

CAMINOS DE INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

USO DE FOTOGRAMETRÍA TRIDIMENSIONAL E INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL ESTUDIO DE ECOSISTEMAS MARINOS: PROYECTO VirtualMAR

Elena Prado^{1*}, Adolfo Cobo², Sergio Sierra³, Ángela Domingo⁴, Carla Quiles-Pons⁵, Luis Rodríguez⁶, David Díaz⁷, Pablo Roldán⁸, Pedro Anuarbe⁹, Francisco Sánchez¹⁰

¹ Dra. Ingeniera de costas, hidrobiología y gestión de sistemas acuáticos. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Santander).

² Dr. Ingeniero de telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

³ Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁴ Máster en Tecnologías de la Información Geográfica.

⁵ Máster Erasmus Mundus en Biodiversidad Marina y Conservación. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Baleares).

⁶ Dr. Ingeniero de telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁷ Dr. Estudios Avanzados de Ecología. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Baleares).

⁸ Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁹ Graduado en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

¹⁰ Dr. en Ciencias Biológicas. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Santander).

* Autora de contacto: elena.prado@ieo.csic.es

Protección de los océanos

Las actividades humanas y los efectos del cambio climático producen un enorme impacto en los ecosistemas marinos, desde la pérdida de hábitats o la sobreexplotación de recursos, la introducción de especies alóctonas o la contaminación, afectando negativamente a su estado de conservación. La pérdida de biodiversidad en los ecosistemas marinos es una de las consecuencias más graves que pueden encontrarse. Desde las diferentes instituciones se está poniendo especial énfasis en adoptar nuevas estrategias para detener esta pérdida de biodiversidad y restaurar los ecosistemas cuando sea posible.

Para ello, las Áreas Marinas Protegidas (AMP) son figuras de gestión espacial esenciales para la conservación de la biodiversidad: De hecho, las AMPs se presentan como una herramienta esencial en todas las estrategias nacionales e internacionales de conservación. Gracias al marco económico y a los avances científicos realizados en los proyectos LIFE INDEMARES y LIFE IP INTEMARES, España ha aumentado su espacio marino protegido del 1 % al 12 % de sus aguas marinas en solo unos años, y se sigue avanzando hacia la meta de designar el 30 % de superficie protegida de nuestros mares para 2030. Además, existen también figuras de protección ambiental de ámbito nacional como la Red de Parques Nacionales, que garantizan esa protección de espacios y apoyan

la investigación y estudios en su amplia red de parques. Dos de estos espacios, se declararon principalmente por el interés de sus fondos marinos el Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia y el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. En este último es donde principalmente se ha desarrollado el proyecto VirtualMAR, financiado dentro de la Convocatoria de Investigación del Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

La importancia de cartografiar los fondos marinos en alta resolución

En el ámbito marino, los fondos que poseen una alta componente tridimensional, con estructura compleja, son un gran nicho de biodiversidad. Estos hábitats pueden estar formados por una elevada complejidad geomorfológica del sustrato, como los fondos rocosos abruptos, o bien por fondos estructurados por especies bioconstructoras que conforman ese hábitat complejo. Un claro ejemplo de ello son los arrecifes de coral de aguas frías (figura 1), donde se observa esa mayor presencia de especies, asociada a la complejidad estructural innata en los propios arrecifes (Ferreira *et al.*, 2001; Guinan *et al.*, 2009).

Se puede obtener una cartografía del fondo oceánico global derivada de datos satelitales, partiendo del principio de que la topografía de la superficie del océano se adapta a las elevaciones y depresiones del fondo oceánico por efecto de la gravedad. Por tanto, utilizando instrumentos que miden el nivel de la superficie marina también se puede cartografiar la topografía del fondo del océano. Sin embargo, la escala de los datos derivados a partir de la teledetección espacial no es capaz de describir características del sustrato marino a una fina escala. De modo que, si queremos realizar una gestión adecuada en fondos complejos, con elevada estructura como los ya mencionados arrecifes de coral, no podemos usar técnicas de amplio espectro, sino que necesitamos contar con técnicas que registren datos a una alta

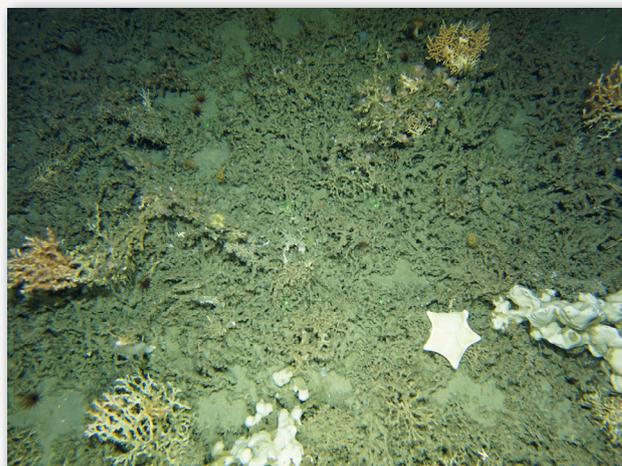


Figura 1. Imagen de detalle del arrecife de coral de aguas frías situado en el Cañón de La Gavierra, mar Cantábrico (Fuente: IEO ROTV Politolana, campaña ECOMARG, 2017).

resolución espacial. Este tipo de registro detallado de los fondos impone importantes complicaciones tecnológicas. En los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de estudios y metodologías que permiten determinar el estado de conservación de las poblaciones de especies vulnerables, describir los hábitats estructurados por dichas especies de forma precisa y conseguir la monitorización a lo largo del tiempo de estos espacios.

El avance tecnológico en los estudios marinos

Tradicionalmente, los métodos extractivos o dragas de muestreo han sido los más utilizados para el estudio de la abundancia y caracterización de especies existentes en fondos blandos o sedimentarios. Sin embargo, cuando se trabaja en zonas con fondos más complejos, y sobre todo en zonas con fondos vulnerables, adquiere mayor importancia la utilización de muestreos o técnicas de exploración no invasivas. Esta aproximación minimiza al máximo el impacto que los propios métodos de muestreo puedan ejercer sobre los hábitats objeto de estudio. Otro aspecto clave dentro de las tecnologías de muestreo es que sean sostenibles en el tiempo, proporcionando información homogénea y comparable que pueda servir como base a estudios multitemporales. La evolución del estado de conservación, degradación o recuperación de un hábitat solo puede ser determinada en base a estudios que extraigan datos comparables en el tiempo.

En este sentido, el uso de imágenes submarinas se ha revelado como una de las metodologías más valiosas de cara a estudiar los fondos vulnerables de una manera sostenible. Estas imágenes pueden ser adquiridas mediante técnicas con escafandra autónoma y/o vehículos submarinos tripulados de forma remota, los denominados ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) en sus diferentes variantes. Tanto los sistemas de adquisición operados por buceadores, como los que se instalan en vehículos, generalmente poseen diferentes equipos de adquisición de datos basados en tecnología acústica, imagen, sistemas de iluminación y sondas CTD.

En el proyecto VirtualMAR se ha realizado un importante esfuerzo en el desarrollo de instrumentación submarina altamente especializada y adaptada específicamente a la problemática del estudio de los hábitats marinos de la Red de Parques Nacionales. Se ha diseñado y construido un módulo de fotogrametría, compuesto principalmente por una cámara de vídeo, dos focos de tecnología LED y sensores ambientales, todo ello integrado en una carcasa sumergible hasta 150 metros (figura 2). Este diseño permite al módulo operar en zonas de baja visibilidad, como áreas profundas, donde no llega suficiente luz natural o zonas de difícil acceso como interiores de cuevas submarinas. El módulo puede ser operado por buceadores en campañas de monitorización de hábitats o ser integrado en vehículos submarinos no tripulados ligeros. Este esfuerzo de innovación ha generado una herramienta capaz de adquirir unas imágenes de gran detalle, permitiendo avanzar en la capacidad de obtener información de fondos marinos.

El avance del diseño específico de sensores, la integración de otros elementos complementarios en el

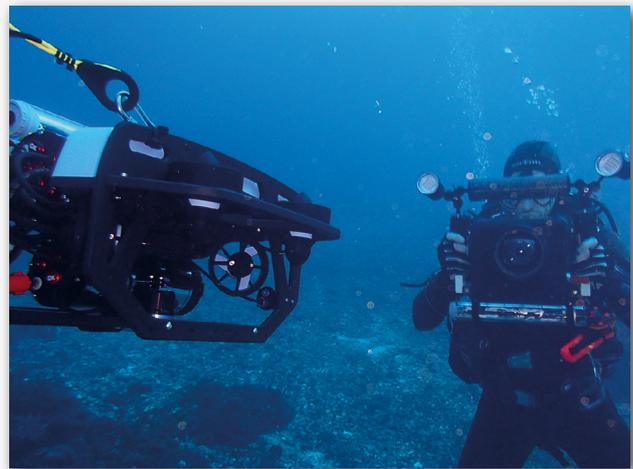


Figura 2. Imagen del módulo de fotogrametría desarrollado en el Proyecto VirtualMAR operado por un buceador junto a un ROV ligero.

sistema (iluminación, sistemas de posicionamiento y orientación, etc.), y su completa integración electrónica, permiten introducir posteriormente tecnologías de proceso de imágenes no utilizadas habitualmente en el entorno submarino.

Fotogrametría tridimensional aplicada a fondos marinos

La fotogrametría es la ciencia de obtener datos fiables sobre objetos físicos mediante el registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas. En los últimos años, el rápido desarrollo de la informática y los avances tecnológicos han posibilitado aplicaciones de la fotogrametría a diferentes ámbitos, más allá de la generación de mapas topográficos y planos. Una importante y reciente evolución en el campo de la fotogrametría es el desarrollo de lo que se conoce como la técnica de “estructura a partir del movimiento”, aunque habitualmente se denomina por su término en inglés, *Structure from Motion* o SfM (Carrivick *et al.*, 2016).

La técnica SfM permite la reconstrucción de objetos tridimensionales (3D) a partir de una serie de imágenes bidimensionales (2D) con un alto grado de solape, ver figura 3 (Sweeney, 2016). A diferencia de la fotogrametría tradicional, en las técnicas de SfM no es indispensable contar con el posicionamiento de las tomas, orientación de la cámara o información precisa de los puntos de control en la escena antes de reconstruir la geometría de la superficie. Los modelos cartográficos tridimensionales posibilitan la obtención de una gran variedad de medidas sobre los organismos en 3 dimensiones (alturas, volúmenes, rugosidad, etc.). Y puede ser la base para estudios de conservación, dinámica, crecimiento, con una elevada precisión, e incluso conocer la respuesta a posibles impactos y mortalidad de especies.

La colaboración surgida entre el grupo de investigación ECOMARG, del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), y el Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF), de la Universidad de Cantabria (UC), ha permitido en los últimos años la utilización de técnicas de SfM para documentar yacimientos arqueológicos submarinos (Prado *et al.*, 2019a), cuantificar la estructura de poblaciones de especies profundas altamente vulnerables, basado en

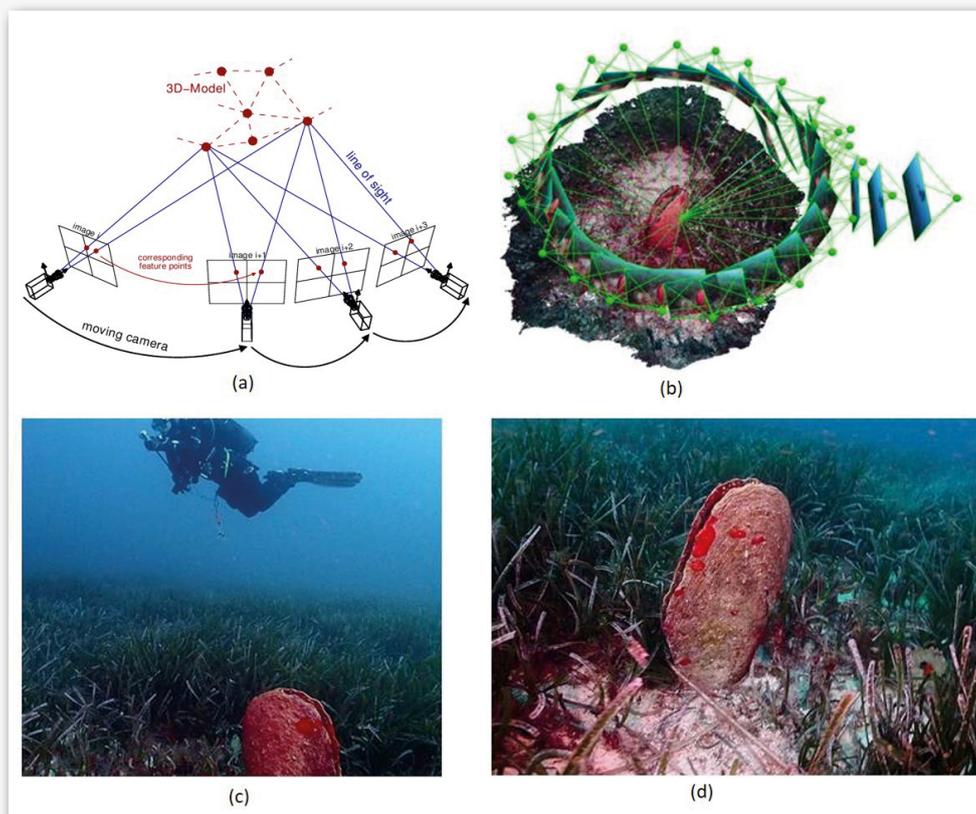


Figura 3. (a) Esquema de SfM (Sweeney, 2016); (b) esquema de reconstrucción 3D de un ejemplar de *Pinna nobilis*; (c) momento de la toma de datos; y (d), modelo 3D del ejemplar.

una evaluación de su morfometría de alta precisión (Prado *et al.*, 2019b; Ríos *et al.*, 2020), el modelado de microhábitats bentónicos (Prado *et al.*, 2020) y la estimación de ratios de crecimiento de esponjas de profundidad (Prado *et al.*, 2021). Pero, en general, la aplicación de las técnicas SfM en estudios de ecología marina puede considerarse todavía escasa, y existen muchos ámbitos dentro de los estudios marinos en los que potencialmente podría resultar interesante su aplicación.

Durante la ejecución del proyecto VirtualMAR se ha explorado también la potencialidad de los modelos tridimensionales como fuente de divulgación y acercamiento de la ciencia a la ciudadanía. Se ha generado una galería virtual 3D de acceso libre de los fondos más representativos de nuestros parques nacionales (<https://sketchfab.com/VirtualMAR>), como praderas de posidonias, comunidades de coralígeno, cuevas submarinas, campos de gorgonias, fondos de arena y cascajo, infralitoral rocoso con cobertura de algas y circalitoral rocoso con presencia de rodolitos. Esta galería de modelos virtuales tridimensionales está disponible en internet, es de libre acceso y los modelos tridimensionales pueden ser visualizados desde cualquier dispositivo, incluidas gafas de realidad virtual. Gracias a este recurso, desde los centros de interpretación de la naturaleza de los parques nacionales pueden ahora facilitar que el ciudadano se sumerja virtualmente y explore con sus propios ojos los fondos marinos.

Estudio poblacional del coral rojo (*Corallium rubrum*)

Los fondos de coralígeno son uno de los hábitats principales del mar Mediterráneo, con una gran

complejidad estructural y una gran abundancia y diversidad de flora y fauna asociados. Una de las especies más importantes en las comunidades de coralígeno es la de las colonias de coral rojo (*Corallium rubrum*) (Gianini *et al.*, 2003). Esta especie ha sido objeto de explotación con fines comerciales, principalmente para la fabricación de joyas, lo que ha hecho mermar su población en el Mediterráneo.

La vulnerabilidad de esta especie hace conveniente abordar estudios que permitan conocer su estado de salud y adoptar, si fuera necesario, las medidas administrativas y de conservación. Desde el proyecto VirtualMAR se ha puesto a punto una metodología no invasiva, basada en técnicas de fotogrametría para la evaluación de esta población (Domingo, 2021).

Se han utilizado dos transectos de vídeos grabados sobre una población de coral rojo en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, a unos 40 metros de profundidad. A lo largo las secciones de video se situaron escalas metálicas fijas de 3 ejes que permiten escalar las medidas a realizar sobre el bloque tridimensional generado (figura 4).

Partiendo de estos datos, y utilizando técnicas fotogramétricas, se han generado modelos tridimensionales o nubes de puntos 3D, con una media de aproximadamente 70 millones de puntos por modelo. Los modelos 3D del área de estudio cubren un área total de 56,83 m² de superficie de pared rocosa. Para realizar la caracterización de la población de coral en este estudio se han utilizado dos parámetros básicos que describen la población: la densidad de colonias de coral rojo y la estructura de tallas de dichas colonias. Las colonias de coral rojo están distribuidas a lo largo de los dos transectos,

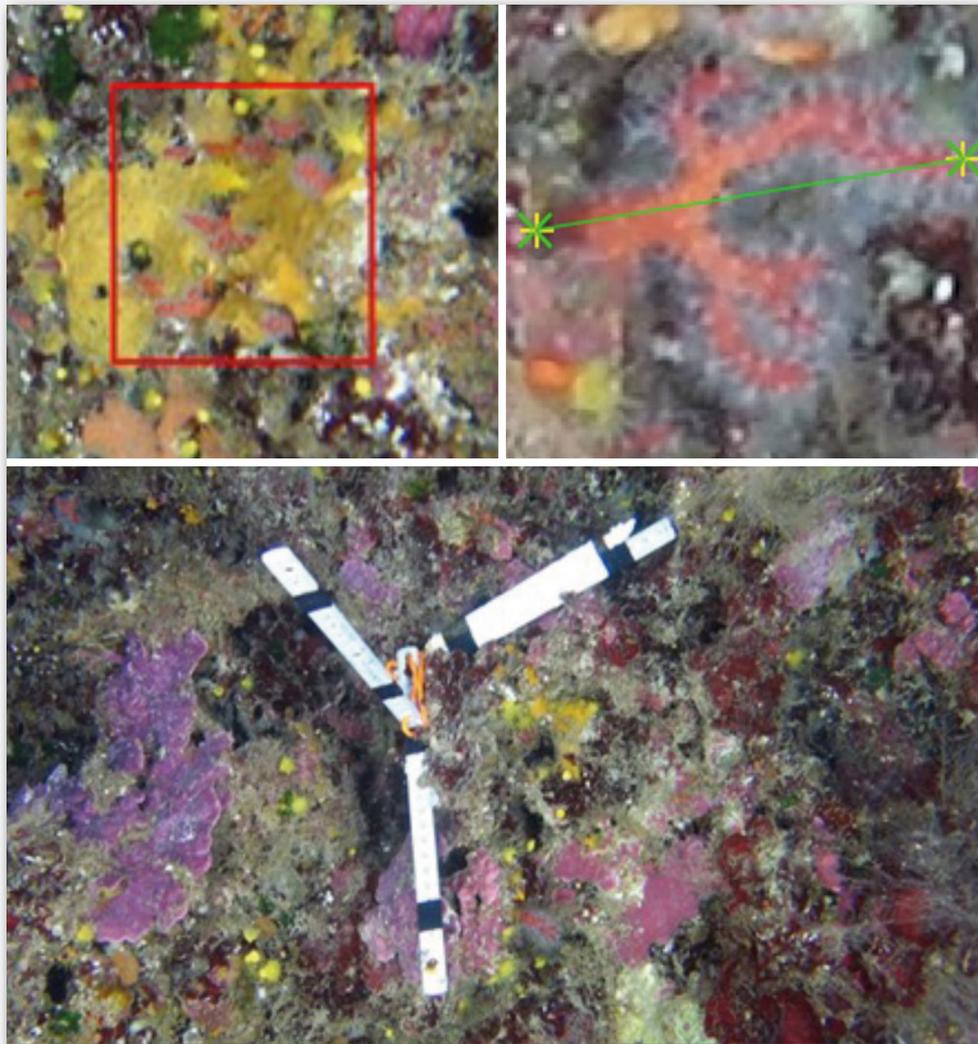


Figura 4. Fotograma de uno de los videos grabados en esta zona en el que pueden verse colonias de coral rojo (recuadro). Escala métrica de 3 ejes que proporcionan un método de escalado de los bloques tri-dimensionales. Detalle de la medición de la talla de una colonia de coral rojo.

principalmente en zonas de grietas o zonas más protegidas del sustrato rocoso. En total, 623 colonias de coral rojo fueron identificadas a lo largo de las dos secciones de vídeo, obteniéndose una densidad de población de 28 colonias por m^2 .

Por otro lado, la distribución de tallas de la población de coral a lo largo del transecto se consigue midiendo las colonias que aparecen en el área de estudio y realizando la distribución de las medidas de tallas en clases. Las medidas de longitud de las colonias se realizan sobre la nube de puntos 3D densificada con una polilínea recta que va desde la región basal hasta la cúspide de la rama más alejada (figura 4). Aunque esta medida no es la comúnmente utilizada para la gestión de la especie, puede sin embargo resultar indicativa y aportar una visión general del estado de la población. Para la caracterización de la distribución de tallas de la población de *C. rubrum* se midieron un total de 276 ejemplares. La longitud o talla media de la población presente en esta zona es de 19,7 mm. La talla con mayor frecuencia, que abarca un rango de entre 10 a 20 mm, agrupa un total de 163 colonias, es decir, un 59 % del total de ejemplares medidos. Le sigue la del grupo de tallas de 20-30 mm con una acumulación 86 colonias, que correspondería al 31 % de la muestra.

Tabla 1. Distribución de tallas de la población de *C. rubrum* (Domingo, 2021)

Clase de talla	Frecuencia	Porcentaje %
0-10	3	1.09
10-20	163	59.06
20-30	86	31.16
30-40	22	7.97
40-50	1	0.36
50-60	1	0.36

Técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje profundo

Existe un vacío entre la generación de estos productos cartográficos con propiedades métricas avanzadas y la necesidad de estudiar el contenido de la imagen con el punto de vista puesto en la identificación de especies o la catalogación de tipos de fondo. A este último aspecto se le hace frente habitualmente mediante el trabajo de expertos en taxonomía, a partir de tediosos y largos procesos de visualización y etiquetado del contenido de las imágenes. Es evidente que en este proceso las técnicas de inteligencia artificial (IA) pueden ofrecer alternativas viables.

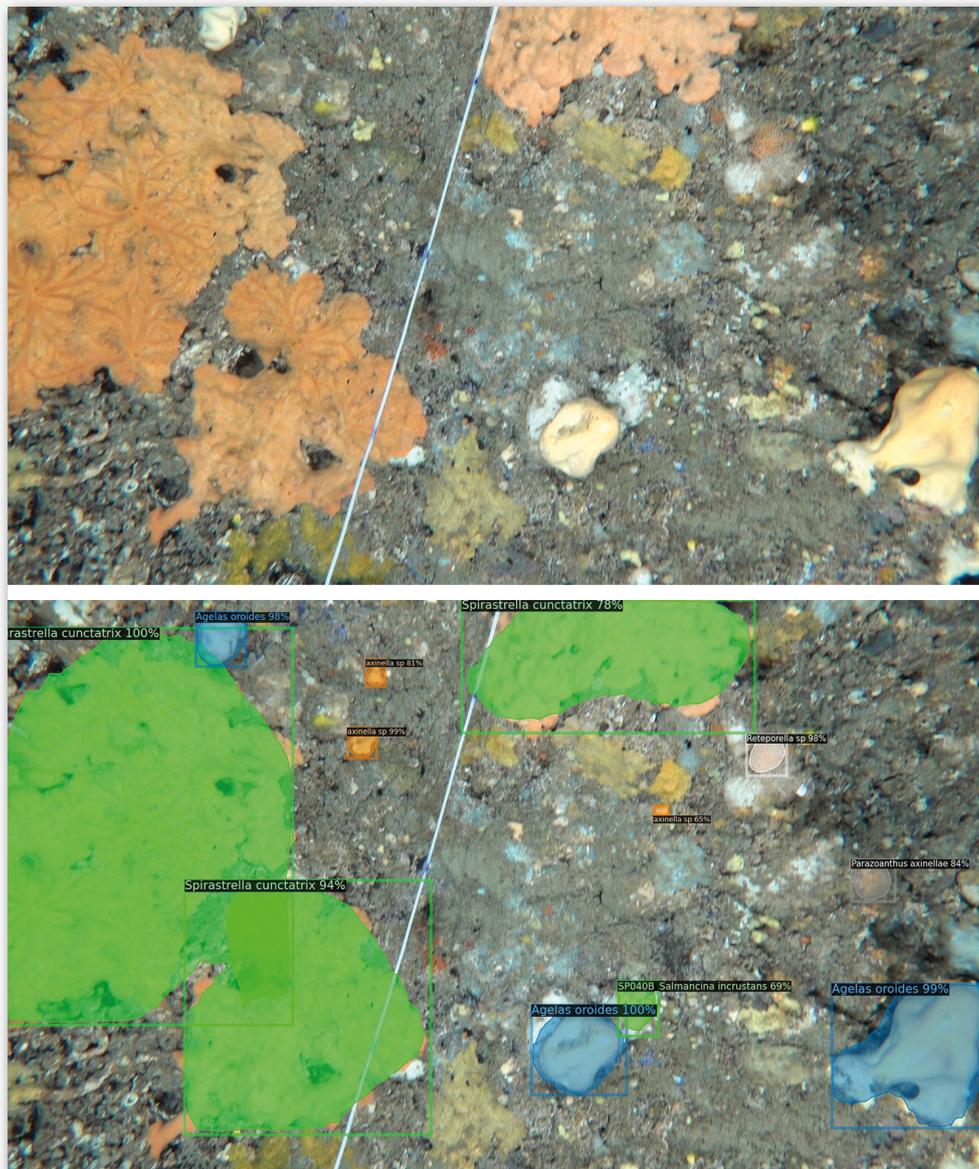


Figura 5. Fotogramas de uno de los videos grabados en una cueva submarina. Arriba se puede ver el fotograma original, abajo el fotograma con las especies segmentadas y etiquetadas por el algoritmo de IA desarrollado en VirtualMAR.

En la actualidad son muy numerosas las aplicaciones en las que la IA puede ser utilizada, como sistemas expertos, robótica, reconocimiento de voz y visión artificial, entre otros. Las técnicas basadas en IA han tomado mucha relevancia en parte debido al gran aumento que se ha producido en la disponibilidad de datos de todo tipo y la necesidad surgida de analizar ese gran volumen de información. La aplicación particular de análisis automatizado de las imágenes capturadas en fondos marinos profundos está comenzando a ser explorada en la actualidad con estas herramientas. Así, se ha propuesto el uso de modelos como las redes convolucionales (CNN) con arquitecturas AlexNet y LeCun, respectivamente, para las tareas de detección de presencia de especies propias de los fondos marinos y su clasificación entre 10 posibles categorías genéricas, como estrella de mar, cangrejo, pez de roca, coral, etc. (Marburg y Bigham, 2016).

La monitorización de la biodiversidad marina y el estudio de las densidades de las especies estructurantes de hábitats vulnerables es un desafío en algunos hábitats especialmente complejos, como son las cuevas

submarinas. Las cuevas marinas se consideran un hábitat prioritario para la conservación incluido en la Directiva de Hábitats de la UE (Hábitat 8330). Aunque un gran número de comunidades bentónicas vulnerables habitan el interior de cuevas submarinas, el conocimiento existente sobre estos hábitats es muy escaso. Esto se debe a las dificultades de acceso y a las limitaciones de muestreo que dificultan la creación de cartografía detallada de hábitats, inventarios de especies y estudios de dinámica comunitaria o evaluación de daños (Quiles-Pons *et al.*, 2022). Las especies sésiles que viven en las paredes rocosas de este ambiente son especialmente vulnerables debido a su sensibilidad a los impactos provocados por factores como el buceo recreativo. Por ello, en el contexto del proyecto VirtualMAR se han utilizado este tipo de algoritmos, que han sido programados y entrenados para que puedan identificar y clasificar automáticamente las principales especies que estructuran los hábitats presentes en las cuevas sumergidas (figura 5). Para ello se ha desarrollado una metodología basada en la grabación de videos en las paredes de las

cuevas y el análisis de dichas imágenes con algoritmos de aprendizaje profundo, que entrenados por expertos taxónomos consiguen estimar de forma automática la densidad espacial de las especies de interés en un área determinada. Esta metodología propuesta conseguirá proporcionar, mediante segmentación semántica y estimación precisa de la extensión real de la superficie, mapas de densidad que puedan monitorizar el estado de la biodiversidad a lo largo del tiempo.

Avances conseguidos en los estudios de fondos marinos

Los modelos tridimensionales basados en algoritmos SfM permiten representar el fondo marino con una alta resolución espacial, posibilitando el estudio en 3 dimensiones de los ecosistemas marinos con resoluciones centimétricas. Esto permite utilizarlos como fuente de datos principal para la evaluación de los hábitats tridimensionales complejos, como es el ejemplo presentado en este artículo del estudio del coral rojo, una especie totémica de un hábitat como el coralígeno de gran complejidad estructural y con una elevada biodiversidad. Por su parte, las clasificaciones automáticas de imágenes basadas en algoritmos de inteligencia artificial permiten analizar el proceso de miles de imágenes sin intervención humana posibilitando el avance en el conocimiento de diversos ecosistemas vulnerables.

Referencias

Carrivick, J.L., Smith, M.W., y Quincey, D.J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. Chichester (R. U.): Wiley-Blackwell.

Domingo, A. (2021). Fotogrametría submarina 3D aplicada a la caracterización de *Corallium rubrum* y *Pinna rudis* en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Trabajo Fin de Máster. *Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica*. Alcalá de Henares (Madrid): Universidad de Alcalá.

Ferreira, C.E., Gonççalves, J.E., y Coutinho, R. (2001). Community structure of fishes and habitat complexity on a tropical rocky shore. *Environmental Biology of Fishes*, 61: pp. 353–369.

Giannini, F., Gili, J.M., y Santangelo, G. (2003). Relationships between the spatial distribution of red coral *Corallium Rubrum* and coexisting suspension feeders at Medas Islands Marine Protected Area (Spain). *Italian Journal of Zoology*, 70(3): pp. 233–239. <https://doi.org/10.1080/11250000309356523>

Guinan, J., Brown, C., Dolan, M.F.J., y Grehan, A.J. (2009). Ecological niche modelling of the distribution of cold-water coral habitat using underwater remote sensing data. *Ecological Informatics*, 4(2): pp. 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2009.01.004>

Marburg, A., y Bigham, K. (2016). Deep learning for benthic fauna identification. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1-5.

Prado, E., Gómez-Ballesteros, M., Cobo, A., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Arrese, B., y Rodríguez-Cobo, L. (2019a). 3D Modeling of Rio Miera wreck ship merging optical and multi-beam high resolution points cloud. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W10, 159–165. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-159-2019>

Prado, E., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Altuna, Á., y Cobo, A. (2019b). Analysis of the population structure of a gorgonian forest (*Placogorgia* sp.) using a photogrammetric 3D modeling approach at Le Danois Bank, Cantabrian Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 153. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-159-2019>

Prado, E., Rodríguez-Basalo, A., Cobo, A., Ríos, P., y Sánchez, F. (2020). 3D Fine-scale terrain variables from underwater photogrammetry: a new approach to benthic microhabitat modeling in a circalittoral rocky shelf. *Remote Sensing*, 12(15): 2466. <https://doi.org/10.3390/rs12152466>

Prado, E., Cristobo, J., Rodríguez-Basalo, A., Ríos, P., Rodríguez-Cabello, C., y Sánchez, F. (2021). *In situ* growth rate assessment of the hexactinellid sponge *Asconema setubalense* using 3D photogrammetric reconstruction. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 8: 612613. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.612613>

Quiles-Pons, C., Baena Vega, I., Calvo, M., De la Ballina, N.R., Díez-González, S., Goñi, R., Mallol Martínez, S., Maresca, F., Morató, M., Muñoz, A., Prado, E., Real García, E., Sánchez, F., y Díaz, D. (2022). Monitoring the complex benthic habitat on semi-dark underwater marine caves using photogrammetry-based 3D reconstructions. *3rd Mediterranean Symposium on the Conservation of the Dark Habitats, Genoa, Italy, 21-22 September 2022*.

Ríos, P., Prado, E., Carvalho, F.C., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Xavier, J.R., Ibarrola, T.P., y Cristobo, J. (2020). Community composition and habitat characterization of a rocksponge aggregation (Porifera, Corallistidae) in the Cantabrian Sea. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00578>

Sweeney, C. (2016). Theia multiview Geometry library: Tutorial & Reference. <http://theia-sfm.org/>