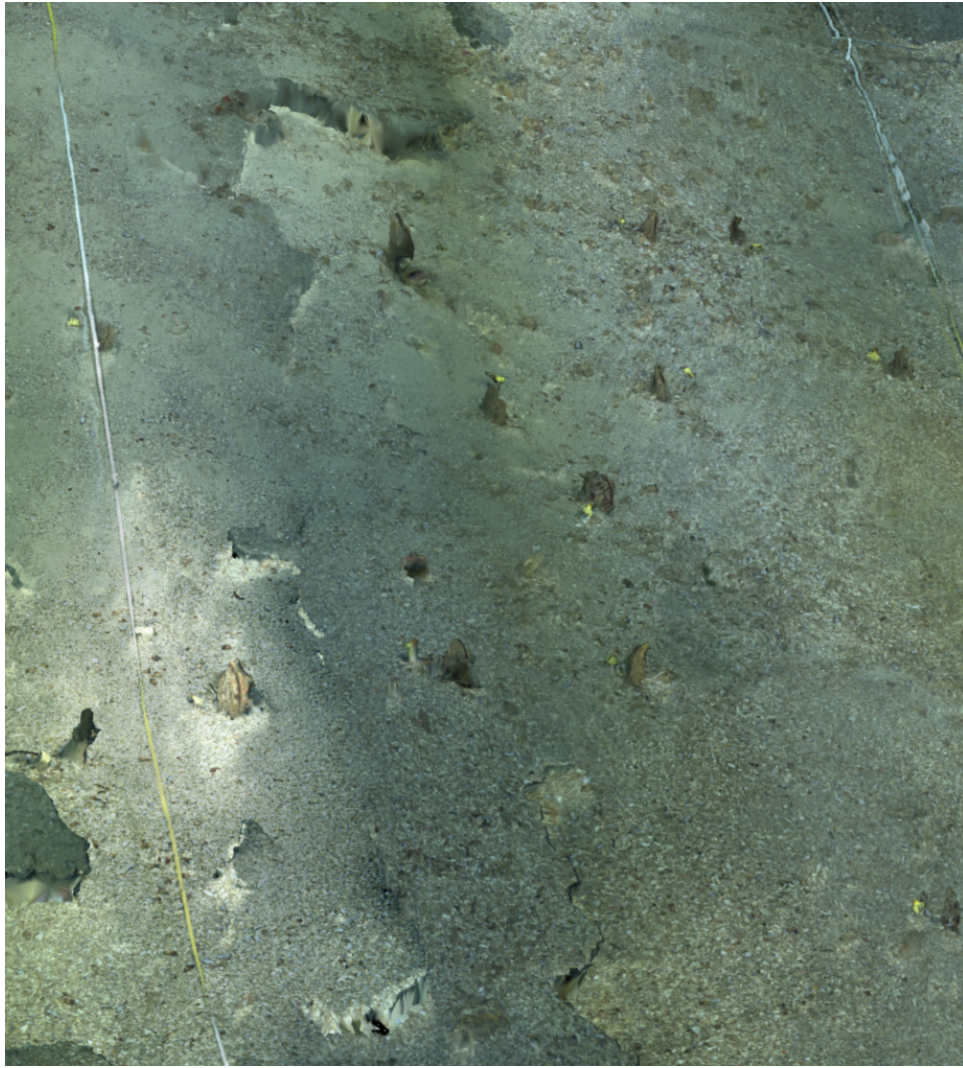


Figura 5.3: Ampliación del modelo de la cueva submarina

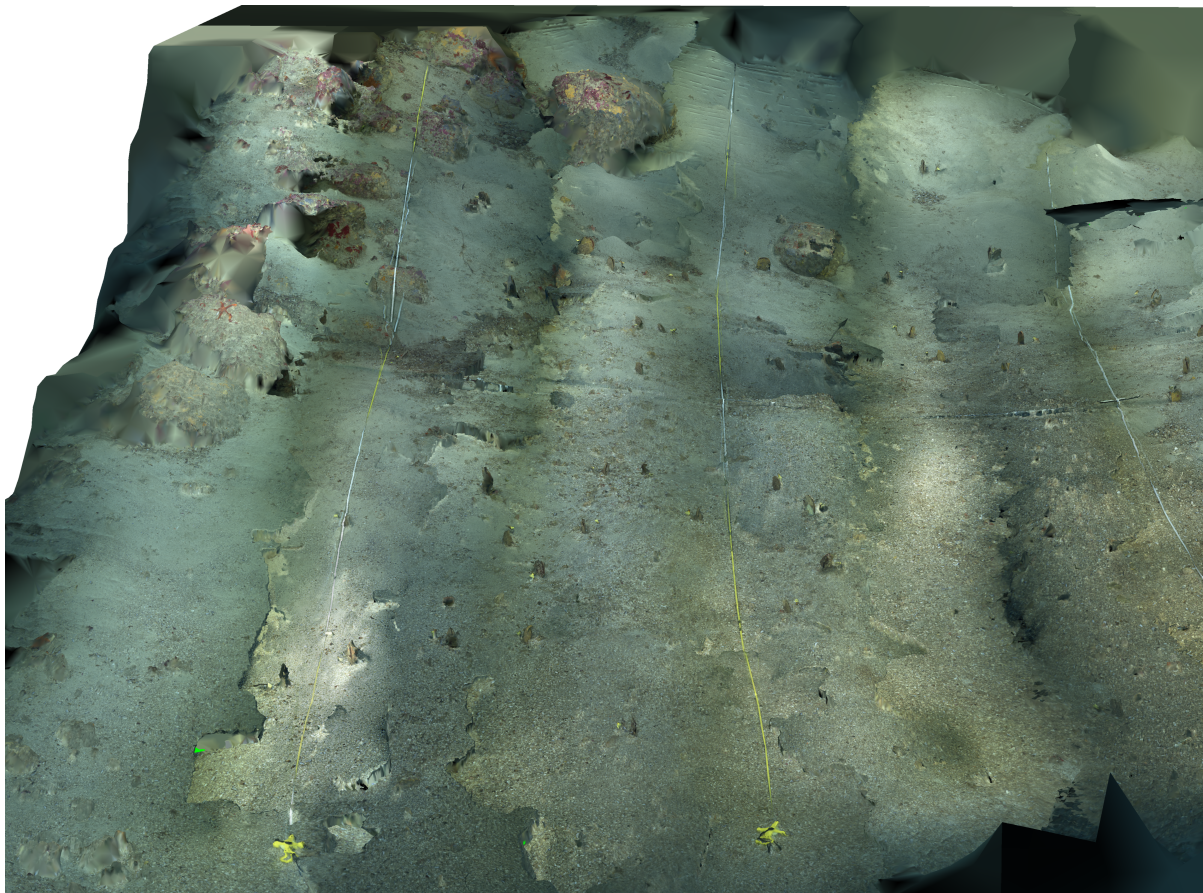


Figura 5.4: Modelo completo de la cueva submarina

Capítulo 6

Limitaciones

En este capítulo hablaremos de las limitaciones encontradas a la hora de realizar el trabajo, siendo estas tanto físicas como temporales.

6.1. Físicas

En la realización de este proyecto ha sido necesario lidiar con una serie de impedimentos que han hecho más compleja la reconstrucción 3D.

Por un lado, el vídeo base del proyecto estaba grabado en 4K y tenía una duración de 16:27 minutos, suponiendo un archivo de 40 GB. Además, todo el software de reconstrucción necesario y los resultados obtenidos requerían un espacio en disco bastante amplio.

Sin embargo, la limitación más grande fue la memoria RAM. Reality Capture recomienda para proyectos grandes y complejos (este entraría en esta categoría) una memoria RAM de 64 GB. En este proyecto se utilizó un ordenador con 8 GB de RAM, lo que dificultó significativamente el proceso. Esto obligó a bajar la resolución de las imágenes de 4096 x 2160 píxeles a 1980 x 1080 píxeles. Aun así, el procesamiento fue costoso y lento, lo que implicó que cada cambio tardara mucho tiempo en reflejarse (por ejemplo, el alineamiento de imágenes podía tomar hasta 1 hora, y el texturizado en alto detalle podía tardar hasta 8 horas). Además, el ordenador debía trabajar a su máxima capacidad, imposibilitando la realización de otras tareas simultáneamente.

6.2. Temporales

El tiempo también fue una limitación crítica durante la ejecución del proyecto. La combinación de hardware limitado y la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos provocó que el tiempo de procesamiento de cada etapa del proyecto fuera prolongado.

El alineamiento de imágenes, que es la primera etapa del proceso de reconstrucción, tomó

aproximadamente 1 hora en algunos casos. Cada 30 imágenes era necesario alinear para llevar a cabo la reconstrucción, resultando en un tiempo de alineamiento considerable. Es cierto que cuando se usaban menos imágenes, la duración de esta etapa era menor. Además, etapas más complejas como el texturizado en alta resolución podían llevar hasta 8 horas. Esto afectó la programación del proyecto, ya que estas restricciones imponían largas esperas y dificultaban la capacidad para realizar ajustes.

En conclusión, las limitaciones tanto físicas como temporales afectaron significativamente la realización del proyecto. La insuficiencia de memoria RAM y el espacio en disco limitado impusieron restricciones en la calidad y rapidez del procesamiento, mientras que los largos tiempos de espera entre operaciones retrasaron el progreso general y complicaron la gestión del proyecto.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

7.1. Líneas futuras

Los resultados de este trabajo pueden ser usados como base para diversas investigaciones científicas, aplicaciones educativas o incluso se puede usar para promocionar el turismo de una zona.

- Aplicaciones científicas y medioambientales: La reconstrucción 3D de los fondos oceánicos puede usarse como la base de múltiples estudios científicos. Por un lado, la monitorización de la biodiversidad, ya que los modelos permiten a los científicos llevar a cabo censos de especies, identificar cambios en las mismas o estudiar el impacto de factores ambientales en esas zonas, permitiendo un seguimiento del cambio climático y las consecuencias que tiene en la biología marina la subida de la temperatura de los océanos. Además, los avances de la inteligencia artificial permiten aplicar modelos de aprendizaje automático para la identificación automática de especies y el control poblacional. Esto permite que se agilice el proceso de investigación y que aumente la precisión de los estudios.
- Aplicaciones educativas: La visualización de los modelos 3D pueden tener un gran potencial educativo. Por un lado, se puede crear una herramienta educativa interactiva que revolucione la enseñanza en la geografía y la biología marina. Los alumnos podrían observar los detalles de la orografía marina, identificar diferente fauna y flora y entender los ecosistemas. Si esto se combina con el uso de realidad virtual los estudiantes podrían «nadar» en los entornos submarinos, explorando y aprendiendo de una manera atractiva y amena.
- Promoción del turismo: Los entornos creados pueden tener un gran potencial turístico ya que el uso de reconstrucciones 3D en vídeos promocionales permite a los potenciales turistas tener una vista previa de lo que van a ver. Esto puede aumentar el interés de zonas menos conocidas. Además, una aplicación de realidad virtual que

permita a los turistas explorar su entorno puede resultar un factor diferencial a la hora de escoger destino.

- Fines comerciales y sostenibilidad: Con el uso de inteligencia artificial los modelos pueden ayudar a identificar y cuantificar recursos submarinos, así como evaluar patrones comunes en distintas zonas que determinen la presencia de determinados recursos. Además, si fuera posible evaluar la dificultad de extraer los recursos, se podría mejorar la planificación para la obtención de los mismos, ayudando a mejorar la viabilidad de las extracciones.

Por tanto, la creación de reconstrucciones 3D abre múltiples líneas de investigación, desde fines sociales y educativos hasta fines económicos. Esto permite ampliar el alcance del proyecto y permite magnificar la importancia que puede tener la recreación de los entornos y más si cabe si estos son de difícil acceso.

Además de las posibles líneas de investigación futuras comentadas, se podría trabajar aún en este mismo proyecto pero con diferentes herramientas y de esta manera comparar resultados y buscar cuál es la mejor estrategia a seguir en desarrollos futuros. Se podrían intentar diferentes técnicas:

- Modelado 3D: La reconstrucción 3D en este caso se ha realizado mediante el software Reality Capture. Sin embargo, una opción de futuro podría ser llevarla a cabo con otros programas como Colmap o Pix4D. En este campo existen aplicaciones especializadas para la fotogrametría aérea pero no así para la submarina por lo que una buena idea es probar distintos y escoger el que mejor resultados obtenga. En nuestro caso Pix4D fue la primera opción pero no se consiguieron resultados coherentes. Sin embargo quizá con un cambio de estrategia sea posible obtener soluciones útiles. El plan sería comparar todos los modelos y a partir de ahí deducir cual es el mejor software para las reconstrucciones submarinas.
- Visualización: La visualización del modelo una vez creado puede realizarse en diferentes aplicaciones. Por un lado se pueden usar visores locales o web. Sketchfab es un visor web que permite subir las reconstrucciones para visualizarlas y además, es compatible con las gafas de realidad virtual lo que permitiría visualizarlas tanto desde un PC convencional como con experiencias inmersivas sin necesidad de programación adicional. Sin embargo, la opción gratuita tiene limitaciones de tamaño del modelo por lo que en caso de querer visualizar reconstrucciones tan pesadas como esta sería necesaria la versión premium.

7.2. Conclusiones

En este trabajo se ha intentado conseguir una representación fiel de una cueva submarina ubicada en la isla de Cabrera, permitiendo el estudio de una zona de difícil acceso para

diferentes propósitos como son la observación del cambio climático, la investigación de especies acuáticas o el control de especies en peligro de extinción como las nacras.

Para ello se han llevado a cabo distintas etapas, desde la grabación del vídeo hasta la creación del modelo 3D. Una vez trabajado en el proyecto se pueden sacar varias conclusiones.

Por un lado, la fotogrametría submarina presenta obstáculos mucho mayores que las reconstrucciones aéreas debido a la falta de posicionamiento geoespacial y las condiciones cambiantes, lo que hace que se deban buscar alternativas para facilitar el proceso. Una técnica que podría ayudar y que no se ha realizado en este trabajo es el uso de colores llamativos en las cintas usadas la hora de grabar el vídeo para poder identificar de una manera más sencilla puntos comunes.

Además, uno de los grandes problemas que ha generado el proceso es que, la cueva submarina no es plana, sino que tiene una cierta inclinación. Sabemos que los datos fueron tomados desplazándose en «barridos» por la cueva. Esto provocó una diferencia entre aquellas tomas capturadas en sentido ascendente o descendente. Mientras que las imágenes obtenidas en sentido descendente contaban con una perspectiva más amplia del entorno, las capturadas en sentido ascendente eran prácticamente un plano cenital, lo que complica al software identificar la dirección de las imágenes. Por tanto, una solución de futuro es capturar todos los datos de la cueva en sentido descendente, consiguiendo así que el software necesite menos ayudas a la hora de obtener la dirección y la inclinación, simplificando la reconstrucción.

Por otro lado, otro gran problema es el tamaño del modelo y es que, al tratarse de una zona tan grande, los modelos generados son demasiado pesados y complica su procesado y trabajo. A pesar de obtener los modelos más sencillos que el software nos permite y haber bajado la calidad de las imágenes, la reconstrucción 3D obtenida sigue contando con tanta información que si pretendemos realizar algún trabajo posterior como visualización en realidad virtual o creación de aplicaciones inmersivas tendremos problemas. Por ello, se pueden buscar varias soluciones como dividir la reconstrucción en dos, aunque eso quizá suponga perder perspectiva sobre la zona.

Por otro lado podría ser posible simplificar más el modelo con algún programa externo pero eso puede suponer obtener modelos con una calidad demasiado baja. Una solución que satisfaga puede ser el uso de una técnica como la retopología, que ayuda a reducir la cantidad de polígonos manteniendo la integridad visual del modelo.

Se podría pretender también la implementación de algoritmos de compresión de datos y técnicas de manejo de grandes volúmenes de información para facilitar el almacenamiento y procesamiento de los modelos 3D.

Los resultados obtenidos aunque no sean sencillos de obtener tienen un amplio espec-

tro de aplicaciones. Pueden contribuir significativamente a la investigación científica, proporcionando datos valiosos para estudios medioambientales y biológicos. Además, la reconstrucción 3D de la cueva puede ser una herramienta educativa poderosa, permitiendo a estudiantes y profesionales explorar ambientes inaccesibles. La integración de estos modelos en plataformas de realidad virtual puede ofrecer experiencias inmersivas para turismo virtual y entrenamiento de buceadores.

Por último y como conclusión final, este proyecto ha demostrado que la fotogrametría submarina es una herramienta valiosa pero desafiante para la documentación y estudio de ambientes submarinos. Los métodos y técnicas mejorados sugeridos pueden aumentar la precisión y eficiencia de futuras investigaciones. Con el avance de la tecnología se espera que las reconstrucciones 3D submarinas se conviertan en una práctica común, facilitando la exploración y conservación de ecosistemas marinos.

Bibliografía

- [1] Arezou Shafaghat Ali Keyvanfar. Emerging dimensions of unmanned aerial vehicle's (uav) 3d reconstruction modeling and photogrammetry in architecture and construction management. `chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/363283/10492-10999.pdf?sequence=3&isAllowed=y`.
- [2] Artec 3D. Photogrammetry vs 3d scanning for creating a 3d model. <https://www.artec3d.com/learning-center/photogrammetry-vs-3d-scanning>.
- [3] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. Surf: Speeded up robust features. In Aleš Leonardis, Horst Bischof, and Axel Pinz, editors, *Computer Vision – ECCV 2006*, pages 404–417, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Wilhelm Burger and Mark J. Burge. *Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)*, pages 709–763. Springer International Publishing, Cham, 2022.
- [5] Universidad de Cantabria. Virtualmar. <https://virtualmar.unican.es>.
- [6] Kenneth Brasher Jim Ashworth. *3D Reconstruction: Methods, Applications & Challenges*. Computer Science, Technology and Applications. Nova Science Publishers, New York, NY.
- [7] C.S. Kenney, M. Zuliani, and B.S. Manjunath. An axiomatic approach to corner detection. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 1, pages 191–197 vol. 1, 2005.
- [8] Amusement Logic. Fotogrametría subacuática. <https://amusementlogic.es/articulos/fotogrametria-subacuatica>.
- [9] OpenAI. ChatGPT, 2021.
- [10] Pix4D. Drones in construction: Benefits. <https://www.pix4d.com/blog/drones-in-construction-benefits/>.
- [11] Elena Prado, Adolfo Cobo, Sergio Sierra, Ángela Domingo, Carla Quilez-Pons, Luis Rodríguez, David Díaz, Pablo Roldán, Pedro Anuarbe, and Francisco Sánchez. Uso

de fotogrametría tridimensional e inteligencia artificial en el estudio de ecosistemas marinos: Proyecto virtualmar.

- [12] Reality Capture. Reality capture: 3d scanning and photogrammetry software. <https://www.realitycapture.com/>.
- [13] Scottish Maritime Museum. Scottish maritime museum. <https://www.scottishmaritimemuseum.org/>.
- [14] Stephen Kyle Thomas Luhmann, Stuart O. Robson. *Close Range Photogrammetry Principles, Methods and Applications*.
- [15] VNTANA. 3d scanning and photogrammetry explained. <https://www.vntana.com/blog/3d-scanning-and-photogrammetry-explained/>.