



# Interreg

## España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



Conocimiento y transferencia  
de tecnología sobre sistemas de  
monitorización aéreos y acuáticos para  
el desarrollo transfronterizo de ciencias  
marinas y pesqueras:  
Proyecto KTTSeaDrones

Edición: Ayuntamiento de Isla Cristina



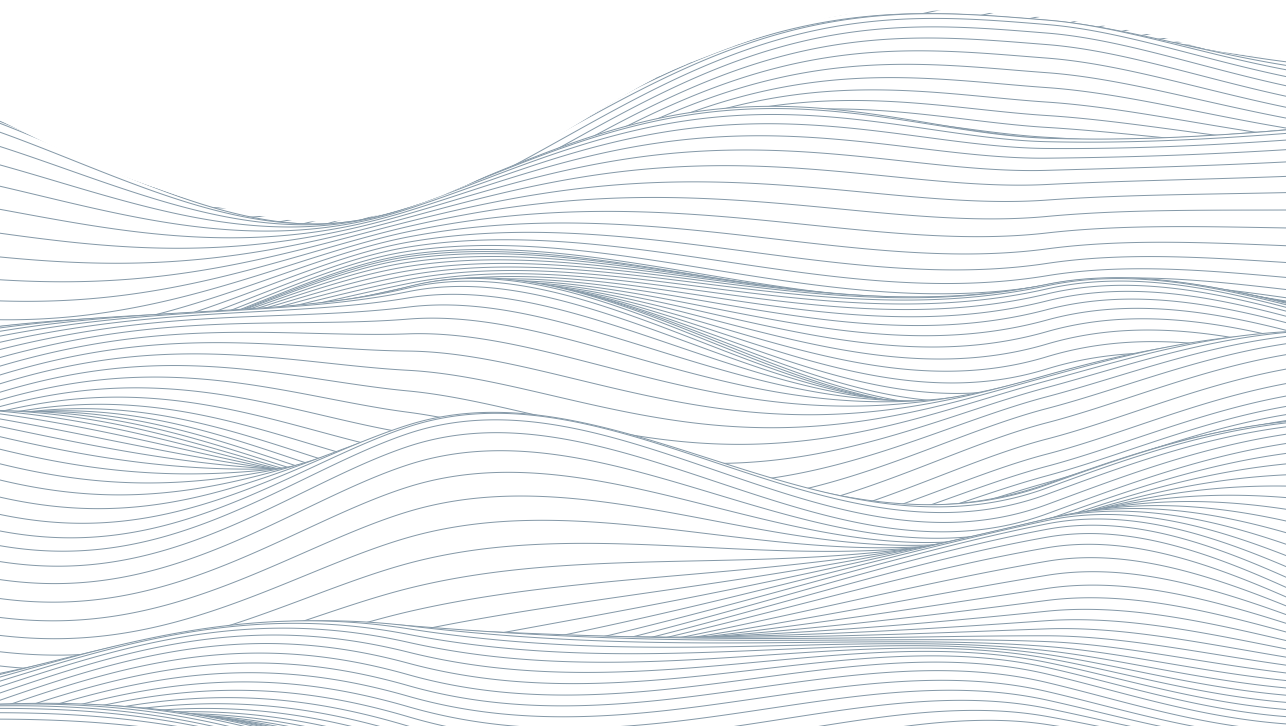




Conocimiento y transferencia de tecnología sobre sistemas de monitorización aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras:

Proyecto KTTSeaDrones

KTTSeaDrones – Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020





# Conocimiento y transferencia de tecnología sobre sistemas de monitorización aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras: Proyecto KTTSeaDrones

## EDICIÓN



Ayuntamiento de  
**ISLA CRISTINA**

## COORDINACIÓN AYUNTAMIENTO DE ISLA CRISTINA

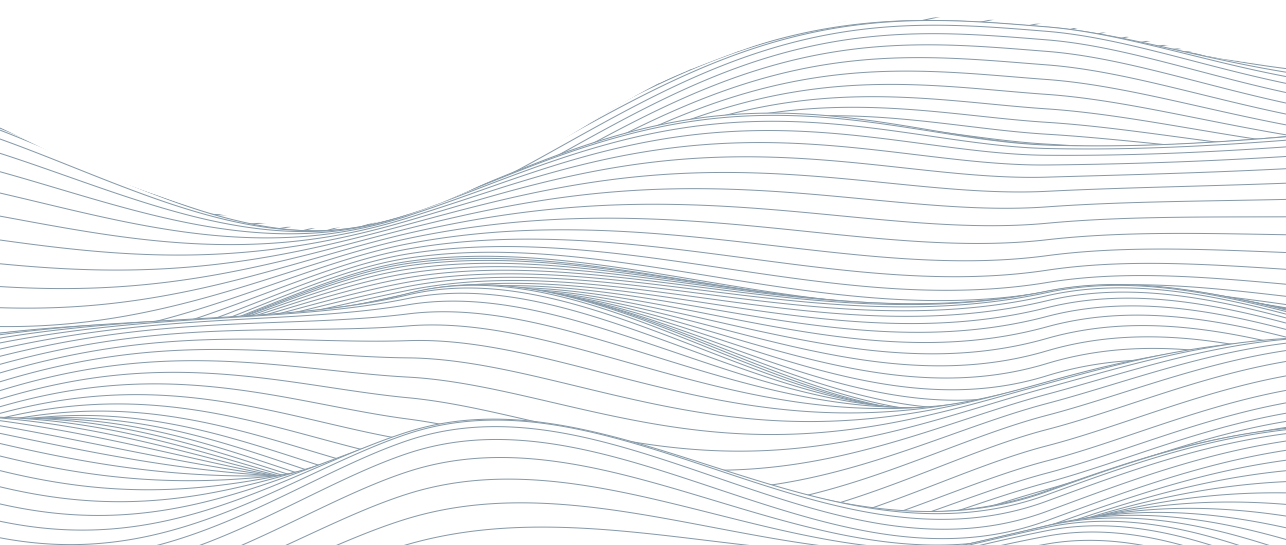
ISABEL MARTÍNEZ CEADA

MANUELA ESCOBAR ZAMORA

## COORDINACIÓN UNIVERSIDAD DE HUELVA

JUAN CARLOS GUTIÉRREZ ESTRADA

INMACULADA PULIDO CALVO







Ayuntamiento de  
**ISLA CRISTINA**

Primera edición en formato papel: Septiembre 2022

Primera edición en formato ebook: Septiembre 2022

I.S.B.N. (Papel): 978-84-09-42392-7

I.S.B.N. (Ebook): 978-84-09-42801-4

Depósito legal: H 196-2022

E-BOOK: <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/documentos>

---

### **Maquetación e Impresión**

Nelvima Disseny S.L. | [www.nelvima.com](http://www.nelvima.com)

### **Detalles materiales y acabados**

#### *Papel*

Cartulina gráfica 300 g. / Estucado mate 150 g.  
libres de cloro y con la certificación FSC®

#### *Encuadernación*

Encuadernación fresada PUR.

Printed in Spain. Impreso en España.

---

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutivo de delito contra la propiedad intelectual.

---

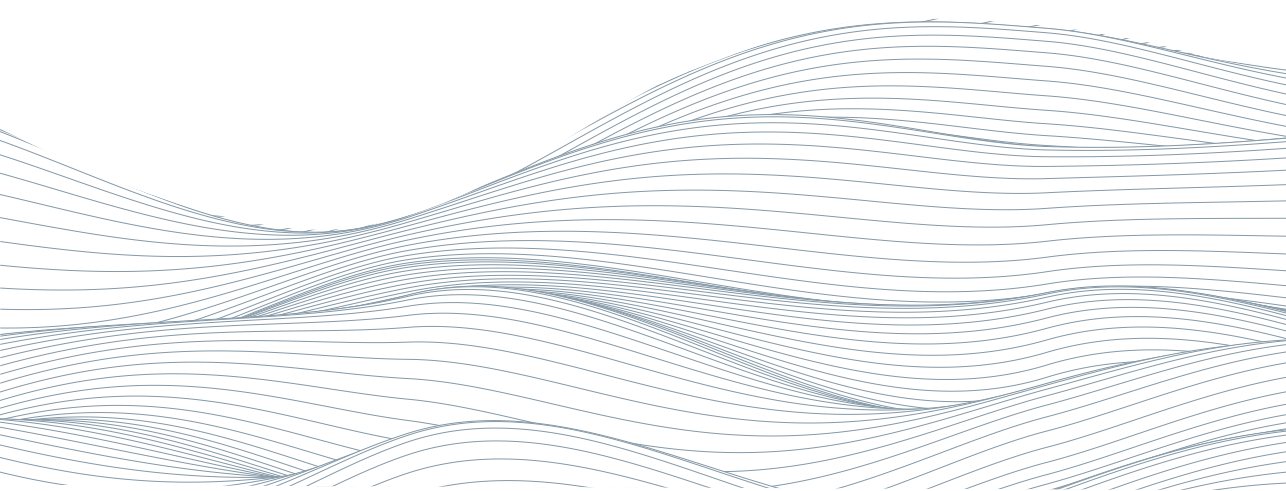
Las opiniones presentadas en este libro comprometen únicamente a los beneficiarios del proyecto KTTSeaDrones y, en consecuencia, no representan en ningún caso la opinión oficial de los órganos de gestión del POCTEP.



# ÍNDICE

---

·	<b>1 Prólogo</b>	11
	JENARO ORTA PÉREZ   Ayuntamiento de Isla Cristina	
·	<b>2 Prólogo</b>	15
	MARÍA JESÚS MOSQUERA DÍAZ   Universidad de Cádiz	
·	<b>3 Prólogo</b>	19
	PAULO ÁGUAS   Universidade do Algarve	
·	<b>4 Prólogo</b>	23
	JOSÉ RODRÍGUEZ QUINTERO   Universidad de Huelva	
·	<b>01. El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales</b>	27
	M. BETHENCOURT	
·	<b>02. El uso de sistemas aéreos no tripulados en la investigación en zonas costeras</b>	67
	L. BARBERO GONZÁLEZ   J.A. LÓPEZ RAMÍREZ	
·	<b>03. Vehículos Operados Remotamente (ROVs) y dispositivos acústicos de imagen como sistemas de ayuda en la gestión de instalaciones de acuicultura semi-intensiva</b>	103
	J.C. GUTIÉRREZ ESTRADA   I. PULIDO CALVO   F. GÓMEZ BRAVO   A. PEREGRÍN   A. GARROCHO GRUZ   S. LÓPEZ DOMÍNGUEZ   J. CASTRO GUTIÉRREZ   I. DE LA ROSA LUCAS	
·	<b>04. Análisis hidrodinámico de vehículos submarinos operados remotamente (ROVs)</b>	161
	J.J. TOSCANO ÁNGULO   I. PULIDO CALVO   J.C. GUTIÉRREZ ESTRADA	
·	<b>05. Sistema fixo de monitorização de recursos marinhos</b>	191
	J. PARENTE SILVA   R. VEIGA   F. ZABEL   A. SILVA   J. SEMIÃO	
·	<b>06. Sistema automático para a deteção de peixes em mar aberto</b>	219
	R. VEIGA   J. PARENTE SILVA   J.M.F. RODRIGUES   J. SEMIÃO	
·	<b>07. Transferencia de conocimiento: Acciones de comunicación y difusión del Proyecto KTTSeaDrones</b>	239
	I. MARTÍNEZ CEADA   M. ESCOBAR ZAMORA   J.C. GUTIÉRREZ ESTRADA   I. PULIDO CALVO	







# 01 Prólogo

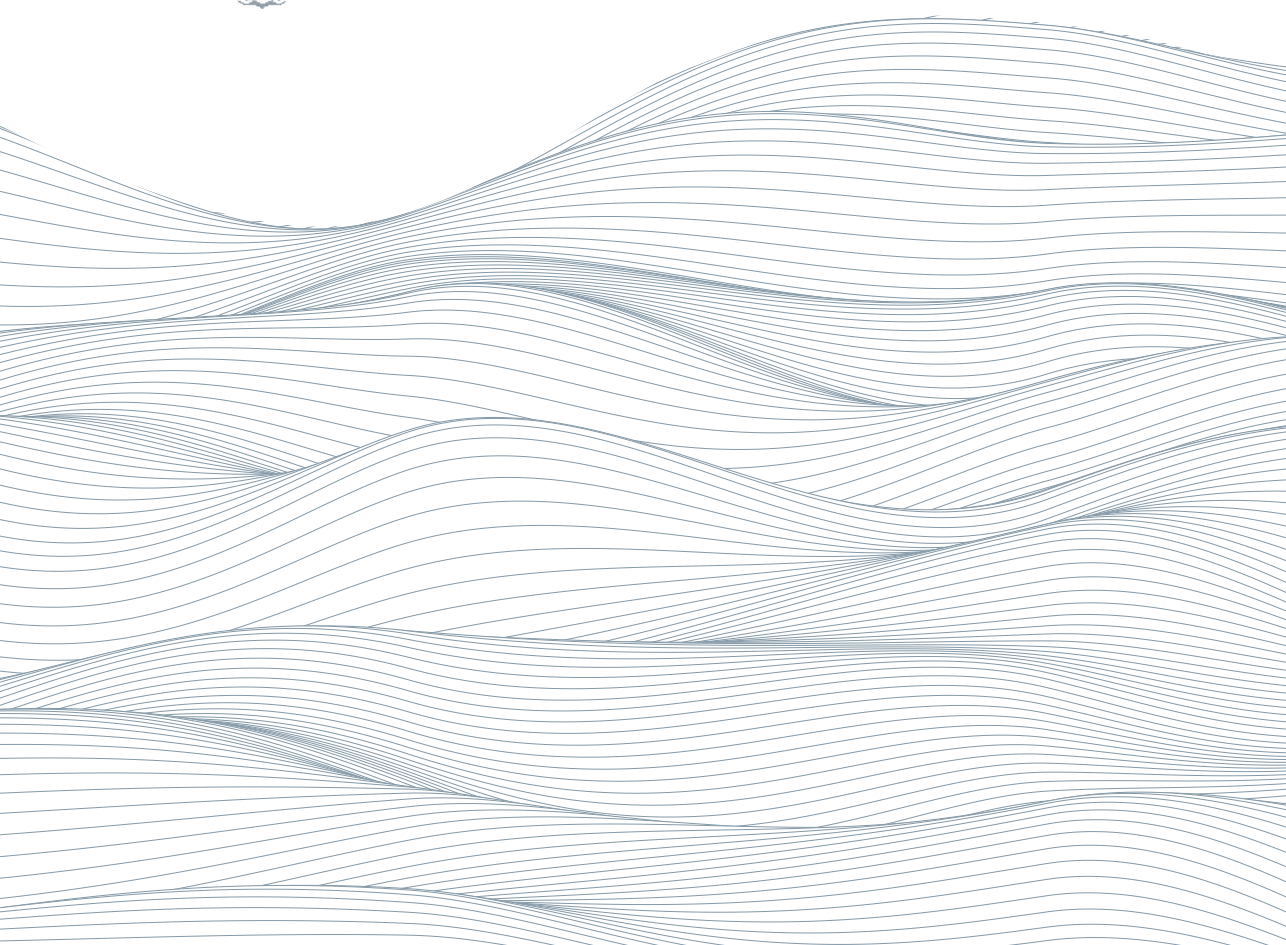
JENARO ORTA PÉREZ

Alcalde de Isla Cristina

**Ayuntamiento de Isla Cristina**



Ayuntamiento de  
**ISLA CRISTINA**





Isla Cristina ha sido el municipio elegido para formar parte del denominado proyecto 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E, “Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras.” aprobado en la segunda convocatoria del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 y cofinanciado con Fondos FEDER.

A lo largo de la puesta en marcha de este importante proyecto de cooperación, por todo lo que supone de cara a nuestros recursos pesqueros y el aprovechamiento de los mismos, hemos podido interactuar con distintas Instituciones de varios sectores de uno y otro lado de la frontera, con la Universidad de Cádiz, la Universidad de Huelva, que ha coordinado el proyecto y la Universidade do Algarve dando lugar a un consorcio hispano-portugués multidisciplinar cuyo trabajo y los resultados del mismo se dan a conocer en este libro.

Para un municipio pesquero como el nuestro se hace imprescindible la incursión del ámbito de la investigación y el desarrollo así como la transferencia tecnológica al sector pesquero para que se exploren nuevos campos que nos ayuden a gestionar mejor nuestro litoral, potenciar y optimizar los recursos marinos y pesqueros, adaptarlos al cambio climático y encontrar líneas de exportación respetuosas con los océanos y los fondos marinos. Este es en definitiva el objetivo de este proyecto, que no es otro que poner al servicio de la pesca el conocimiento, la tecnología y la investigación para hacerla más sostenible e inteligente.

Es por ello que todo este trabajo se ha materializado en el diseño y puesta a punto de vehículos autónomos, tanto aéreos como marinos, que permitan el desarrollo económico y sostenible en ciencias marinas y recursos pesqueros. Y este libro refleja el día a día de esta relación de cooperación KTTSEADRONES cuyo contenido espero que sirva para seguir avanzando en el mismo.

No me queda más que felicitar a los actores de este proyecto y poner en valor su rigor científico y su profesionalidad y volver a expresar mi agradecimiento por haber contado con Isla Cristina para que sea el punto de partida de un proceso que espero tenga continuidad en el tiempo y sea ejemplo para otras ciudades, regiones o países que tengan en la explotación de la pesca y los recursos pesqueros sus principales motores económicos.

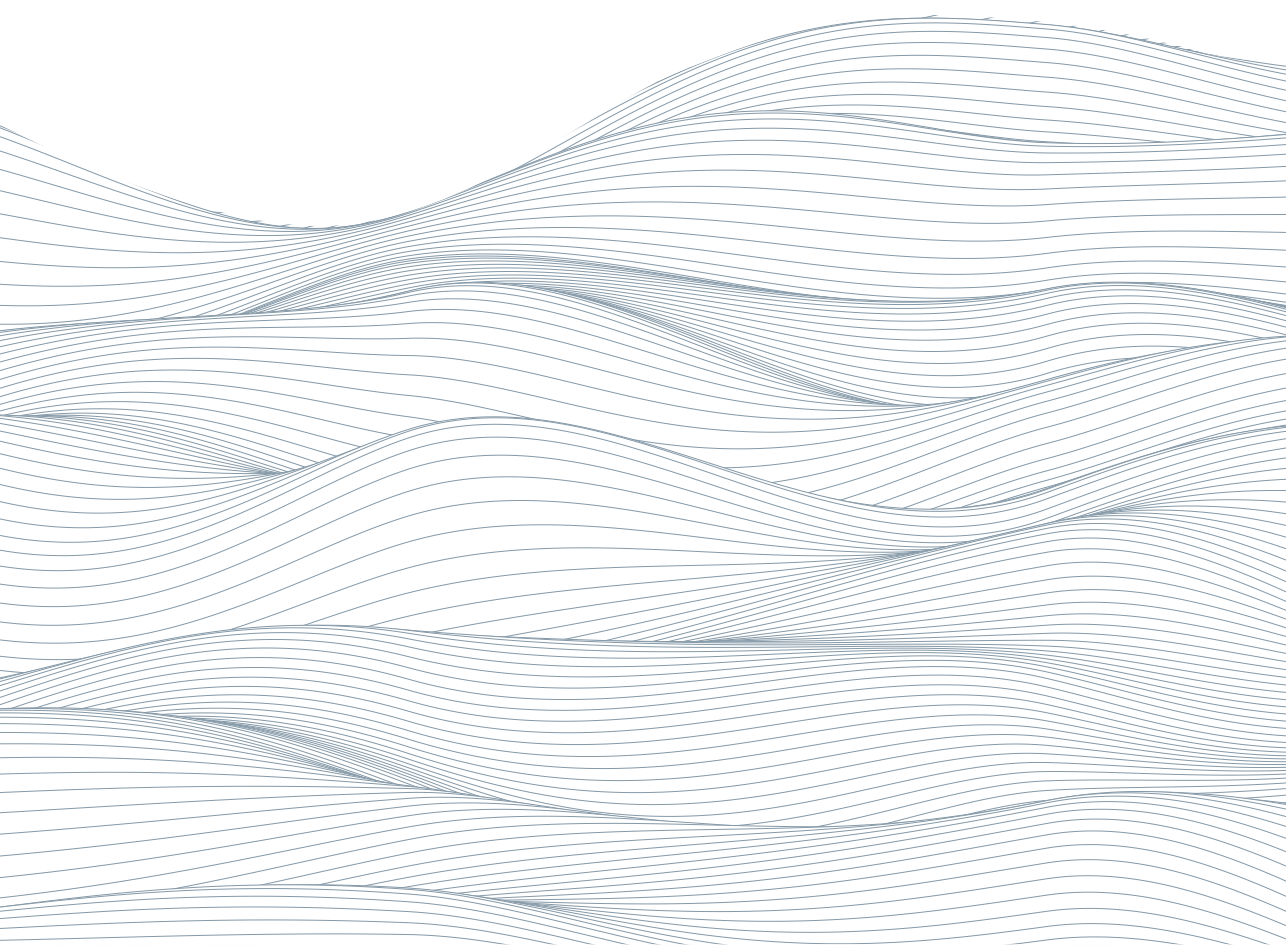




## 02 Prólogo

MARÍA JESÚS MOSQUERA DÍAZ

Vicerrectora de Política Científica y Tecnológica  
**Universidad de Cádiz**







En octubre de 2022, fecha en la que finaliza el proyecto KTTSeaDrones, la Universidad de Cádiz cumple 43 años. Más de cuatro décadas impulsando la investigación marino-marítima del sur de Europa desde el convencimiento de que los océanos no imponen fronteras, antes al contrario, son excelentes vías de comunicación para el intercambio de ideas. Este impulso nos ha permitido liderar desde 2011 el Campus de Excelencia Internacional del Mar CEI-MAR, un campus transfronterizo e internacional promovido por las universidades de tres países y dos continentes que integra a las universidades españolas de Cádiz, Huelva, Málaga, Granada y Almería, a las universidades de Algarve (Portugal) y Abdelmalek Essaâdi (Marruecos), y al que se unen las principales entidades españolas que desarrollan el conocimiento del mar en todas sus facetas en la zona sur de la Península Ibérica, compartiendo un espacio geopolítico, económico, natural e histórico de valor excepcional, el Estrecho de Gibraltar y los dos mares que comunica. Desde su nacimiento, en los genes de esta potente agregación científica, están la generación y transferencia de nuevo conocimiento científico hacia la empresa, el apoyo al desarrollo y la innovación industrial, el progreso económico y la creación de empleo, en definitiva, la mejora de la calidad de vida de la sociedad que puebla sus costas.

Con esta misma vocación, tres de las universidades integrantes del Campus de Excelencia, Huelva, Cádiz y Algarve, junto con el Ayuntamiento de Isla Cristina, se embarcaron en 2019 el proyecto Interreg España-Portugal “Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras”, KTTSeaDrones, cuyo principal objetivo es la creación de conocimiento y transferencia tecnológica sobre el diseño y puesta a punto de vehículos autónomos, tanto aéreos como marinos, para el desarrollo económico y sostenible en ciencias marinas y recursos pesqueros, a través de un equipo hispano-luso multidisciplinar englobando a tecnólogos y científicos. Nuevamente el mar, como puente de unión entre países e instituciones vecinas y amigas.

La importancia de estas nuevas tecnologías ha sido reconocida posteriormente por el Gobierno de España, que en mayo de 2021 y a través del Ministerio de Ciencia e Innovación incluyó entre las 23 líneas estratégicas de los proyectos de I+D+i en colaboración público-privada, del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, y con el número 3, la dedicada

a “Nuevos sistemas de observación, modelización y gestión de ecosistemas marinos.” El objetivo de esta línea es el desarrollo de tecnologías y plataformas para la observación del medio marino, incluyendo tanto mediciones in situ como observaciones de teledetección (sensores, cámaras, sistemas de control, AUV (vehículos submarinos autónomos), USV (vehículos de superficie no tripulados), sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, satélites, etc.), junto con técnicas de análisis de big data y de inteligencia artificial para procesar los datos obtenidos. El argumento de esta línea estratégica se basa en que el aumento de la precisión y la cobertura y resolución espacial proporcionará información valiosa para abordar temas ambientales como la acidificación de los océanos, la pérdida de biodiversidad, el aumento del nivel del mar, la sobreexplotación de la pesca y la degradación de los hábitats costeros o la contaminación, entre muchos otros. Finaliza el documento indicando que las actividades de acuicultura también podrían beneficiarse de estos enfoques.

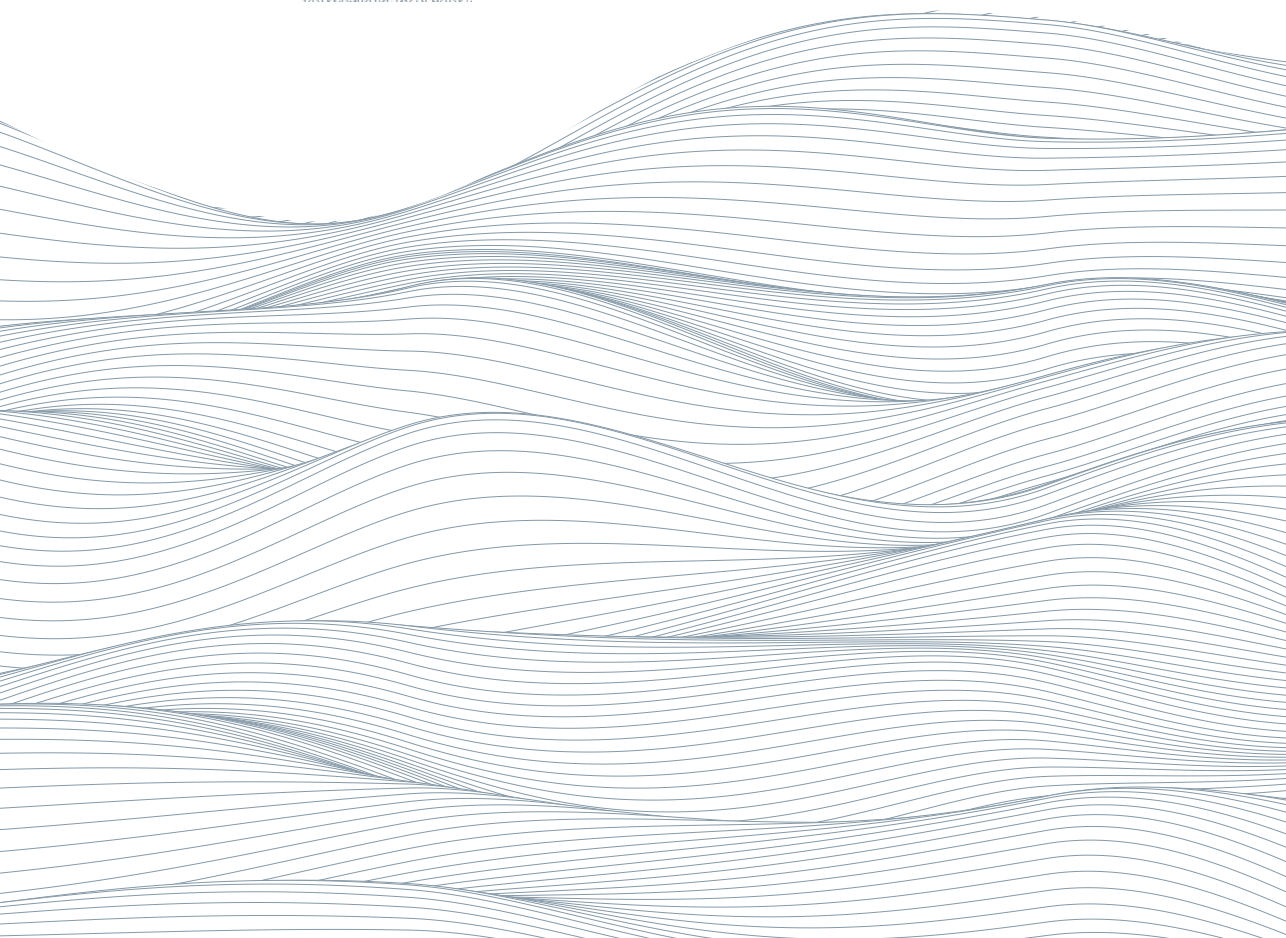
En este libro se recogen solo algunas de las aportaciones que los socios del proyecto KTTSeaDrones han realizado durante estos años en aspectos cruciales sobre el diseño y utilidades de los vehículos no tripulados de investigación marina. En concreto, el equipo de investigación de la Universidad de Cádiz ha centrado sus esfuerzos en los vehículos autónomos de superficie y aéreos, y sus resultados han llevado a un aumento de su fiabilidad, seguridad, capacidades y prestaciones, y a una reducción de los costes de operación, acercando al sector privado unas tecnologías hasta ahora vetadas para la mayoría de las empresas.

## 03 Prólogo

PAULO ÁGUAS

Reitor

**Universidade do Algarve**





Desde a sua criação, a Universidade do Algarve sempre teve um especial interesse pelas atividades de investigação ligadas ao mar. Se, no início, as linhas de investigação eram predominantemente na área da biologia, onde se incluía o estudo das espécies marinhas que habitam a nossa costa, ao longo dos anos as linhas de investigação associadas ao mar têm vindo a aumentar. Áreas como a sustentabilidade das espécies marinhas, ou até a aquacultura, têm produzido bons resultados de investigação, que se têm refletido com naturalidade na qualidade pedagógica dos cursos ministrados na Universidade do Algarve nestas áreas.

Nos anos mais recentes, novas oportunidades de investigação ligadas ao mar têm vindo a surgir, sendo que a tecnologia e as engenharias têm trilhado o seu caminho, aumentando a sua importância em todas as áreas do saber e da sociedade, não sendo exceção a área do mar. Desde as comunicações acústicas submarinas, ao desenvolvimento de novos sensores e sistemas eletrónicos subaquáticos de monitorização, vários têm sido os desenvolvimentos de investigação e de patentes relacionadas com tecnologia ligada ao mar na Universidade do Algarve.

Numa altura em que se vive a quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, com extraordinárias mudanças associadas ao conceito de indústria inteligente, que recorre à utilização da internet e das tecnologias de informação para otimizar processos e melhorar a sua eficiência, as indústrias da pesca e da aquacultura têm vindo a beneficiar com os novos conceitos de Internet das Coisas (IoT - Internet of Things), associados à Inteligência Artificial e à melhoria das tecnologias de informação, comunicação e eletrónica.

É neste contexto que surge o projeto KTTSeadrones, com o intuito de dar resposta a necessidades de investigação em tecnologia para melhorar a pesca e a aquacultura. Com as crescentes preocupações pela sustentabilidade, quer da pesca quer da própria indústria pesqueira, associadas às crescentes necessidades de consumo de peixe por parte das populações, novos desafios são colocados às empresas do setor que, para melhorar os seus lucros, veem como premente melhorar a eficiência na indústria pesqueira, para ultrapassar alguma limitação nas quotas de pesca de algumas espécies. E esta melhoria de eficiência também é necessária na indústria de aquacultura, onde as novas tecnologias de monitorização

remota com IoT permitem revolucionar a forma como se produz peixe e como se gere uma produção de aquacultura.

Para além das inovações tecnológicas trazidas para as indústrias da pesca e aquacultura pelo projeto KTTSeadrones, talvez a grande mais-valia do projeto tenha sido a estreita ligação entre as equipas de investigação das universidades participantes e as empresas do setor que necessitam e irão beneficiar com os resultados do projeto. Pelo grande apoio dado pelas empresas do setor ao projeto KTTSeadrones, foi possível atingir os bons resultados de investigação relatados neste livro. E o desenvolvimento de um setor faz-se é por iniciativas como esta, que estreitam as relações entre a investigação científica de ponta e a sociedade, permitindo tornar acessível às populações as mais recentes inovações tecnológicas.

Um bem-haja a todos os participantes e colaboradores do projeto KTTSeadrones.



## 04 Prólogo

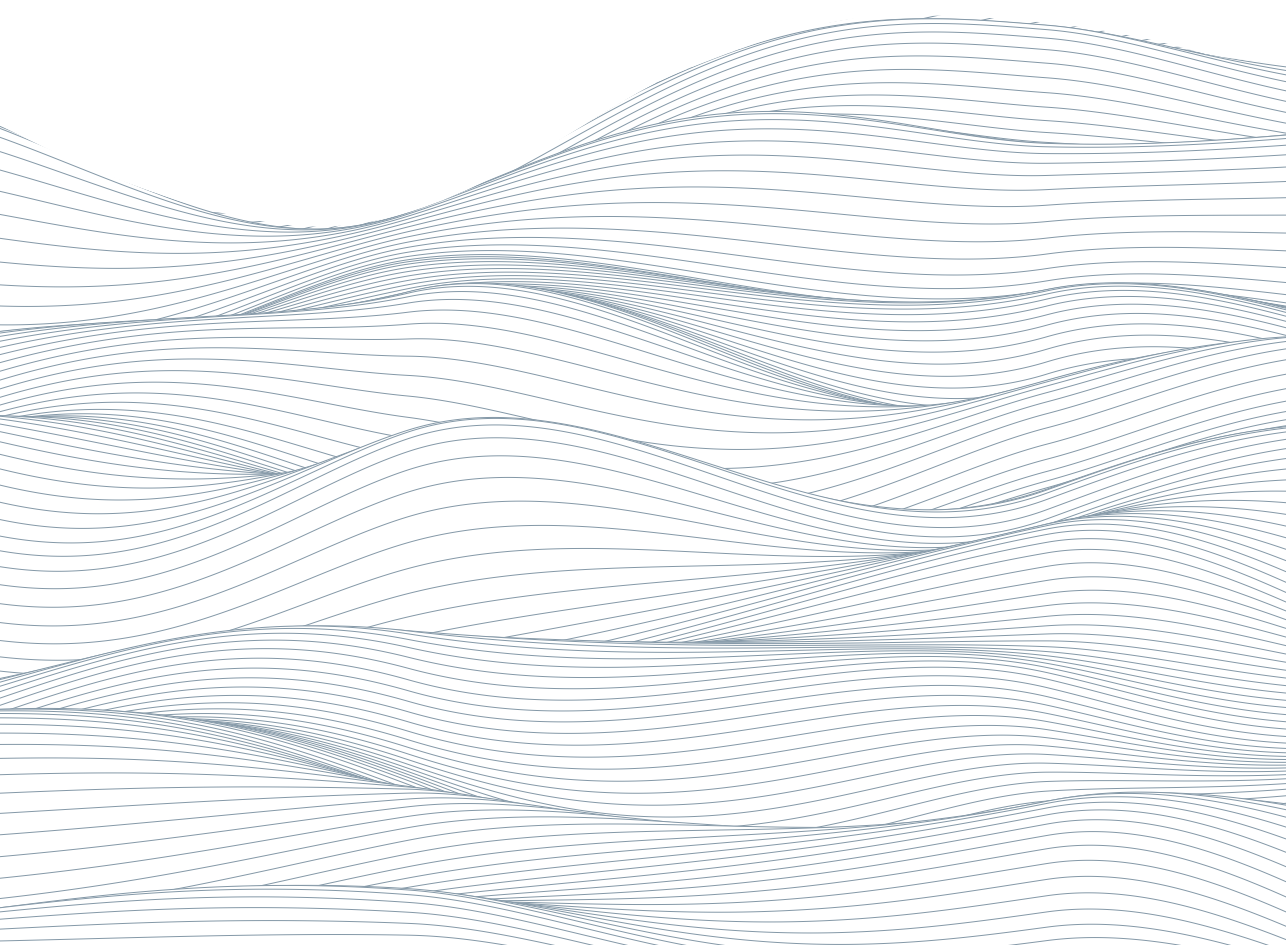
JOSÉ RODRÍGUEZ QUINTERO

Vicerrector de Investigación y Transferencia

**Universidad de Huelva**



Universidad de Huelva





El proyecto 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E, “Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras”, aprobado en la segunda convocatoria del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 y cofinanciado con Fondos FEDER, ha conducido a la cristalización de un nuevo consorcio hispano-portugués integrado por distintas instituciones de diferentes sectores: la Universidad de Huelva, en la coordinación, la Universidad de Cádiz, y el Ayuntamiento de Isla Cristina, por parte española; y la Universidade do Algarve, por parte portuguesa.

Este consorcio hispano-luso multidisciplinar, que reúne tanto a tecnólogos como a científicos de las instituciones participantes, se constituyó con el objeto fundamental de la generación de conocimiento y transferencia tecnológica para el diseño y puesta a punto de vehículos autónomos, tanto aéreos como marinos, que permitan el desarrollo económico y sostenible en ciencias marinas y recursos pesqueros.

Este libro compendia en siete capítulos los resultados finales del proyecto de cooperación KTTSEADRONES obtenidos por los beneficiarios del proyecto. Resultados que permitirán avanzar en el desarrollo de la pesca inteligente y la gestión del litoral; con el fin de optimizar los recursos pesqueros desde el punto de vista de la racionalidad, sostenibilidad, eficiencia energética y optimización financiera y comercial. El rigor, la profesionalidad y la calidad investigadora, tanto de los principales actores del proyecto como de los autores de este compendio, hacen que el mismo resulte de un interés notable e indiscutible, tanto para el tejido empresarial pesquero como para expertos en vehículos autónomos.

Quiero poner el acento, para terminar, en el hecho de que la cooperación transfronteriza hispano-lusa entre instituciones académicas, así como de otros sectores (empresas, centros de investigación, cámaras municipales, ayuntamientos, asociaciones, etc.), ha recibido un importante impulso en los últimos años gracias al Programa de Cooperación Transfronteriza España-Portugal 2014-2020 (POCTEP). La Universidad de Huelva, como no puede ser de otra manera, reconoce y agradece esta iniciativa y de sus fructíferos resultados, algunos de los cuales son el objeto del presente libro.

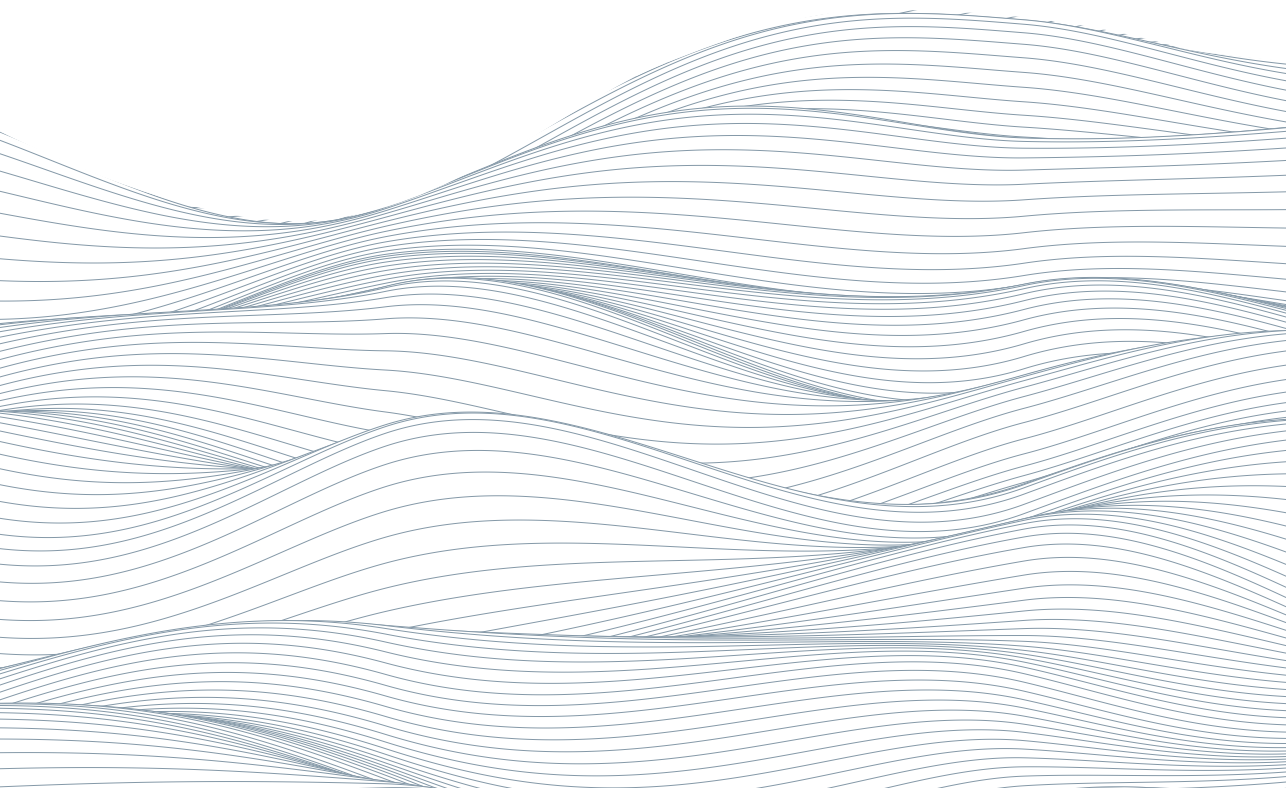


# 01.

## El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales

M. Bethencourt

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Campus Universitario de Puerto Real, Universidad de Cádiz, e-mail: [manuel.bethencourt@uca.es](mailto:manuel.bethencourt@uca.es)



## Sumario:

1. Introducción
2. Definición de vehículo no tripulado
3. Clasificación de los vehículos marinos no tripulados  
Utilidades, ventajas y desventajas
4. Vehículos de superficie no tripulados
  - 4.1. Generalidades
  - 4.2. El casco y los elementos estructurales auxiliares
  - 4.3. Sistema de propulsión y potencia
  - 4.4. Sistema de Guiado, Control y Navegación
5. Sensores a bordo en un USV
6. Régimen jurídico de los vehículos marinos no tripulados
  - 6.1. Protocolo administrativo
  - 6.2. Diagrama de flujo en un ejemplo real
7. Bibliografía citada

## Resumen

Este capítulo se constituye como una revisión ampliada de la clasificación de los vehículos marinos no tripulados, sus utilidades, ventajas y desventajas y sus nuevas aplicaciones en el ámbito de la investigación y la gestión de las aguas tanto marinas como continentales, tratados de forma resumida en el informe técnico *'Informe sobre diseño y utilidades de los USV y AUV'* del Proyecto KTTSeaDrones (0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) del Programa INTERREG VA España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. Se hace especial hincapié en los vehículos autónomos de superficie, más conocidos por sus siglas en inglés USV (*Unmanned Surface Vehicle*) o ASC (*Autonomous Surface Craft*), plataforma elegida por la Universidad de Cádiz en el proyecto KKTSeaDrones para uno de sus dos subproyectos. El objetivo de esta información es dar una visión general sobre las diferentes opciones que administraciones y empresas del ámbito de la investigación, los recursos y la gestión marino-marítima pueden encontrar en estas nuevas tecnologías, mostrando las utilidades, ventajas e inconvenientes de unas frente a otras.

## Resumo

Este capítulo é uma revisão alargada da classificação dos veículos marítimos não tripulados, das suas utilidades, vantagens e desvantagens e das suas novas aplicações no domínio da investigação e gestão das águas marinhas e interiores, resumida no relatório técnico *"Relatório sobre a concepção e utilidades dos USV e AUV"* do Projecto KTTSeaDrones (0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) do Programa INTERREG VA Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020. É dada especial ênfase aos veículos de superfície autónomos, mais conhecidos pela sua sigla USV (*Unmanned Surface Vehicle*) ou ASC (*Autonomous Surface Craft*), a plataforma escolhida pela Universidade de Cádiz no projecto KKTSeaDrones para um dos seus dois subprojectos. O objectivo desta informação é dar uma visão geral das diferentes opções que as administrações e empresas no domínio da investigação, recursos e gestão marítima podem encontrar nestas novas tecnologias, mostrando as utilidades, vantagens e desvantagens de algumas delas em comparação com outras.

## 1. Introducción:

### El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales

En 2018, las universidades españolas de Huelva y Cádiz, la universidad portuguesa de Algarve, junto con el Ayuntamiento onubense de Isla Cristina, se embarcan en la preparación de un proyecto que a la postre acabaría conformando el consorcio KTTSeaDrones (0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) del Programa INTERREG VA España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. Existen muchos lazos de unión entre estas administraciones, pero sin duda el más singular es el geográfico, que ha conformado muchas otras similitudes culturales, sociales y económicas en sus áreas de influencia, la región del Algarve portugués y las provincias andaluzas de Huelva y Cádiz. Todas ellas desarrollan su actividad en el Golfo de Cádiz, un entrante del Océano Atlántico en la costa del Suroeste de la Península Ibérica, con cerca de 500 kilómetros de línea de litoral entre Cabo de San Vicente (Portugal), y Tarifa (España), Figura 1. Estas aguas atlánticas reciben a su vez importantes aportes de aguas continentales a través de sus ríos Guadiana, Piedras, Odiel, Guadalquivir y Guadalete. En esta costa se ubican poblaciones como Albufeira, Lagoa, Lagos, Loulé, Faro, Olhão, Portimão, Silves, Tavira, Vila Real de Santo António y Quarteira (Portugal), Isla Cristina, Huelva, Moguer, Punta Umbría, Sanlúcar de Barrameda, Chipiona, Rota, Puerto de Santa María, Puerto Real, San Fernando, Cádiz, Conil, Barbate y Tarifa (España), con grandes extensiones de reservas naturales con distinto grado de protección, como el Parque Natural da Ria Formosa, Reserva do Sapal de Castro Marim (Potugal), Paraje Marismas Isla Cristina, Paraje Natural del Río Piedras y Flecha de El Rompido, Paraje Natural Marismas del Odiel, Paraje Natural Enebrales de Punta Umbría, Parque Nacional y Natural de Doñana, Parque Natural de la Bahía de Cádiz, Parque Natural de la Breña y Marismas del Barbate, o el Parque Natural del Estrecho de Gibraltar.

La economía de esta costa, con cerca de 2 millones de residentes permanentes, está dominada por el sector terciario, principalmente vinculada a la actividad turística de costa. El sector secundario tiene un peso relativo

mayor que el de otras provincias portuguesas o españolas cercanas, debido a la presencia de polos químicos, refinerías o astilleros, todos ellos situados en el litoral. Entre las actividades del sector primario destaca, junto con la agricultura, la pesca, uno de sus tradicionales y principales medios de vida, con algunas de las más importantes flotas pesqueras de España y Portugal. En su límite sur, el Golfo de Cádiz da comienzo a uno de los enclaves geográficos y geoestratégicos más importantes a nivel mundial, el Estrecho de Gibraltar, que conecta dos mares que bañan las aguas de dos continentes. Este mismo Golfo de Cádiz ha condicionado decisivamente la singularidad histórica y cultural de este territorio, y desde los primeros asentamientos humanos, las distintas huellas patrimoniales que permanecen en sus costas y en sus fondos marinos evidencian la confluencia de civilizaciones que facilitó el angosto Estrecho de Gibraltar, o las rutas comerciales hacia América, África y Asia que posibilitó el Océano Atlántico.



**Figura 1.** Situación del Golfo de Cádiz al suroeste de la Península Ibérica, y localización de los socios del proyecto KTTSeaDrones. De izquierda a derecha: Universidad de Algarve, Ayuntamiento de Isla Cristina, Universidad de Huelva y Universidad de Cádiz. Elaborado sobre imagen Google Earth

El pasado y el futuro de este territorio se vinculan ineludiblemente a su entorno marino. Buena parte de la actividad económica de sus agentes sociales responde a las oportunidades y a los límites que supone este entorno, que también condiciona las singularidades científicas, técnicas e industriales que en él se desarrollan, con un elevado grado de especialización de sus universidades en los estudios y la investigación marinas y un tejido empresarial con intensa vinculación al mar, a la navegación y al turismo costero.



No en vano, las universidades de Cádiz, Huelva y Algarve están vinculadas a través del Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEI-MAR), al que también pertenecen otras instituciones localizadas en esta misma costa: el Instituto Hidrográfico de la Marina, el Real Observatorio de la Armada, el Centro Andaluz de Arqueología Subacuática, el Instituto Investigaciones Marinas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el Instituto Español de Oceanografía (sede Cádiz) y el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (centro El Toruño).

Este escenario único, singularizado por sus valores históricos, ambientales, estratégicos, paisajísticos, culturales, climáticos, económicos y sociales, está sometido a una elevada presión por parte de todos los actores que en él conviven, en un difícil equilibrio entre el aprovechamiento de sus recursos naturales, la conservación de los mismos y el desarrollo de la sociedad que ocupa el territorio. En este proceso, el estudio y comprensión del medio marino para un aprovechamiento sostenible del mismo es a todas luces imprescindible.

Para lograr un correcto equilibrio de intereses, se hace necesaria la investigación, lo más eficiente y sostenible posible, de los distintos parámetros físicos, químicos, biológicos y geológicos del entorno marino, o las huellas culturales que el hombre ha dejado en el mismo. Con la llegada de la revolución digital, que ha generalizado el uso de circuitos electrónicos y tecnología TTL, los vehículos no tripulados con distintos grados de autonomía, marinos o submarinos, y más recientemente los aéreos, han comenzado a cobrar un papel cada vez más relevante en la exploración del medio marino y las costas, ofreciendo generalmente mejor información, a un coste más reducido y ausentes de riesgos para los operarios. Estas nuevas plataformas y las observaciones que son capaces de acometer se están convirtiendo en actores necesarios para documentar el estado, la variabilidad y las condiciones cambiantes de los océanos bajo el impacto del cambio climático y otras presiones antropogénicas, así como el efecto de tales cambios en los ecosistemas o el patrimonio cultural que allí permanece. Este conocimiento es, según la Agencia Estatal de Investigación (AEI, 2021), decisivo para entender, pronosticar y, finalmente, atenuar y adaptarse a los impactos adversos, presentes y futuros. Con este sentido nace el proyecto KTTSeaDrones, que desde su concesión en 2019 hasta su finalización en 2022, ha tenido entre sus objetivos el diseño de tecnologías de sensores adaptados a vehículos aéreos y marinos para el desarrollo del sector pesquero-acuícola y la gestión del litoral, el aumento de la competitividad y sostenibilidad en estos sectores a través del uso de nuevas tecnologías, y la introducción de iniciativas innovadoras basadas en estas nuevas soluciones para crear nuevos nichos de empleo especializado. El proyecto completo se puede consultar en <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones>.

## 2. Definición de vehículo no tripulado

Existe una cierta confusión entre los conceptos de vehículo no tripulado (UV, del inglés *uncrewed vehicle* o *unmanned vehicle*) y de vehículo autónomo (AV, del inglés *autonomous vehicle*), englobando el primero al segundo. En el ámbito que nos compete, el marino (entendido este como el conjunto de aguas continentales y oceánicas), un vehículo no tripulado es un vehículo sin una persona a bordo para pilotarlo. Los vehículos sin tripulación pueden ser tanto vehículos controlados remotamente o guiados a distancia, como vehículos autónomos, capaces de registrar su entorno y navegar por sí mismos. Por regla general, en estos últimos existe la posibilidad de recuperar el control en caso de necesidades y pasar a ser operados a distancia.

En los subproyectos de la Universidad de Cádiz dentro del Proyecto KTTSeaDrones se seleccionaron vehículos no tripulados que pueden operar sobre la superficie marina, tanto de forma autónoma como controlada: por un lado, vehículos de superficie no tripulados, y por otro, vehículos aéreos no tripulados.

Si bien no existe una definición oficial de vehículo autónomo podemos adaptar la que expresa la Subdirección General de Gestión de la Movilidad del Ministerio del Interior del Gobierno de España en su Instrucción 15/V-113 (SGGMMI, (2015)). Así, nuestra definición de un vehículo autónomo marino sería todo vehículo con capacidad motriz bajo o sobre la superficie del agua, equipado con tecnología que permite su manejo o pilotaje sin precisar la forma activa de control o supervisión de un operador, tanto si dicha tecnología autónoma estuviera activada o desactivada, de forma permanente o temporal. En esta definición vamos a incluir a los vehículos aéreos no tripulados, que pueden operar sobre masas de agua extensas y que son objetivo del entregable Capítulo 2 de este documento. Pese a que por motivos obvios no se consideran vehículos marinos, sí que contribuyen y muy notablemente a la investigación de nuestras aguas, oceánicas o continentales, operando en el medio aéreo.

Los vehículos autónomos deben de ser capaces de operar en dos modos:

- Modo autónomo: modalidad de pilotaje consistente en el manejo del vehículo autónomo sin el control activo de un operador cuando su tecnología autónoma está activada.
- Modo convencional: modalidad de pilotaje de un vehículo autónomo en la que la tecnología autónoma está desactivada y su manejo debe efectuarse mediante el control activo de un operador.

Los niveles de automatización de un vehículo pueden variar. Como en el caso de la definición, se pueden adoptar los niveles que se presentan en la Instrucción 15/V-113 (Tabla 1).

La definición de vehículos autónomos abarca desde equipos de tamaño y peso muy reducido, a grandes buques de muchas toneladas, pero todos ellos pueden navegar sin intervención humana y controlados por programas de inteligencia artificial, que son los que gestionan y resuelven a través de algoritmos los problemas que pueden surgir durante la navegación.

**Tabla 1.** Niveles de automatización según Instrucción 15/V-113

NIVEL	Denominación	Definición	Tareas de pilotaje		Navegación en los 360º	Control del entorno	Recuperación de las tareas de pilotaje en caso de contingencia	Tareas de pilotaje realizadas por el sistema
			Operador	Sistema				
<b>0</b>	Sin automatización	El operador realiza continuamente todas las tareas asociadas al pilotaje, incluso cuando son mejoradas a través de algún aviso o la intervención de sistemas.	El operador realiza siempre la tarea de pilotaje dinámico	N/A	Operador	Operador	Operador	N/A
<b>1</b>	Pilotaje asistido	El sistema ayuda al pilotaje desarrollando una tarea específica de pilotaje usando la información del entorno, mientras que el piloto realiza el resto de las tareas de pilotaje.	Supervisión de las tareas de pilotaje dinámico y el entorno.	El sistema realiza el pilotaje dinámico que no esté realizando el operador.	Sistema	Operador	Operador	Algunas
<b>2</b>	Pilotaje parcialmente automatizado	El sistema de ayuda al pilotaje desarrolla el pilotaje dinámico utilizando la información del entorno del vehículo, mientras que el piloto realiza el resto de las tareas de pilotaje.	Supervisión de las tareas de pilotaje dinámico y el entorno.	Pilotaje dinámico en un caso de uso definido.	Sistema	Operador	Operador	Algunas
<b>3</b>	Pilotaje automatizado condicionado	El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje con la expectativa de que el operador responda adecuadamente a la petición de intervención por parte de este.	No es necesaria la supervisión constante del pilotaje automatizado pero siempre debe estar en una posición adecuada para reanudar el control.	Pilotaje dinámico en un caso de uso definido. Reconoce sus límites de rendimiento y pide al operador reanudar el pilotaje dinámico con margen de tiempo.	Sistema	Sistema	Operador	Algunas
<b>4</b>	Pilotaje altamente automatizado	El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje, incluso si el operador no responde adecuadamente a la petición de intervención por parte de este.	El operador no es requerido durante el caso de uso.	Pilotaje dinámico en todas las situaciones de un caso de uso definido.	Sistema	Sistema	Sistema	Algunas
<b>5</b>	Pilotaje plenamente automatizado	El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje bajo todas las circunstancias del medio.	N/A	Pilotaje dinámico en todas las situaciones y durante toda la prueba. No requiere operador.	Sistema	Sistema	Sistema	Todas

La Sociedad de Clasificación Lloyd's Register publicó en 2017 el código *Unmanned Marine Systems Code*, que establece pautas para la construcción, diseño y mantenimiento de sistemas autónomos marinos, definiendo seis niveles de autonomía (AL, Autonomy Levels) (LLR, 2017).

- **AL 0:** Gobierno manual. El buque navega controlado por un operador que puede estar a bordo o puede controlarlo a distancia.
- **AL 1:** Soporte para decisiones a bordo. El buque se maneja automáticamente con diferentes parámetros y programas. La velocidad y el rumbo son medidos por sensores que se encuentran a bordo. El operador inserta la ruta y la velocidad en forma de waypoint que se pueden modificar.
- **AL 2:** Soporte para decisiones a bordo o en tierra. Un sistema externo es capaz de introducir la ruta, pero el operador puede cambiar los parámetros de rumbo y velocidad si lo necesitara
- **AL 3:** Ejecución con operador humano que aprueba. La información se basa en lo que captan los sensores del buque. El operador debe aprobar las decisiones antes de que sean puestas en marcha.
- **AL 4:** Ejecución con operador humano que podría intervenir. Las decisiones sobre acciones operativas y de navegación son calculadas por el sistema que ejecuta lo que se haya aprobado por el operador. El operador puede estar en tierra e intervenir si es necesario.
- **AL 5:** Autonomía parcial. El sistema calcula y decide todo lo relativo a la navegación y la operación. Los riesgos son resueltos de acuerdo a cada situación. Los sensores captan información y el sistema interpreta la situación, calcula las acciones pertinentes, y las lleva a cabo, pero en caso de duda sobre la interpretación de la situación, el operador, que puede estar en tierra, debe actuar. El sistema no interacciona con él si tiene capacidad para resolver dicha situación.
- **AL 6:** Autonomía total. Todas las decisiones sobre navegación y operación son tomadas por el sistema. Este analiza las consecuencias y los riesgos y resuelve en base a los cambios de situación detectados por los sensores. El operador que está en tierra, solo interviene si el sistema no puede estar seguro de la solución.

Lloyd's también ha establecido distintos niveles de tolerancia de fallos:

- **FT 5:** Fallo operativo: ningún fallo único impide la navegación, el monitoreo seguro y la propulsión normal completa. Todas las funciones principales son redundantes, dobles o triples. El diagnóstico y la gestión de fallos son autónomos. Puede tolerar fallos sin la intervención del operador.
- **FT 4:** Fallo tolerante: es posible manejar todos los fallos individuales sin la intervención del operador, pero se permite reduciendo la capacidad. Las funciones principales son redundantes. Todas las funciones son toleran-

tes a fallos individuales. El diagnóstico de fallos incorporado y la gestión de fallos aseguran un manejo autónomo de los mismos.

- **FT 3:** Fallo tolerante: es posible manejar todos los fallos individuales a través de la asistencia del operador. Se permite una reducción de la capacidad en caso de fallos. Las funciones principales son redundantes. Todas las funciones que son necesarias para ejecutar la redistribución son tolerantes a fallos individuales. El diagnóstico de fallos incorporado y el control remoto permiten el manejo de fallas a través de un operador a bordo o en tierra.

- **FT 2:** La propulsión y la dirección son redundantes. Otros subsistemas no son necesariamente redundantes, pero se pueden volver a acoplar para manejar fallos. El reacoplamiento para el manejo de fallos se realiza a bordo o remotamente desde tierra.

- **FT 1:** La propulsión y la dirección son redundantes. Otros subsistemas no son necesariamente redundantes. El diagnóstico de fallos asegura la información sobre las medidas necesarias para el manejar dichos de fallos. El manejo lo realizan personas a bordo o en tierra. Redundancia en funciones de propulsión y navegación, pero no en otros sistemas auxiliares.

- **FT 0:** Los sistemas no son tolerantes a fallos. En caso de fallos, el reenganche / reemplazo debe ser realizado por personal a bordo. No hay redundancia en ningún sistema.

La Sociedad de Clasificación Bureau Veritas también publicó 2017 el código *Guidelines for Autonomous Shipping*, similar al anterior, con la diferencia de que se divide en cuatro niveles dependiendo de la categoría del buque (BV, 2017).

- **0:** buque convencional que navega controlado manualmente. El operador está a bordo.

- **1:** buque inteligente con soporte para acciones y decisiones a bordo. El tripulante es el que ordena y dirige las operaciones.

- **2:** buque autónomo. El tripulante delega en el sistema, pero debe aceptar las decisiones antes de que éstas se lleven a cabo.

- **3:** buque autónomo: El tripulante supervisa el sistema, pero no debe aceptar las decisiones antes de que se ejecuten. No obstante, se le informa de todas las acciones y decisiones que se vayan a tomar.

- **4:** buque totalmente autónomo. Evaluará la situación y llevará a cabo las acciones que considere oportunas en cada caso. El sistema solo solicitará y esperará confirmación en caso de emergencia.

En el punto 6. *Régimen jurídico de los vehículos marinos no tripulados* se darán algunas pinceladas sobre la dificultad de casar estos nuevos vehículos en las normativas internacionales e internacionales. Por otro lado, las

compañías de seguros se muestran escépticas sobre la idea de los vehículos no tripulados. En el ámbito del transporte marítimo se cree que el concepto tardará décadas en volverse operativo y legalmente aceptable (Van Hooydonk, 2014). Para vehículos de investigación, normalmente de pequeña eslora, el vacío jurídico también es evidente.

### 3. Clasificación de los vehículos marinos no tripulados. Utilidades, ventajas y desventajas

Los vehículos no tripulados que operan sobre o bajo la superficie del agua (marina o continental) se pueden clasificar de diversas maneras, por el tipo de misión a realizar, por su sistema de propulsión, siendo la más habitual la que los distribuye en función de su nivel de autonomía en una serie de categorías que es necesario aclarar:

**1) Vehículos submarinos operados remotamente (ROV, del inglés de *Remotely Operated Vehicle*, Figura 2).** Son vehículos no tripulados controlados remotamente o guiados a distancia. Están conectados a la superficie mediante un cordón umbilical o un conjunto de cables. Están especialmente diseñados para operaciones de inspección y manipulación en la columna de agua, y son muy maniobrables. El propio umbilical se convierte en la principal ventaja e inconveniente del vehículo: permite transmitir órdenes al vehículo en cada momento, el intercambio de datos es en tiempo real y la alimentación eléctrica desde superficie al vehículo puede ser indefinida. Pero por otro lado limita sus movimientos y la distancia que puede separarse del punto de despliegue. Van equipados como mínimo con una cámara de vídeo, siendo habitual incorporarle también un brazo manipulador.



**Figura 2.** ROV SeaBotix modelo vLBV300, perteneciente a la Sección de Vehículos Marinos no Tripulados de la Universidad de Cádiz (<https://dron.uca.es/vehiculos-marinos/>)

**2) Vehículos submarinos autónomos (AUV, del inglés de *Autonomous Underwater Vehicle*, Figura 3).** Son vehículos no tripulados y autónomos. Poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones preprogramadas en la columna de agua sin la supervisión constante de un operador. Contienen además su propia fuente de energía, basada generalmente en baterías recargables, que no esclaviza al vehículo en torno a su punto de despliegue. Están especialmente diseñados para la observación y toma de datos ambientales, pero con los avances en la electrónica y las fuentes de alimentación de alto rendimiento, el abanico de misiones capaces de desarrollar está en continua evolución. La ausencia de umbilical convierte sus ventajas en desventajas, y viceversa.



**Figura 3.** AUV RTSYS modelo COMET 300, perteneciente a la Sección de Vehículos Marinos no Tripulados de la Universidad de Cádiz (<https://dron.uca.es/vehiculos-marinos/>)

Un caso particular de AUV que no disponen de impulsor de hélice se denominan **planeadores acuáticos o *glider***, diseñados para deslizarse desde la superficie del mar hasta una profundidad programada, variando su flotabilidad y cabeceo. La base VIMAS (Vehículos, Instrumentos y Máquinas Submarinas) de la Plataforma Oceánica de Canarias dispone de una flota de Glider de última generación (<https://www.plocan.eu/vimas/>).

Algunas empresas comercializan **vehículos submarinos autónomos para intervenciones (I-AUV, del inglés *Intervention Autonomous Underwater Vehicle*)**, similares a los AUV pero además de realizar misiones de observación como estos, pueden realizar tareas de manipulación similares a las que realizan los ROV cuando se les conecta a un umbilical.

Estos tipos de vehículos (ROV, AUV, I-AUV y glider) se encuentran dentro de la categoría de **vehículos submarinos no tripulados (UUV, del inglés *Unmanned Underwater Vehicles*)**, cuyo nexo es la capacidad de operar bajo la superficie del agua sin un ocupante en su interior a los mandos, en contraposición con los **vehículos submarinos tripulados (MUV, del inglés *Manned Underwater Vehicles*)**, que incluye desde los

torpedos unipersonales (**DPV**, del inglés *Deep Propulsion System*), a los más sofisticados batiscafos, todos ellos fuera de la temática de este capítulo.

**3) Vehículos de superficie no tripulados** (conocidos por sus siglas en inglés **USV**, *Unmanned Surface Vehicle* o **ASC**, *Autonomous Surface Craft*, y en algunos casos *Autonomous Surface Vehicle*, **ASV**, Figura 4). Son vehículos no tripulados concebidos para operar de forma autónoma, si bien durante parte de la misión o en caso de necesidad, se opera de forma controlada a distancia. Su concepción es diferente a la de los anteriores, dado que el vehículo no opera bajo la superficie de los mares o lagos, lo que a su vez le permite una localización más precisa, una comunicación inmediata con el operador, y la transmisión de datos a tiempo real (descartada para AUV y I-AUV) sin la necesidad de un umbilical que limite sus operaciones (como en el caso de los ROV). Pueden operar de forma autónoma una vez programada la misión o ser controlados de forma remota por un operador localizado en tierra, abordado de otra embarcación o vía satélite. Es el tipo de vehículo elegido en uno de los dos subproyectos de la Universidad de Cádiz, y a los mismos dedicaremos un apartado íntegro, 4. *Vehículos de superficie no tripulados*.



**Figura 4.** USV Maritime Robotics modelo Otter Pro, perteneciente a la Sección de Vehículos Marinos no Tripulados de la Universidad de Cádiz (<https://dron.uca.es/vehiculos-marinos/>)

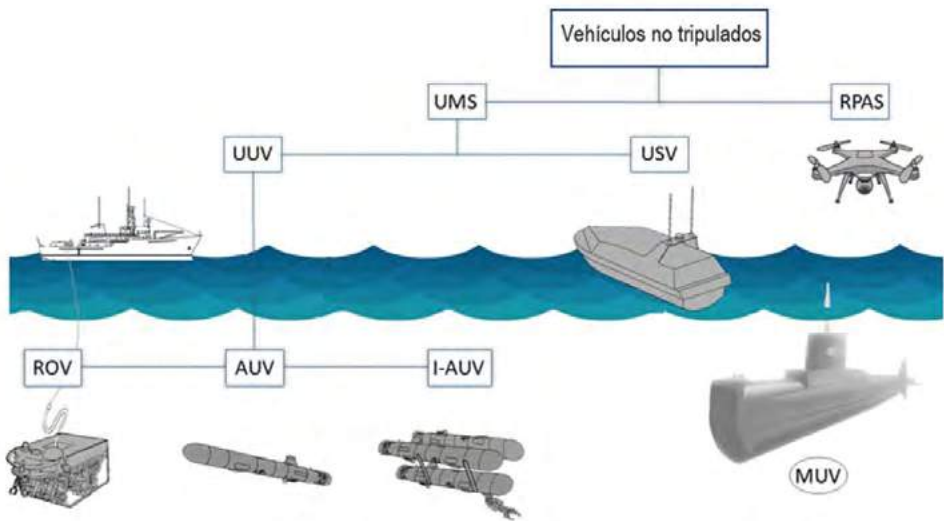
Finalmente, tanto los UUV (ROV, AUV, I-AUV y glider) como los USV pueden ser agrupados en la categoría de vehículos marítimos no tripulados, o **UMS** (*Unmanned Maritime System*), para diferenciarlos de los vehículos aéreos no tripulados (**RPAS**, *Remotely Piloted Aircraft Systems* o **UAV**, *Unmanned Aerial Vehicles*, Figura 5) comúnmente conocidos como “drones”, que también pueden realizar diferentes misiones sobre grandes masas de agua. Como los USV, se trata de vehículos no tripulados concebidos para operar de forma autónoma, si bien se pueden operar de forma controlada a distancia, por necesidades de la misión o por algún escenario de riesgo. Estos vehículos merecen una mención aparte en el Capítulo 2 de este libro.





**Figura 5.** RPAS DJI modelo Matrice 300 RTK, perteneciente a la Sección de Vehículos Aéreos no Tripulados, Servicio de Drones, de la Universidad de Cádiz (<https://dron.uca.es/vehiculos-aereos/>)

Existen otras formas de categorizar este tipo de vehículos, siendo la más común la aquí presentada y resumida en la Figura 6. Igualmente, cada una de estas categorías puede subdividirse en otras tantas, en función de la tecnología incorporada, las misiones encomendadas, el tamaño del vehículo, etc. Existen además vehículos que, valga la redundancia, se encuentran entre dos aguas, como los híbridos ROV/AUV ya comercializados que pueden operar de forma remota o autónoma según la misión a cubrir, o más recientemente los RPAS con capacidad sumergirse (en fase experimental).



**Figura 6.** Clasificación de los vehículos de investigación marina no tripulados (Elaboración propia)

La llegada al mercado de equipos de navegación más efectivos y asequibles, que incluyen sistemas de posicionamiento global (GPS) y unidades de medición inercial (IMU), así como sistemas de comunicación inalámbricos más potentes, han propiciado una serie de ventajas tecnológicas para el desarrollo de estos vehículos y de sus aplicaciones hasta hace pocos años impensables (Manley, 2008). Hoy en día los UMS pueden desarrollarse para una amplia gama de aplicaciones potenciales de una manera rentable, relacionadas con la investigación científica, misiones ambientales, exploración de recursos oceánicos, usos militares y otras aplicaciones. En la Tabla 2 se enumeran solo algunas de ellas.

**Tabla 2.** Aplicaciones potenciales de los UMS (adaptada y ampliada de Liu et al., 2016)

<p><b>Investigación marina:</b> Levantamientos batimétricos (Huvenne et al., 2018); estudios de procesos biológicos oceánicos, migración y cambios en ecosistemas marinos (Patel, 2006); investigación de actividad oceánicas; trabajo cooperativo entre vehículos aéreos, terrestres, acuáticos o subacuáticos (Majohr y Buch, 2006; Jung et al., 2017); empleo como plataformas experimentales con el fin de probar diseños de cascos, equipos de comunicación, sensores, sistemas de propulsión, esquemas de control, etc. (Vaneck et al., 1996; Breivik, 2010); prospección y levantamiento de yacimientos arqueológicos subacuáticos (Roman y Mather, 2010), entre otros.</p>
<p><b>Control medioambiental:</b> Programas de monitorización, muestreos y evaluación de impacto ambiental, mediciones de contaminación y procedimientos de limpieza (Caccia et al., 2005; Naeem et al., 2008; Rasal, 2013; Svec et al., 2014); evaluación de desastres (como tsunamis, huracanes, erupciones volcánicas submarinas); ayuda a la predicción y gestión, y la respuesta de emergencia (Murphy et al., 2008), entre otros.</p>
<p><b>Recursos marinos:</b> Exploraciones de petróleo, gas y minerales (Roberts y Sutton, 2006, Pastore y Djapid, 2010); apoyo a plataformas offshore/instalación y mantenimiento de instalaciones, control de obra (Bertram, 2008; Breivik et al., 2008); evaluación de recursos pesqueros y litorales (Caccia et al., 2007; Karimanzira et al., 2014; Wynn et al., 2014), entre otros.</p>
<p><b>Usos de seguridad, rescate y transporte:</b> Vigilancia, reconocimiento y patrullaje de puertos, puertos y costas (Kucik, 2004; Murphy et al., 2008; Breivik et al., 2008; Svec y Gupta, 2012); búsqueda y rescate (Roberts y Sutton, 2006, Murphy et al., 2008); plataformas para drones (Roberts y Sutton, 2006); transporte (Kiencke et al., 2006); redes de comunicación móvil (Caccia et al., 2008), entre otros.</p>

Los UMS pueden competir con otros sistemas tripulados como barcos y aviones, o no tripulados como satélites y plataformas flotantes, en algunas aplicaciones específicas (Tabla 3).

**Tabla 3.** Comparación del rendimiento de UMS frente a otros vehículos (adaptada de Liu et al., 2016)

Atributos	Plataformas flotantes	Satélites	Barcos tripulados	RPAS	Aviones tripulados
Resistencia	⊗	⊗	⊙	⊕	⊕
Capacidad de carga	⊙	⊕	⊙	⊕	⊙
Coste	⊗	⊕	⊙	⊙	⊙
Maniobrabilidad	⊕	⊕	⊕	⊗	⊕
Capacidad de despliegue	⊕	⊕	⊕	⊗	⊕
Requisitos de autonomía	⊕	⊕	⊕	⊙	⊕

⊕ Clara ventaja del UMS

⊙ Similar

⊗ Clara desventaja del UMS

A estas nuevas tecnologías se unen además una serie de ventajas innatas a este tipo de vehículos: (1) los UMS pueden llegar a realizar misiones más largas y comprometidas que los vehículos tripulados; (2) los costes de mantenimiento son más bajos y la seguridad del personal operador es mucho mayor ya que no hay tripulación a bordo; (3) el bajo peso y las dimensiones compactas de los UMS les otorgan mayor maniobrabilidad y capacidad de despliegue en zonas de difícil acceso, como aguas poco profundas o constreñidas geográficamente, áreas ribereñas y costeras, donde los vehículos más grandes no pueden operar de manera efectiva; (4) según el caso, los UMS también pueden incluir una mayor capacidad de carga potencial (aumentando su eslora y motorización) y pueden realizar estudios allí donde no llegan las aplicaciones de otros vehículos como aeronaves, RPAS o satélites.

## 4. Vehículos de superficie no tripulados

### 4.1. Generalidades

De los diferentes UMS presentados en el apartado anterior, los RPAS y USV fueron los seleccionados por la Universidad de Cádiz en el Proyecto KTTSEADRONES. A los RPAS se le dedica el siguiente capítulo. Pese a sus innegables diferencias, ambos tipos de vehículos presentan similitudes que los diferencian de otros UMS. Al operar sobre la superficie del agua, pueden geolocalizarse con absoluta precisión y transmitir datos en tiempo real, siendo posible tomar el control remoto de su navegación en cualquier momento, al menos mientras no se supere el horizonte radio.

Frente al resto de los vehículos no tripulados, los USV se caracterizan por ser capaces de explotar simultáneamente el medio subacuático, el de




superficie y el aéreo (RAND Corporation, 2013). Como se verá en el punto 5, esta explotación la pueden llevar a cabo tanto por el uso de sensores propios como desplegando otros vehículos no tripulados (AUV, ROV y RPAS).

Una de las principales ventajas de los USV en la alta relación carta de pago/dimensiones. Son vehículos que pueden contar con una importante plataforma para embarcar fuentes de alimentación, que es la principal carga que soportan estos vehículos, sus propios sensores y otros ajenos. Frente a los RPAS y los AUV, un USV puede permanecer mucho más tiempo desplegado debido a la capacidad de embarcar fuentes de energía menos limitadas que las que emplean los otros vehículos.

Obviamente lo RPAS pueden tener mayor alcance en menos tiempo que los USV debido a su mayor velocidad de navegación. Pero en su concepción, las operaciones con USV demandan velocidades de operación bajas que no requieren de un gran consumo energético. Eso sí, la limitación impuesta por la curvatura terrestre hace que la comunicación y transmisión de datos con un USV sea menor que con un RPAS. En cuanto a la comparativa con los AUV, un USV puede tener un mayor radio de acción que los primeros porque, aunque las velocidades de operación pueden ser similares, la autonomía de los AUV es menor.

A modo de ejemplo, se establece una comparativa entre tres vehículos de la Universidad de Cádiz, un USV, un AUV y un RPAS, en una misión teórica de batimetría, sonar de barrido lateral y multispectral respectivamente, y a las velocidades requeridas para la misión (Tabla 4).

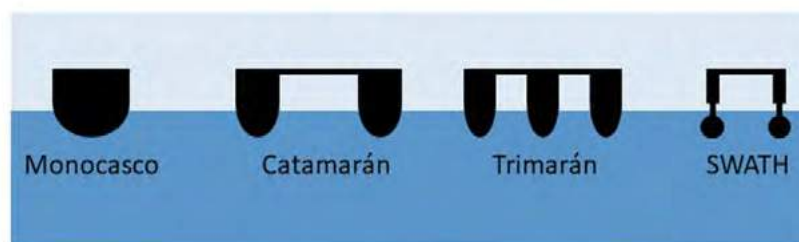
**Tabla 4.** Comparativa entre las autonomías y velocidades alcanzadas por diferentes vehículos de la Universidad de Cádiz

<i>Vehículo</i>	<i>Autonomía</i>	<i>Equipo</i>
	28 horas a 1 nudo 20 horas a 2 nudos 9 horas a 3 nudos	Multihaz NORBIT iWBMSe
	10 horas a 4 nudos	Sonar de Barrido Lateral Klein
	3 horas a 39 nudos* *velocidad de sustentación	Multiespectral MicaSense RedEdge-MX Dual

Dependiendo de las aplicaciones prácticas, los USV pueden tener diferentes aspectos y funcionalidades. Sin embargo, en todos ellos deben de considerarse una serie de elementos básicos o subsistemas: 1) el casco y los elementos estructurales auxiliares, 2) el sistema de propulsión y alimentación, 3) el sistema de guía, navegación y control, o GNC, 4) el sistema de comunicaciones, 5) los equipos de recopilación de datos, y 6) la estación en tierra. Todos estos subsistemas deben estar relacionados entre sí para una correcta operatividad del vehículo. A continuación, se analizan de forma resumida algunos de ellos.

#### 4.2. El casco y los elementos estructurales auxiliares

Por lo general existen tres tipos de cascos, cada uno de ellos con sus propias variaciones: monocascos, catamaranes o trimaranes, y a su vez estos pueden ser cascos inflables con estructura rígida o cascos rígidos (Figura 7). Estas variaciones en el diseño del casco corresponden a diferentes aplicaciones de USV. Todos ellos presentan ventajas e inconvenientes. Los diseños en monocasco y catamarán son populares debido a su conveniente montaje y carga. Los USV monocasco son fáciles de fabricar o modificar a partir de vehículos de superficie tripulados. Los USV de tipo catamarán y trimarán son más ligeros, tienen una menor superficie de fricción que les permite alcanzar mayores velocidades, presentan una mayor estabilidad del sistema en aguas tranquilas, y proporcionan una mayor capacidad de carga útil y redundancia. Sin embargo, con oleaje son menos estables que una embarcación monocasco convencional y necesitan un radio de giro mayor que esta, y por lo tanto son más lentos en esta maniobra que una embarcación convencional. Existe una opción fruto de la modificación de un catamarán, el casco tipo SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*), en el que los dos cascos están formados por dos torpedos. Los SWATH son conocidos por sus buenas características de comportamiento en la mar, pero están penalizados por la resistencia al avance debido a la mayor superficie mojada que presentan respecto a los monocascos de similar desplazamiento.



**Figura 7.** Esquema de los distintos tipos de cascos

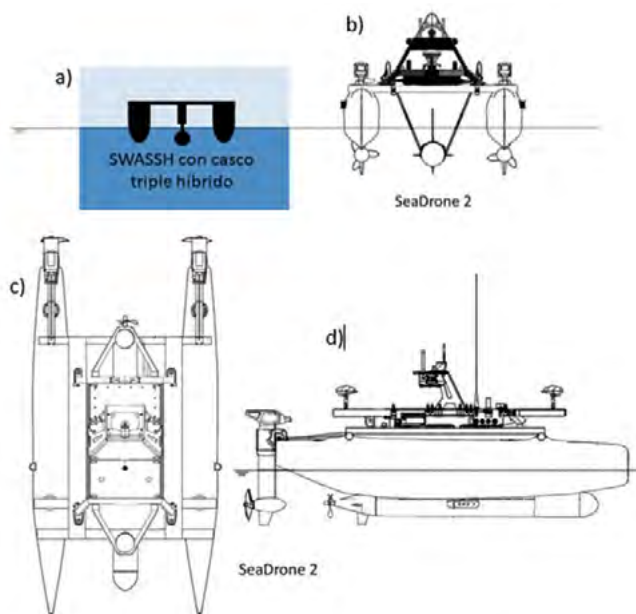
Existen infinidad de variantes de estos cascos. Así, por ejemplo, algunos catamaranes navegan normalmente con dos cascos consiguiendo una velocidad y una maniobrabilidad elevadas, pero en el caso de una excesiva mala mar, lastran tanques aumentando su calado y convirtiéndose en trimarán debido a la inmersión del casco central, consiguiendo con ello que los movimientos disminuyan al aumentar el área de la flotación (Figura 8). Por último, existen algunos ejemplos de trimaranes tipo SWATH con un casco central sumergido que aumenta la estabilidad en el sentido de navegación longitudinal, y cascos laterales para mejorar la estabilidad transversal. Este casco disminuye el área mojada de los SWATH de doble casco, necesita menos potencia del motor a velocidades moderadamente altas (característica propia de los trimaranes), y disminuye la resistencia a la formación de olas. Algunos diseñadores navales lo definen como SWASSH (*Small Waterplane Area Single Stabilised Hull*) o SWASH (*Submerged Single Hull with Active Stabilization*).



**Figura 8.** Esquema de casco de catamarán con posibilidades de navegar como trimarán

A modo meramente informativo, en el Subproyecto 2 de KTTSeaDrones se ha diseñado un USV, *SeaDrone 2*, con capacidad para portar un AUV y desplegar un RPAS. El USV podrá desarrollar dos tipos de tareas: 1) Misiones propias de un USV, empleando la sensórica disponible en el AUV que durante la navegación anula sus sistemas de navegación; y 2) Vehículo con elevada autonomía para el transporte del AUV hasta la zona de trabajo, donde lo liberará y lo recogerá finalizada su misión (Figura 9). Por lo tanto, la configuración elegida para el casco del vehículo será la de catamarán, que trabajará en modo SWASSH o SWASH cuando porte el AUV.

Finalmente, el material a emplear en la fabricación del casco debe de ser altamente resistente y de bajo peso. Los materiales compuestos muestran mejores propiedades que los materiales metálicos y los plásticos. En general, la mejor combinación son los plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP), más económico, y con fibra de carbono (CFRP). No obstante,



**Figura 9.** a) Esquema SWASSH o SWASH del *SeaDrone 2* portando un AUV; b) Vista frontal por proa. *SeaDrone 2* portando un AUV; c) Vista superior; y d) Por el costado de estribor

en muchos vehículos se opta por el empleo de diferentes plásticos extruidos que abaratan los costes. Estos materiales son trasladables también a los AUV, donde además hay que tener muy presente la resistencia a la presión hidrostática. Los cascos inflables son adecuados para aplicaciones militares principalmente debido a su mayor resistencia y capacidad de carga útil, aunque también se emplean en labores de investigación.

A modo de ejemplo, se presentan algunos modelos comerciales de esloras inferiores a 2 m (Figura 10).



**Figura 10.** USV comerciales con distintas configuraciones y esloras: a) *Monocasco Sounder* de 8 m de eslora, de *Kongsberg*; b) *Catamarán HydroCat-180* de 5,5 m de eslora, de *Seafloor Systems*; c) *Catamarán hinchable WAM-V 8* de 2,5 m de eslora, de *Marine Advanced Robotics*; y d) *Trimarán Z-Boat 1250* de 1,27 m de eslora, de *Teledyne*



### *4.3. Sistema de propulsión y potencia*

Los sistemas de propulsión pueden variar de un tipo de vehículo a otro, siendo el de una hélice acoplada a un motor eléctrico es el más utilizado en la mayoría de los USV. Los sistemas que combinan timón y hélice o jet impulsor de agua, se suelen emplear USV monocasco y la combinación de ambos facilita el control del rumbo y velocidad. Sin embargo, los USV con casco catamarán suelen ser dirigidos por el empuje diferencial suministrado por dos motores independientes, uno en cada casco. Es el trabajo coordinado de adelante de uno y atrás de otro, el que evita la necesidad de emplear timones (Yuh, 2000). Sin embargo, las limitaciones de eslora y capacidad de carga de los USV impiden por lo general el empleo de actuadores laterales adicionales, al contrario de lo que ocurre con barcos de mayor porte. El resultado es que el número de propulsores disponibles es menor que los grados de libertad de los USV en movimiento, complicando el control y la precisión de la navegación (Liu et al., 2016).

En cuanto a la fuente de energía, es uno de los componentes más críticos en todos los vehículos marinos no tripulados (excluyendo los ROV que pueden ser alimentados “indefinidamente” desde la cubierta de un barco nodriza). Su capacidad, peso y volumen está en relación directa con la misión que se le puede encomendar al vehículo y con las propias dimensiones del mismo. Se dividen básicamente en baterías, un conjunto de celdas electro-químicas, recargables o no, que convierten la energía química en energía eléctrica, y celdas de combustible, que generan energía por la reacción química entre un combustible y un agente oxidante. En la actualidad, las baterías más empleadas en los USV son las de ion Li (Wang et al., 2009). En USV de mayores dimensiones, el sistema puede estar alimentado por generador de explosión, aunque este no sustituye a las baterías que alimenta y recarga.

A modo de ejemplo, en el vehículo SeaDrone 2, diseñado como parte del Subproyecto 2 de la UCA, se han llevado a cabo una serie de cálculos para que la propulsión proporcione una velocidad máxima de ocho nudos, considerando la resistencia efectiva vinculada a cada estado de viento y de mar. Definida previamente la posición de los motores en sendos espejos de popa de los patines o carenas, se han instalado dos Torquedo Cruise 3.0 TL alimentados por una batería litio Power 24-3500.

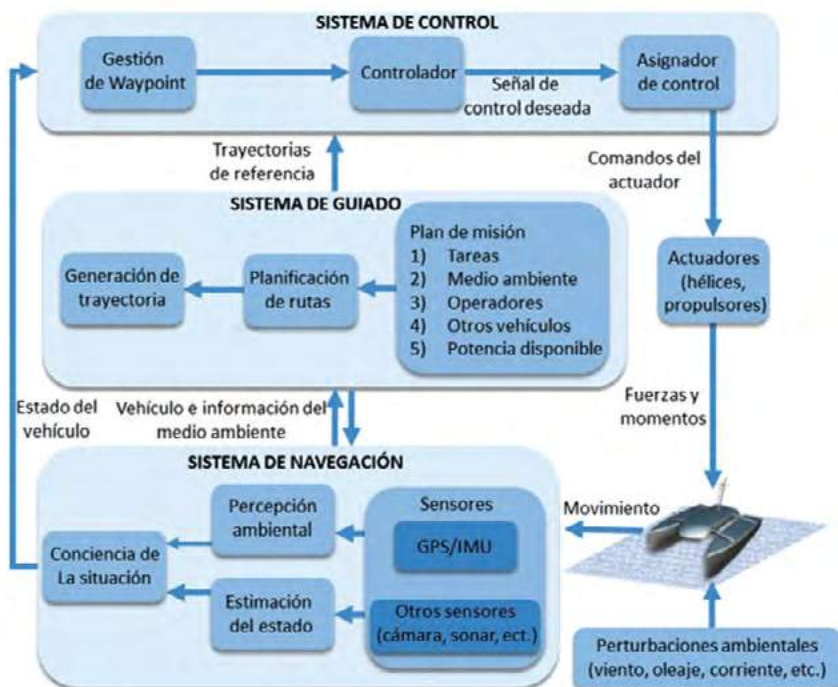


#### 4.4. Sistema de Guiado, Control y Navegación

El Sistema de Guiado, Control y Navegación o GNC (del inglés *Guidance, Navigation and Control System*), es el componente más importante de los USV (Fossen, 2002; Antonelli et al., 2008). Los módulos GNC están constituidos generalmente por ordenadores y software integrados, y en su conjunto son responsables de administrar todo el sistema USV. Consta de:

- **Sistema de Guiado.** Es el módulo encargado de generar las trayectorias que debe seguir el vehículo durante la misión. El Sistema de Guiado tiene como entradas los waypoint definidos por el usuario, e información proveniente del Sistema de Navegación. La información sobre la posición, velocidad y aceleración es enviada al Sistema de Control, que forzará al vehículo a tratar de alcanzar las coordenadas establecidas. Además, puede recibir información sobre la situación ambiental (e.g. corrientes marinas), de la topografía del fondo marino, o los datos provenientes de un sonar para la detección de obstáculos. Algunos USV cuentan con un módulo de planificación dinámica que permite replanificar la misión e introducir en el Sistema de Guiado waypoint que no fueron definidos previamente (Acosta et al., 2008).
- **Sistema de Control.** Es el encargado de calcular las fuerzas necesarias que debe generar el sistema de propulsión para que el vehículo alcance las coordenadas establecidas. Recibe información de la posición, velocidad y aceleración deseada y el estado actual de estas variables medidas a través de los sensores del vehículo.
- **Sistema de Navegación.** Recibe la información de los sensores de posición, velocidad y aceleración del USV. Procesa esta información y posteriormente la envía al Sistema de Guiado y al Sistema de Control.

De esta lectura ya puede establecerse que estos subsistemas funcionan en interacción entre ellos, hasta el punto de que defectos en uno de los tres subsistemas pueden disminuir el rendimiento de todo el GNC o llevarlo a su colapso. En la Figura 11 se presenta un esquema con la estructura general de los sistemas de guía, navegación y control de un vehículo autónomo, adaptado de Liu et al. (2016).



**Figura 11.** Estructura general de los subsistemas GNC de un USV (adaptado de Liu et al., 2016)

#### 4.5. Sistemas de comunicación y estación de control

Los sistemas de comunicación incluyen no solo la comunicación inalámbrica con estaciones de control en tierra o en barcos de apoyo desde los que se asignan las misiones y la comunicación con otros vehículos en caso de que se lleven a cabo trabajos cooperativos, sino también la comunicación a bordo con una variedad de sensores, actuadores y otros equipos. Su fiabilidad es, por lo tanto, de suma importancia.

En cuanto a la estación de control juega un papel importante en el sistema GNC del vehículo, y puede ubicarse en una instalación en tierra, un vehículo móvil o un barco en alta mar. Las misiones se pueden asignar a los vehículos a través de sistemas de comunicación inalámbrica. El estado del USV y de su equipo a bordo son monitorizados por la estación de control en tiempo real, y desde la misma el operador puede controlar la embarcación de forma directa o semiautomática mediante la introducción de rumbos. Las comunicaciones entre el USV y la estación de control se llevan a cabo por Wifi o radio, según la distancia existente entre los mismos. En el caso de

vehículos capaces de realizar campañas oceánicas alejadas de la línea costa, se puede emplear la comunicación vía satélite.

## 5. Sensores a bordo en un USV

A bordo de un USV podemos encontrar tres tipos de sensores. Los sensores de posicionamiento permiten determinar la posición, orientación, velocidad y aceleración del USV. Los sensores de estado interno permiten conocer el consumo energético, temperatura del USV, posibles averías, etc. Por último, los sensores de monitorización son los que permiten la recogida de distintos datos de interés por parte el vehículo: parámetros químicos del agua, cartografía del fondo marino, etc. Haremos una breve mención a los dos primeros, y entraremos con más detalle en algunos sensores de monitorización de interés para la investigación de medio marino.

Existen otros elementos, aunque no se pueden considerar sensores, son indispensables para el manejo de los USV. Por un lado, los sistemas de comunicación que permiten el intercambio de datos y órdenes entre el USV y la estación de control, o entre los distintos sensores a bordo del USV. Y por otro la propia estación de control, que permite recuperar el control del vehículo hasta una determinada, y sobre la que se vuelcan los datos telemétricos y de los sensores cuando el USV trabaja de forma autónoma.

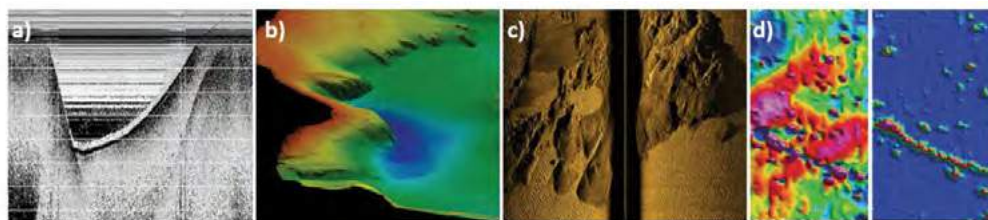
Entre los sensores de posicionamiento destacan dos, cuya precisión y calidad están relacionados directamente con la aptitud y funcionalidad del USV. Por un lado, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) permite conocer la posición del USV en cualquier lugar y momento. Por otro, la Unidad de Medición Inercial (IMU) informa de la aceleración lineal y la velocidad angular del USV, y corrige los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada propios de un vehículo desplazándose sobre una masa de agua. Hay otros sensores de posicionamiento relevantes a la hora de valorar un USV, algunos necesarios como los sistemas de visión, y otros muy recomendables como el sonar y el radar de detección de obstáculos en la navegación por debajo o por encima de la superficie marina respectivamente.

En los sensores estado interno es necesario uno que mida tanto el consumo eléctrico de los motores y de los sistemas periféricos del USV, como la carga de las baterías. Otros sensores muy recomendables son los de temperatura del USV, y los detectores y alarmas de averías o inundaciones.

Finalmente, en cuanto a los sensores de monitorización, hay tantas opciones como labores se quieran realizar con el USV (Tabla 2). Nos centraremos en las más habituales para la investigación del medio marino. Algu-

nos fabricantes ya preparan sus equipos para ser incorporados a los USV. En otros casos, son los investigadores los que realizan las modificaciones necesarias.

El levantamiento hidrográfico es el campo más común y mejor desarrollado en el que se aplican USV. Estos trabajos requieren de una navegación de precisión, que se suele desarrollar en transeptos de ida y vuelta para cubrir zonas amplias. Se suelen realizar, en función del objetivo perseguido, con ecosonda de haz único o monohaz (permite calcular la profundidad en un único punto), ecosonda multihaz (permite realizar batimetrías de alta resolución con cobertura 100% del fondo marino a través de sondeos con múltiples haces y corrección de rumbo, cabeceo, balanceo, guiñada y velocidad del sonido), sonar de barrido lateral (permite crear “imágenes” acústicas y georreferenciadas de la superficie del fondo marino, que permiten caracterizar la cubierta del fondo, detectar objetos, inspección de estructuras, etc.), magnetómetro (para la localización de materiales ferromagnéticos que se encuentren tanto en la superficie del fondo como enterrados en el mismo), perfilador de fondos (mediante el que se obtienen registros acústicos de baja frecuencia, reflejados en el subsuelo marino, que permiten discriminar las interfaces entre distintas capas de materiales de distinta naturaleza), perfilador de corriente acústico doppler o ADCP (que permite medir la velocidad de corriente en una masa de agua, marina o continental), entre otros (Figura 12). De estos, los magnetómetros y los perfiladores de subsuelo son los equipos que en lugar de incorporarse en el casco del USV, son arrastrados por el mismo. En cuanto a la sonda batimétrica, es necesario que sus registros vayan acompañados de otros relativos a la velocidad del sonido en la columna de agua, con los que se podrán realizar las calibraciones pertinentes. En este caso, el perfil se puede realizar desde el barco de apoyo, pero lo recomendable es que el USV incorpore un winche o polipasto que permita bajar la sonda de sonido a una profundidad cercana a la del fondo sobre el que se lleva a cabo el levantamiento batimétrico.



**Figura 12.** Imágenes obtenidas por: a) sonda monohaz; b) sonda multihaz; c) sonar de barrido lateral; y d) magnetómetro

En cuanto a los estudios ambientales y oceanográficos, destaca la incorporación de sondas CTD (permiten la realización de medidas de perfil de la conductividad, temperatura y presión a lo largo de la columna de agua) o las sondas multiparamétricas (similares a las CTD pero con capacidad para medir un gran número de parámetros en función de los sensores que se le instalen: oxígeno disuelto, pH, turbidez, hidrocarburos, nitratos, cloruros, clorofila, rodamina, etc.). En estos casos el USV también debe incorporar también un winche o polipasto que permita bajar la sonda a la profundidad máxima prevista el perfil. Más recientemente se han comenzado a comercializar sensores para la captura de imágenes hiperespectrales en el agua, que permite la exploración, monitoreo, clasificación e identificación de objetos, áreas y organismos bajo el agua.

Los sensores montados en un USV también permiten los estudios de los recursos pesqueros, incorporando ecosondas biológicas que permiten evaluar el stocks de poblaciones de peces, distribuir los tamaños, realizar estimaciones de biomasa total tanto de peces como de fitoplancton, etc.

La versatilidad y maniobrabilidad de estos vehículos también ha impulsado su uso en la obra marítima. Además de los sensores comentados en el apartado de levantamiento hidrográfico, existe la posibilidad de montar un Lidar, un sensor láser de exploración con elevada capacidad de alcance y que permite el mapeo preciso y de largo alcance de las obras y vías navegables costeras e interiores, de cascos de buques, etc.

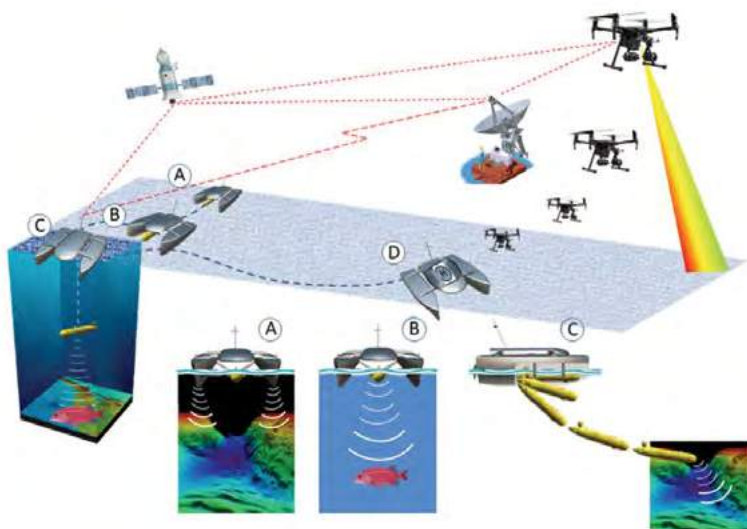
Como ya se ha comentado, los USV son vehículos muy versátiles, capaces de realizar misiones muy distintas, con elevada relación carta de pago/dimensiones y amplio radio de acción. Son vehículos que pueden contar con una importante plataforma. En la actualidad, son muchos los estudios que se centran en el desarrollo de mecanismos de colaboración entre USV y otros vehículos no tripulados como AUV, ROV o RPAS. Esta colaboración tiene muchas ventajas, como la capacidad de manejar tareas más complejas, la capacidad de abordar una tarea con mayor solidez gracias a la redundancia, el aumento de la eficiencia mediante la distribución de tareas y la reducción del coste de operación.

En el mercado existen ya algunos USV capaces de desplegar ROV y AUV (Figura 13). Así, el Cat-Surveyor de SUBSEA TECH (<https://www.subsea-tech.com/cat-surveyor/>) es capaz de desplegar un mini-ROV Observer 4.0 hasta los 60 metros de profundidad. En este caso, el papel del USV es llegar a la zona de despliegue del ROV, que es arriado e izado a control remoto desde la estación de control. Por su parte, el SEA-KIT (<https://www.sea-kit.com/commercial>) puede transportar un AUV comercial hasta el sitio de lanzamiento, desplegarlo y posteriormente recuperarlo.

En el mercado, a la fecha de edición de este libro, solo la versión de 2022 del Cat-Surveyor es capaz de desplegar un RPAS o UAV. En el proyecto KTT-SeaDrones se ha trabajado en el diseño del SeaDrone 2 (presentado en la Figura 9), un USV con capacidad para desplegar un AUV y un RPAS o UAV (Figura 14).



**Figura 13.** a) USV Cat Surveyor de 3 m de eslora; y b) SEA-KIT de 11,75 m de eslora



**Figura 14.** Esquema de trabajo del SeaDrone 2 de la Figura 9: A) USV operando con sus sensores y transportando un AUV y un RPAS o UAV; B) USV transportando un AUV y operando con los sensores de este; C) USV desplegando un AUV; y D) USV desplegando un RPAS

## 6. Régimen jurídico de los vehículos marinos no tripulados

La regulación española actual en materia de navegación no contempla la existencia de buques no tripulados. En el Capítulo I del Título II de la Ley 14/2014, de 24 de julio, de Navegación Marítima (LNM, 2014), se definen los vehículos de la navegación divididos en buques, embarcaciones y artefactos navales. Así, el artículo 56 define **buque** como *todo vehículo*

*con estructura y capacidad para navegar por el mar y para transportar personas o cosas, que cuente con cubierta corrida y de eslora igual o superior a veinticuatro metros, sin referencia alguna a la presencia o no de una tripulación a bordo. En el artículo 57 se define el término **embarcación** como el vehículo que carezca de cubierta corrida y el de eslora inferior a veinticuatro metros, siempre que, en uno y otro caso, no sea calificado reglamentariamente como unidad menor en atención a sus características de propulsión o de utilización. Carece, nuevamente, de mención alguna sobre la tripulación. El artículo 58 desdobra la definición de **artefacto naval**, como toda construcción flotante con capacidad y estructura para albergar personas o cosas, cuyo destino no es la navegación, sino quedar situada en un punto fijo de las aguas, dándole la misma consideración al buque que haya perdido su condición de tal por haber quedado amarrado, varado o fondeado en un lugar fijo, y destinado, con carácter permanente, a actividades distintas de la navegación.*

Por lo tanto y desde la perspectiva legal, los vehículos marinos no tripulados no tienen cabida en las definiciones de buque (requeriría de la capacidad de transportar personas y una eslora muy superior a la habitual), ni de artefacto naval (requeriría que nuestros vehículos quedasen indefinidamente situados en un punto fijo de la superficie, columna de agua o fondo). Quizás la mejor aproximación es la de embarcación.

De los artículos 56 y 57 no se deduce que los buques o las embarcaciones tengan que estar tripulados. Sin embargo, el artículo 161.2 indica en lo relativo a dotaciones mínimas de seguridad que será la Administración Marítima la que establecerá para cada buque nacional la dotación mínima de seguridad atendiendo a sus circunstancias técnicas, de navegación y de tráfico, así como al régimen y organización del trabajo a bordo. En el artículo 253 del Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante (LPEMM, 2011), indica que el número de miembros de la dotación de los buques y sus condiciones de capacitación profesional deben ser las adecuadas para garantizar en todo momento la seguridad de la navegación y del buque, teniendo en cuenta sus características técnicas y de explotación, en los términos que reglamentariamente se establezcan. Por lo tanto, se concluye que la Ley de Navegación Marítima hace referencia en cualquier caso a vehículos marinos tripulados.

Sea como fuere, y a pesar de no estar regulados o claramente identificados en estas normas, los vehículos marinos no tripulados operan lógicamente en el mar o aguas interiores, exponiéndose como cualquier otro



vehículo marino tripulado a los riesgos inherentes a su actividad (averías, abordajes, daños a terceros, incidencias climatológicas, etc.). Por ende, se deduce que están sujetos a las mismas reglas de la ley del mar que cualquier barco tripulado, al menos aquellas que no requieren en su definición de la presencia precisamente física sobre el vehículo de una tripulación.

Por otro lado, la Ley de Navegación Marítima indica en su artículo 182, referentes a las obligaciones técnicas del capitán, que este *ostenta la dirección técnica de la navegación del buque, asumiendo su gobierno efectivo cuando lo juzgue oportuno, ...acudirá al puente y asumirá directamente el gobierno del buque en las recaladas, maniobras de llegada y salida de puerto*. Existen en España diversas titulaciones profesionales o certificados de especialidad que capacitan a una persona para asumir las funciones de capitán o para ejercer como miembro de una dotación en un buque mercante, militar o deportivo. No es así con los vehículos marinos no tripulados. Puntualmente en España hay escuelas privadas que imparten títulos de ROV de distintos niveles dentro programas formativos reconocidos por la *International Marine Contractors Association* (IMCA). Pero en nuestro país, estos títulos no habilitan profesionalmente a la persona que los ha superado, más allá de lo que pueda exigir una empresa privada. En el caso de los glider, la Plataforma Oceánica de Canarias organiza periódicamente la *PLOCAN Glider School* (<https://gliderschool.eu>), dirigida a formar a técnicos y estudiantes en habilidades y destrezas teóricas y prácticas relacionadas con estos vehículos submarinos. Igualmente, no es un título oficial.

### 6.1. Protocolo administrativo

Llegados a este punto, se hace necesario establecer un protocolo para el empleo de estos vehículos en una administración pública, como es el caso de las universidades que forman el consorcio del proyecto KTTSeaDrones. Este protocolo sería válido en aguas españolas. Según las operaciones sean de superficie o submarinas, los protocolos son diferentes, coincidiendo solo parcialmente cuando el objeto de la misión es un trabajo relacionado con el Patrimonio Cultural Subacuático y buques y embarcaciones de Estado naufragados o hundidos.

#### • ROV, AUV, I-AUV y glider

Para utilizar vehículos submarinos (tripulados o no), se requiere del conocimiento previo tanto de la Armada a través de su Comandancia Naval como de la Capitanía Marítima de la zona donde se vaya a operar, con objeto de confirmar que no existe conflicto con otra actividad submarina en la zona (presencia de submarinos, vehículos no tripulados de la Armada, etc.).



Por tanto, previo a cualquier actividad, las administraciones y empresas deben solicitar permiso y recibir confirmación.

El Ministerio de Fomento (a la fecha de este informe Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana), a través de la **Instrucción número 7/2016** estableció los requerimientos para la *solicitud que deben realizar las empresas que vayan a utilizar submarinos de uso civil, en aguas marítimas sobre las que España ostenta soberanía, derechos soberanos o jurisdicción*. El objetivo es impedir posibles interferencias con otras actividades subacuáticas derivadas de operaciones de submarinos, u otras unidades, militares, nacionales o extranjeras. De la lectura de esta Instrucción debe extraerse que estos requisitos son exigibles también a las administraciones públicas, y que hace referencia a vehículos submarinos incluyendo ROV, AUV, I-AUV y glider. Estas deben de comunicar a las Capitanías Marítimas con jurisdicción en las aguas en las que va a llevar a cabo la actividad subacuática, y con al menos 30 días de antelación (recomendación), los siguientes datos:

- a) *Propósito de la actividad subacuática.*
- b) *Período que comprende la actividad (fecha y hora de inicio y finalización).*
- c) *Áreas geográficas y derroteros (incluyendo situación/grupo fecha y hora) en la que se va a realizar la actividad subacuática.*
- d) *Buques y vehículos submarinos (tripulados o no) que vayan a emplearse, con indicación de sus características, entre otras radios de acción, profundidad de operación, equipos remolcados o de rastreo, etc.*
- e) *Datos de contacto de los responsables de la actividad subacuática, tanto en la empresa, buque, como en el vehículo submarino.*
- f) *Certificados con los que cuente el submarino.*

En el apartado 3 de la instrucción se recoge el procedimiento que seguirán las administraciones responsables de tramitar los permisos:

*Las Capitanías Marítimas, para informar y recabar la conformidad de la Armada, previa a la posible autorización, efectuarán la comunicación a las Comandancias Navales correspondientes, de acuerdo al Protocolo adjunto acordado con la Armada, con copia a la Subdirección General de Seguridad, Contaminación e Inspección Marítima. Para puntos de contacto ver el Anexo del citado protocolo.*

*Por otra parte, se presentarán a la Capitanía Marítima los certificados del submarino, titulaciones o cualificaciones de los operarios de acuerdo a lo exigido por su registro, y documentación y datos técnicos del submarino, de acuerdo a las operaciones que solicita. En la posible autorización se hará una mención expresa a la necesidad de respetar las limitaciones y condiciones que le impongan los certificados, documentación y la bandera bajo la que operen. A Criterio de Capitanía, se podrán realizar inspecciones como parte de dichas comprobaciones si se considera necesario.*

Las solicitudes se deben tramitar a través de la sede electrónica de la Dirección General de la Marina Mercante o a través de plataforma electrónica reconocida conforme a la Ley 39/2015 de 1 de octubre. Una vez aceptada, el Centro de Operaciones y Vigilancia de Acción Marítima de la Armada (COVAM) solicitará que se informe en las siguientes 24/48 horas de las actividades a realizar a través del correo covam@mde.es, incluyendo posición actualizada. Durante el periodo de trabajo no se realizarán actividades que puedan alterar el fondo marino (salvo que cuente con las autorizaciones expresas) y se emitirán los avisos a navegantes que se consideren necesarios. El COVAM también advertirá de la obligación de emitir permanentemente con el equipo AIS de la embarcación de apoyo, de disponer de personal de guardia de forma permanente para mantener escucha en el canal 16 VHF y el canal 70 de llamada selectiva digital, y de comunicar a la Comandancia Naval de la zona la detección de cualquier objeto submarino/pecio en el lecho marino, adjuntando posición, imágenes, vídeos y cualquier otra información sobre el hallazgo. Por su parte, la Capitanía Marítima de la zona solicitará que el responsable del trabajo comunique al Coordinador Nacional de Radioavisos Náuticos el comienzo y fin de las operaciones, así como las posiciones donde se van a llevar a cabo las mismas.

Respecto a los certificados del submarino, pueden presentarse los aportados por los fabricantes del ROV, AUV, I-AUV o glider. En cuanto a las titulaciones, en el caso de los ROV se puede presentar la de IMCA si se cuenta con ella, y en todos los casos las expedidas por las empresas fabricantes tras los cursos de formación que se suele llevar a cabo cuando se entrega el vehículo. No obstante, será la Capitanía Marítima la que decidirá sobre el valor es esta documentación.

#### • USV

La Dirección General de la Marina Mercante (DGMM) publicó en 2019 la Instrucción de Servicio 01/2019 para el abanderamiento, construcción,

pruebas y operación de embarcaciones no tripuladas. El objeto de este documento se justificó ante la ausencia de normativa reguladora en estos aspectos, con el fin de proveer a la DGMM de una definición de mínimos para la construcción, reforma y abanderamiento o matriculación en ámbito de los buques y embarcaciones de eslora inferior a 12 m y bajo su jurisdicción. Uno de los mayores retos planteados por la DGMM para estas embarcaciones no tripuladas es el de realizar navegaciones en las que esté garantizado el cumplimiento del Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la Mar de 1972. En la instrucción se definen tres categorías de autonomía: R (control remoto operado desde costa u otro buque, con tripulación a bordo, que en cualquier momento puede asumir el control manual cambiando a categoría M), RU (control remoto operado desde costa u otro buque, sin tripulación a bordo) y A (modo autónomo en el que el sistema operativo a bordo es capaz de calcular riesgos y consecuencias, y tomar decisiones y actuar de modo autónomo; solo si el sistema falla, la autonomía pasaría a ser RU, o R en caso de disponer de tripulante a bordo). De estas tres categorías, la A queda fuera de la instrucción, y la RU es en la que se basa este capítulo. La instrucción da indicaciones sobre la normativa aplicable en la construcción de estos vehículos, las pruebas e inspección, la responsabilidad en las operaciones, las condiciones de operatividad, restricciones operativas, y medidas de seguridad de la navegación, contra-incendios, control remoto, protección contra accesos no autorizados al mando, gestión de riesgos y solución a eventualidades. Igualmente, da indicaciones sobre la titulación profesional del responsable de la embarcación, que debe ser equivalente al tipo de actividad que vaya a realizar el mismo conforme a su arqueo y potencia. Esta titulación debe ir acompañada por un certificado para poder operar embarcaciones no tripuladas expedido por un centro homologado por la DGMM, y estar habilitado por el fabricante de la embarcación. Finalmente se indica que la embarcación debe contar con un seguro de responsabilidad civil acorde con los daños que pueda ocasionar.

Es importante señalar que las embarcaciones de recreo menores de 2,5 m y los aparatos flotantes o de playa con independencia de su eslora están exentas de matriculación. Sin embargo, un USV de menos de 2,5 m no parece ajustarse a esta cláusula. A la fecha de edición de este libro, julio de 2022, se había convocado una Mesa Redonda en Madrid el 23 de noviembre de 2022 con fabricantes y usuarios de USV para tratar el desarrollo y aplicación de esta instrucción.

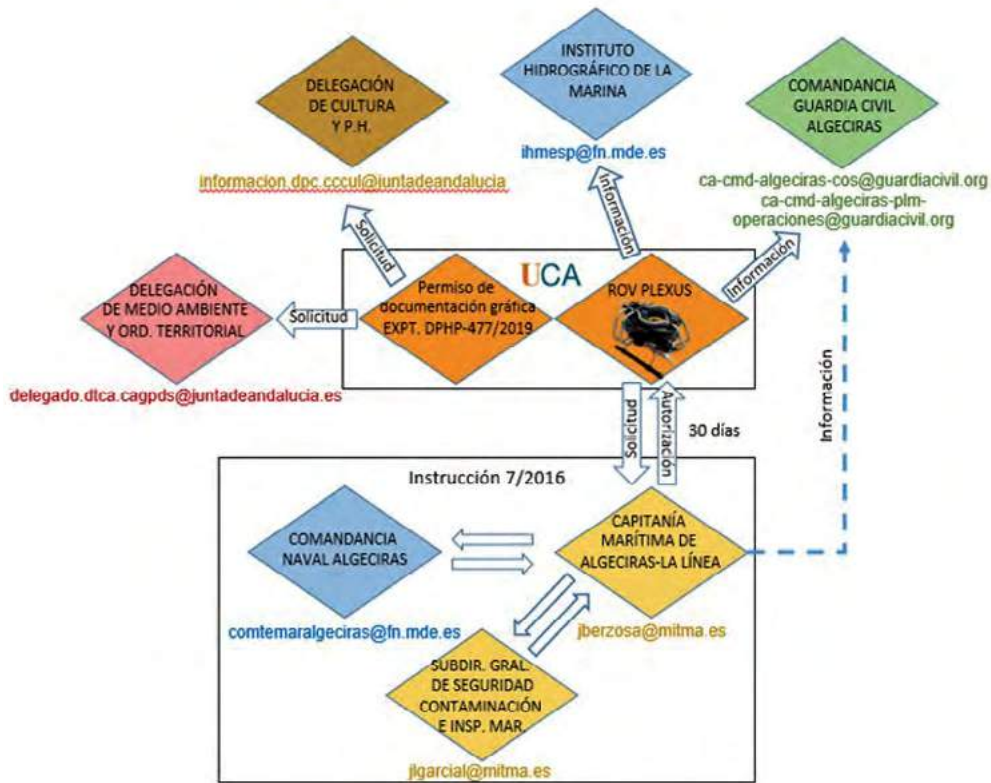
### • Patrimonio Cultural Subacuático y buques de Estado naufragados o hundidos

Este apartado requiere de un tratamiento especial. Según el artículo 382.2 de la Ley de Navegación Marítima, *las operaciones de exploración, rastreo, localización y extracción de buques y embarcaciones de Estado españoles naufragados o hundidos requerirán autorización de la Armada, que ostenta competencias plenas para su protección, sin perjuicio de lo dispuesto en la legislación sobre patrimonio histórico y cultural, en su caso.*

Mientras, en el apartado 3 del mismo artículo se indica que *los restos de buques de guerra extranjeros hundidos o naufragados en espacios marítimos españoles gozan de inmunidad de jurisdicción conforme a lo previsto en el artículo 50. No obstante, las operaciones de exploración, rastreo, localización y extracción de los mismos deberán ser acordadas entre los órganos competentes del Estado de su pabellón y el Ministerio de Defensa. En su caso, tales operaciones quedarán sujetas a lo establecido en la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático de 2 de noviembre de 2001.*

Por lo tanto, cualquier actividad realizada sobre este patrimonio sumergido debe de contar con la autorización de la Armada, sea cual sea el vehículo, tripulado o no tripulado, que se vaya a emplear. En el caso del encuentro casual de algún indicio de patrimonio, igualmente, se debe cesar la actividad de forma inmediata y proceder a comunicárselo a la Armada.

Finalmente hay que tener en cuenta el ámbito competencial de las autonomías en materia de Patrimonio Histórico. En el caso de Andalucía, la Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico Andaluz (LPHI, 2007), indica en su artículo 47.1 que *forman parte del Patrimonio Arqueológico los bienes muebles o inmuebles de interés histórico, susceptibles de ser estudiados con metodología arqueológica, hayan sido o no extraídos y tanto se encuentren en la superficie o en el subsuelo, en las aguas interiores, en el mar territorial o en la plataforma continental...* Por otro lado, el artículo 52 exige la previa autorización de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico a la hora de realizar todo tipo de excavaciones y prospecciones arqueológicas, *terrestres o subacuáticas* (punto 1), realizando la misma distinción a la hora de definir estas excavaciones o prospecciones (punto 2). Los vehículos marinos no tripulados, dotados con sondas multihaz, sonar de barrido lateral, cámaras de vídeo, etc., pueden acometer labores de prospección, o incluso de excavación si van dotados de brazos robóticos, mangas de succión, etc. Por lo tanto, además de las autorizaciones por parte de la Armada, se debe disponer de las debidas autorizaciones por parte



**Figura 15.** Diagrama de flujo de una solicitud realizada por la Universidad de Cádiz

de la consejería con competencias en la materia, tramitadas normalmente ante las delegaciones provinciales de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico, según la zona en la que se va a trabajar.

### • Guardia Civil y espacios naturales protegidos

Aunque la legislación no requiere de la comunicación de las actividades de vehículos marinos no tripulados a la Guardia Civil, esta es muy recomendable. La Guardia Civil dispone tanto de un Servicio Marítimo como de una Unidad de Actividades Subacuáticas. La Ley Orgánica 2/1986, de 13 de marzo, de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad en su artículo 11.2.b, indica que la Guardia Civil ejercerá las funciones que, con carácter genérico se asignan a las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, entre otros, en el mar territorial. Por otro lado, el artículo 1 del Real Decreto 246/1991, de 22 de febrero, que regula el Servicio Marítimo de la Guardia Civil, indica que *las funciones*

que la Ley Orgánica 2/1986 de 13/03 de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad atribuye al Cuerpo de la Guardia Civil se ejercerán en las aguas marítimas españolas hasta el límite exterior del mar territorial determinado en la legislación vigente y, excepcionalmente, fuera del mar territorial, de acuerdo con lo que se establece en los tratados internacionales. Entre las misiones fundamentales del Servicio Marítimo está la *conservación de la naturaleza y el medio ambiente, control e inspección pesquera y de embarcaciones deportivas, protección del patrimonio histórico sumergido y el control de la inmigración irregular*. Mientras, la Unidad de Actividades Subacuáticas tiene entre sus misiones la vigilancia, prevención y protección del patrimonio cultural, histórico y natural sumergidos. Por lo tanto, su conocimiento previo de las misiones que deseamos emprender con nuestros vehículos marinos no tripulados puede resultar muy provechosa para ambas partes y evitar confusiones. Si bien es cierto que las Capitanías Marítimas informan de las autorizaciones a las administraciones vinculadas al tema, no está de más tomar la iniciativa una vez lograda esa autorización.

En caso de necesidad, la solicitud de autorización se debe gestionar también con los responsables de **espacios naturales protegidos** (Parques Nacionales y Naturales, Reservas Naturales, Áreas Marinas Protegidas, Monumentos Naturales, Paisajes Protegidos, Cuencas Hidrográficas) que incluyan entre sus espacios protegidos zonas marinas o aguas continentales. Los premisos también se pueden ampliar a **ayuntamientos y demarcaciones de costa** en caso de realizar las campañas en playas urbanas.

## 6.2. Diagrama de flujo en un ejemplo real

A modo de ejemplo, se esquematiza el procedimiento seguido a la hora de preparar una misión con un vehículo marino no tripulado, Figura 15. Se ha elegido una campaña real con un ROV en la zona de Getares (Algeciras), dentro del Parque Natural del Estrecho, en un trabajo de prospección de un pecio con fines docentes en el seno del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática de la Universidad de Cádiz. Las direcciones de correo que aparecen en el mismo son las actuales, aportadas en la Instrucción 7/2016 o por los organismos implicados.

En la Figura 16 se adjunta el modelo de solicitud presentado a la Capitanía Marítima de Algeciras-La Línea para este trabajo. Este permiso, firmado digitalmente, fue contestado positivamente, con la indicación de que se debía comunicar a Salvamento Marítimo de Algeciras CLS, en el Canal 74 de VHF, el inicio y finalización de las operaciones, así como la posición donde se va a operar. En la Figura 17 se presenta un extracto de la autorización de ALMART.



Universidad  
de Cádiz

SERVICIO DE DRONES  
UNIDAD DE VEHICULOS  
MARINOS NO TRIPULADOS

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales  
11510 Puerto Real (Cádiz)  
manuel.bethencourt@uca.es  
Tel. +0034 956016154  
<https://dron.uca.es/vehiculos-marinos/>

## INFORME DE OPERACIÓN CON VEHÍCULO MARINO NO TRIPULADO

### -. Objeto del trabajo a realizar.

Prácticas de entrenamiento a bordo del buque UCADIZ en el manejo de ROV de los alumnos del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática de la Universidad de Cádiz (promoción 2020-2021). Las prácticas se realizarán en el Pecho de La Ballenera. La Universidad de Cádiz dispone de los permisos necesarios de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico de la Junta de Andalucía para trabajar en este pecho, y de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial para trabajar en el Parque Natural del Estrecho.

### -. Tipo y características del vehículo o vehículos a desplegar.

- ☒ Vehículo submarino operado a control remoto (ROV):
  - ☒ UCA Plexus: capacidad máxima operativa 100 m, umbilical de 100 m.
  - ☐ Seabotix vLBV300: capacidad máxima operativa 300 m, umbilical de 500 m.
- ☐ Vehículo autónomo de superficie (USV):
  - ☐ UCA SeaDrone 1: 36 Kg, 1,5 m eslora, velocidad máxima 3 nudos.
  - ☐ Maritime Robotics Otter Pro: 65 Kg, 2 m eslora, velocidad máxima 3 nudos.
  - ☐ UCA SeaDrone 2: 180 Kg, 3 m eslora, velocidad máxima 3 nudos.
- ☐ Vehículo autónomo submarino (AUV)

### -. Zona, coordenadas a cubrir en la misión y profundidad máxima o derrota en su caso.

Ensenada de Getares (Algeciras); 36°5'10.02"N 5°25'55.68"O; 9 metros

### -. Día y franja horaria de los trabajos.

Días 9, 10 y 11 de junio de 2021, 9:00-14:00

### -. Datos del personal responsable de la actividad.

### -. Teléfonos de contacto.

#### -. Se solicita AUTORIZACIÓN de la Comandancia Naval:

- ☐ No, se informa a los efectos oportunos.
- ☒ Si, por las características del vehículo (ROV o AUV) y su tipo de operación (submarina).
- ☒ Si, por tratarse de una operación sobre el Patrimonio Arqueológico Subacuático y/o sobre buques de Estado naufragados. Detalle de la actividad y responsable de la misma: Operaciones de filmación con ROV dentro del permiso de documentación gráfica EXPT. DPHP-477/2019, como parte de las actividades formativas de los alumnos del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática de la Universidad de Cádiz. Responsable de la actividad arqueológica: Felipe Cerezo Andreo.

**Figura 16.** Solicitud presentada a la Capitanía Marítima de Algeciras-La Línea para un trabajo con ROV en la zona de La Ballenera (Algeciras). Implica operación subacuática y sobre el Patrimonio Histórico Subacuático



ASTO: EMPLEO VEHICULO SUBMARINO DE USO CIVIL. UNIVERSIDAD DE CADIZ

1. SOLICITUD RELATIVA A PRÁCTICAS DE ENTRENAMIENTO A BORDO DEL BUQUE UCADIZ EN EL MANEJO DE ROV DE LOS ALUMNOS DEL MÁSTER DE ARQUEOLOGÍA NÁUTICA Y SUBACUÁTICA DE LA UNIVERSIDAD DE CÁDIZ. LAS PRÁCTICAS SE REALIZARÁN EN EL PECIO DE LA BALLENERA, ENSENADA DE GETARES (ALGECIRAS) 36 05 10.02N-005 25 55.68O.

2. PERIODO PROGRAMADO INMERSIONES: DÍAS 9, 10 Y 11 DE JUNIO DE 2021 ENTRE 9:00-14:00 HORARIO LOCAL.

3. LOS TRABAJOS SE REALIZARAN DESDE BUQUE UCADIZ, UTILIZANDO VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO A CONTROL REMOTO (ROV)?: UCA PLEXUS: CAPACIDAD MÁXIMA OPERATIVA 100 M, UMBILICAL DE 100 M.

4. SE MUESTRA CONFORMIDAD AL NO EXISTIR ACTIVIDADES PROGRAMADAS EN LA ZONA DE TRABAJOS Y PERIODO COMUNICADO.

A. CON 24 HORAS DE ANTELACION FECHA DE LA PRUEBA COMUNICARA AL POC INDICADO EN PUNTO 7.

- CONFIRMACION DE FECHA Y PERIODO DE LA PRUEBA.
- PROFUNDIDAD
- CONFIRMACION DE POSISION GEOGRAFICA DE LA PRUEBA INCLUYENDO RADIO EN MILLAS NAUTICAS CENTRADO EN ESA POSICION QUE DELIMITE LA ZONA DE OPERACION DEL SUMERGIBLE DURANTE LAS PRUEBA.

B. RESPONSABLES DE LA PRUEBA SOLICITAR EMISION DE AVISO A LOS NAVEGANTES QUE CONSIDERE NECESARIO.

5. DATOS RESPONSABLES ACTIVIDAD SUBACUATICA:

6. AL NO CONSIDERARSE UN PELIGRO PARA LA NAVEGACION SUBMARINA, DESDE ALMART NO SE EMITIRA SUBDANGER.

**Figura 17.** Respuesta positiva de ALMART a la solicitud presentada en la Figura 16

## 7. Bibliografía citada

- AEI. (2021). Orden de 19 de abril de 2021 por la que se aprueba la Convocatoria 2021 de Ayudas a Proyectos de I+D+i en Líneas Estratégicas, en colaboración público-privada.
- ACOSTA, G., CURTI, H., CALVO, O., ROSSI, S. (2008). Some issues on the design of a low-cost autonomous underwater vehicle with an intelligent dynamic mission planner for pipeline and cable tracking. En: Inzartsev, A. (Ed.), Underwater Vehicles, InTech 1, 1-19.
- ANTONELLI, G., FOSSEN, T.I., YOERGER, D.R. (2008). Underwater Robotics. En: Siciliano, B., Khatib, O. (Eds.), Springer Handbook of Robotics, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 44, 987-1008.
- BERTRAM, V. (2008). Unmanned surface vehicles—A survey. En: Proceedings of Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark.
- BREIVIK, M., HOVSTEIN, V.E., FOSSEN, T. I. (2008). Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles. Modelling, Identification and Control 29(4), 131-149.



- BREIVIK, M. (2010). Topics in guided motion control of marine vehicles. Norwegian University of Science and Technology (Ph.D. Thesis).
- BV. (2017). Bureau Veritas, Guidelines for Autonomous Shipping, December 2017. (En línea: [https://www.bureauveritas.jp/news/pdf/641-NI\\_2017-12.pdf](https://www.bureauveritas.jp/news/pdf/641-NI_2017-12.pdf)).
- CACCIA, M., BONO, R., BRUZZONE, G., SPIRANDELLI, E., VERUGGIO, G., STORTINI, A. M. (2005). Sampling sea surfaces with SESAMO: An autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (3), 95–105.
- CACCIA, M., BIBULI, M., BONO, R., BRUZZONE, G., BRUZZONE, G., SPIRANDELLI, E. (2007). Unmanned surface vehicle for coastal and protected waters applications: The Charlie Project. *Marine Technology Society Journal* 41(2), 62–71.
- CACCIA, M., BIBULI, M., BONO, R., BRUZZONE, G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle. *Autonomous Robots* 25(4), 349–365.
- FOSSEN, T. (2002). Marine Control Systems. Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, Trondheim, Norway.
- HUVENNE, V.A.I., ROBERT, K., MARSH, L., LO IACONO, C., LE BAS, T., WYNN, R.B. (2018). ROVs and AUVs. En: *Submarine Geomorphology*, Micallef, A., Krastel, S., Savini, A. (Eds.), Springer International Publishing: Cham, 93–108.
- JUNG, S., KIM, K., MYUNG, H. (2017). Development of algal bloom removal system using unmanned aerial vehicle and surface vehicle. *IEEE Access* 5, 22166–22176.
- KARIMANZIRA, D., JACOBI, M., PFUETZENREUTER, T., RAUSCHENBACH, T., EICHHORN, M., TAUBER R., AMENT C. (2014). First testing of an AUV mission planning and guidance system for water quality monitoring and fish behaviour observation in net cage fish farming. *Information Processing in Agriculture* 1(2), 131–140.
- KIENCKE, U., NIELSEN, L., SUTTON, R., SCHILLING, K., PAPAGEORGIOU, M., ASAMA, H. (2006). The impact of automatic control on recent developments in transportation and vehicle systems. *Annual Reviews in Control*, 30(1), 81–89.
- KUCIK, D. (2004). U.S. Patent n°. 6,712,312. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- LIU, Z., ZHANG, Y., YU, X., YUAN, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control* 41, 71–93.

- LLR. (2017). Lloyd's Register, Design Code for Unmanned Marine Systems, Febrero 2017 (En línea: <https://www.cdinfo.lr.org/information/documents/ShipRight/Design%20and%20Construction/Additional%20Design%20Procedures/Design%20Code%20for%20Unmanned%20Marine%20Systems/Design%20Code%20for%20Unmanned%20Marine%20Systems.%20February%202017.pdf>).
- LNM. (2014). Ley 14/2014, de 24 de julio, de navegación marítima, BOE núm. 180, de viernes 25 de julio de 2014, sec. I., pág. 59193- 59311.
- LPEMM. (2011). Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, BOE núm. 253, de jueves 20 de octubre de 2011, sec. I., pág. 109456-109710.
- LPHI. (2007). Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía, BOJA núm. 248, de 19 de diciembre de 2007 y BOE núm. 38, de 13 de febrero de 2008.
- MAJOHR, J., BUCH, T. (2006). Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin MESSIN. IEE Control Engineering Series 69, 329–352.
- MANLEY, J.E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. En: Proceedings of IEEE International Conference on OCEANS, 1–4.
- MURPHY, R.R., STEIMLE, E., GRIFFIN, C., CULLINS, C., HALL, M., PRATT, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane Wilma. Journal of Field Robotics 25(3), 164–180.
- NAEEM, W., XU, T., SUTTON, R., TIANO, A. (2008). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 222 (2), 67–79.
- PASTORE, T., DJAPIC, V. (2010). Improving autonomy and control of ASV in port protection and mine countermeasure scenarios. Journal of Field Robotics 27(6), 903–914.
- PATEL, R. (2006). Surveillance of marine resources by use of stationary platforms and Autonomous Underwater Vehicle (AUV). NTNU, Doctoral Thesis.
- RASAL, K. (2013). Navigation and control of an automated SWATH surface vessel for bathy- metric mapping. Santa Clara University, Ph.D. thesis.
- RAND Corporation. (2013). National Defense Research Institute, U.S. Navy Employment Options for Unmanned Surface Vehicles (USVs).
- ROBERTS, G.N., SUTTON, R. (2006). Advances in unmanned marine vehicles. The Institution of Engineering and Technology (Eds.).

- ROMAN, C., MATHER, R. (2010). Autonomous underwater vehicles as tools for deep-submergence archaeology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 224(4), 327-340.
- SGGMMI. (2015). Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general. Subdirección General de Gestión de la Movilidad del Ministerio del Interior del Gobierno de España en su Instrucción 15/V-113, 13 de noviembre de 2015.
- SVEC, P., GUPTA, S.K. (2012). Automated synthesis of action selection policies for unmanned vehicles operating in adverse environments. *Autonomous Robots* 32(2), 149-164.
- SVEC, P., THAKUR, A., RABOIN, E., SHAH, B. C., GUPTA, S.K. (2014). Target following with motion prediction for unmanned surface vehicle operating in cluttered environments. *Autonomous Robots* 36(4), 383-405.
- VANECK, T.W., RODRIGUEZ-ORTIZ, C.D., SCHMIDT, M.C., MANLEY, J.E. (1996). Automated bathymetry using an autonomous surface craft. *Navigation* 43(4), 407-417.
- VAN HOOYDONK, E. (2014). The law of unmanned merchant shipping – an exploration. *The Journal of International Maritime Law* 20, 403-423.
- WANG, W., ENGELAAR, R., CHEN, X., CHASE, J. (2009). The state-of-art of underwater vehicles - theories and applications. *Mobile Robots - State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*, X.Q. Chen, Y.Q. Chen and J.G. Chase (Eds.), InTech.
- WYNN, R.B., HUVENNE, V.A.I., LE BAS, T.P., MURTON, B.J., CONNELLY, D.P., BRIAN, J.B., RUHL, H.A., MORRIS, K.J., PEAKALL, J., PARSONS, D.R., SUMNER, E.J., DARBY, S.E., DORRELL, R.M., HUNT, J.E. (2014). Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology* 352, 451-468.
- YUH, J. (2000). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots* 8(1), 7-24.



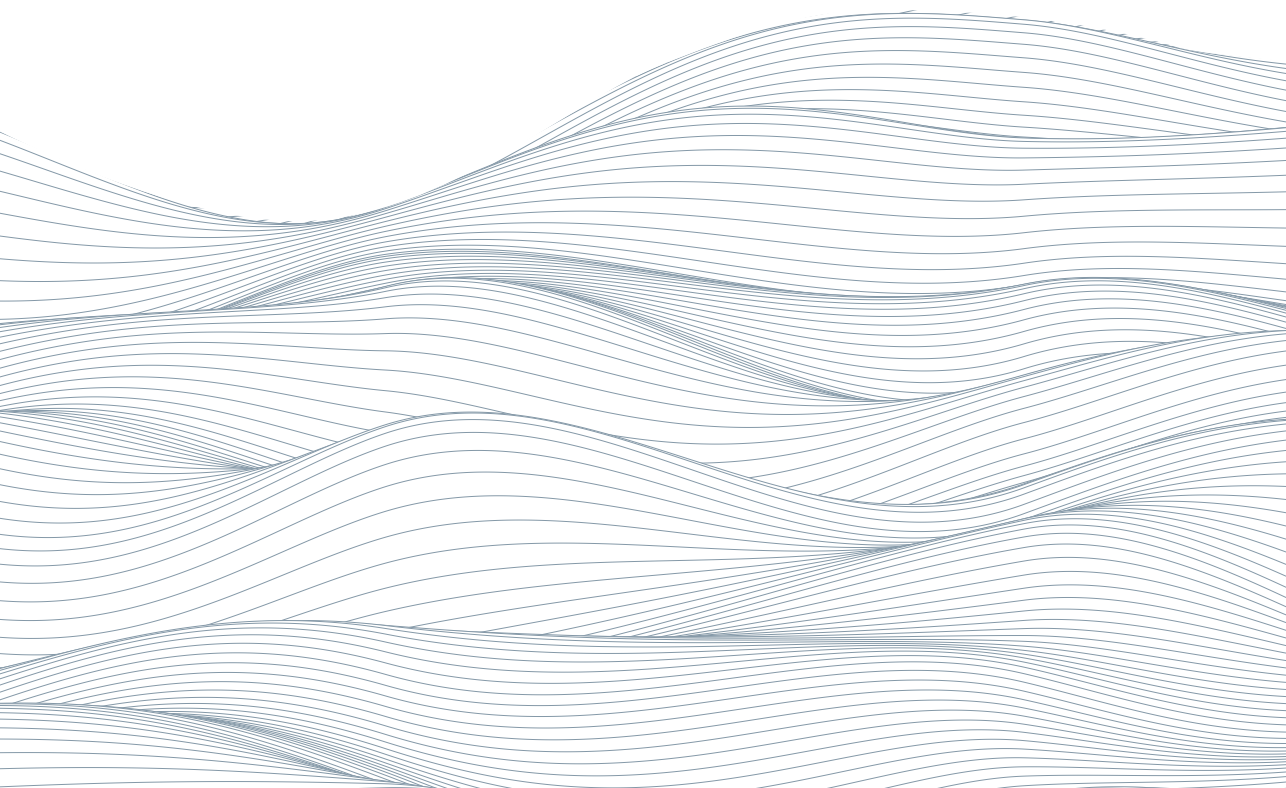
# 02.

## El uso de sistemas aéreos no tripulados en la investigación en zonas costeras

L. Barbero González <sup>1</sup> | J.A. López Ramírez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Campus Universitario de Puerto Real, Universidad de Cádiz. E-mail: [luís.barbero@uca.es](mailto:luís.barbero@uca.es)

<sup>2</sup> Dpto. de Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Campus Universitario de Puerto Real, Universidad de Cádiz. E-mail: [juanantonio.lopez@uca.es](mailto:juanantonio.lopez@uca.es)



## Sumario:

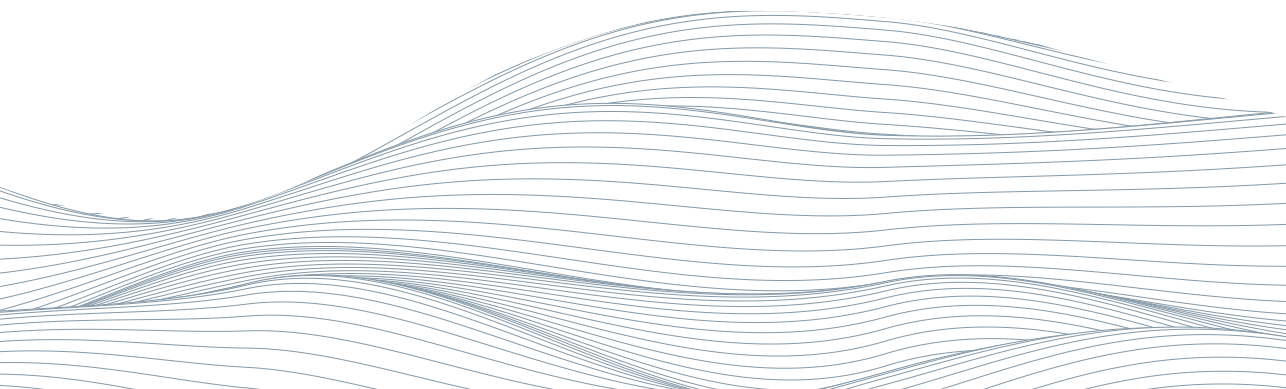
1. Introducción: uso de drones en investigación costera
2. Tipología de drones aéreos
3. Sistemas de propulsión
4. Sistemas de alimentación de energía
5. Introducción a los sensores embarcados en UAS
6. Fotogrametría con UAV
  - 6.1. Fotogrametría digital
  - 6.2. Fotogrametría digital sin apoyo en tierra
  - 6.3. Fotogrametría digital mediante georreferenciación directa (DG)
7. Sensores LIDAR
8. Sensores multiespectrales e hiperespectrales
9. Sensores térmicos
10. Sistemas de muestreo de aguas y otros sensores de interés en investigación costera
11. Bibliografía

## Resumen

En el presente capítulo se realiza una revisión del estado del arte de los estudios de dinámica en costas para pasar a continuación a abordar tanto los tipos de plataformas, sistemas de motorización y de energía que se pueden usar, así como los principios en los que se basa la fotogrametría y que son claves a la hora de elegir el sistema de georreferenciación a bordo del UAV. Finalmente se presenta un resumen de los principales sensores que se pueden embarcar en un UAV y que son de interés en sistemas costeros y litorales.

## Resumo

Neste capítulo, é feita uma revisão do estado da arte dos estudos de dinâmica costeira para, em seguida, abordar tanto os tipos de plataformas, motorização e sistemas energéticos que podem ser utilizados, como os princípios em que são utilizados com base em fotogrametria e que são fundamentais na escolha do sistema de georreferenciamento a bordo do VANT. Por fim, é apresentado um resumo dos principais sensores que podem ser embarcados em um VANT e que são de interesse em sistemas costeiros e litorâneos.

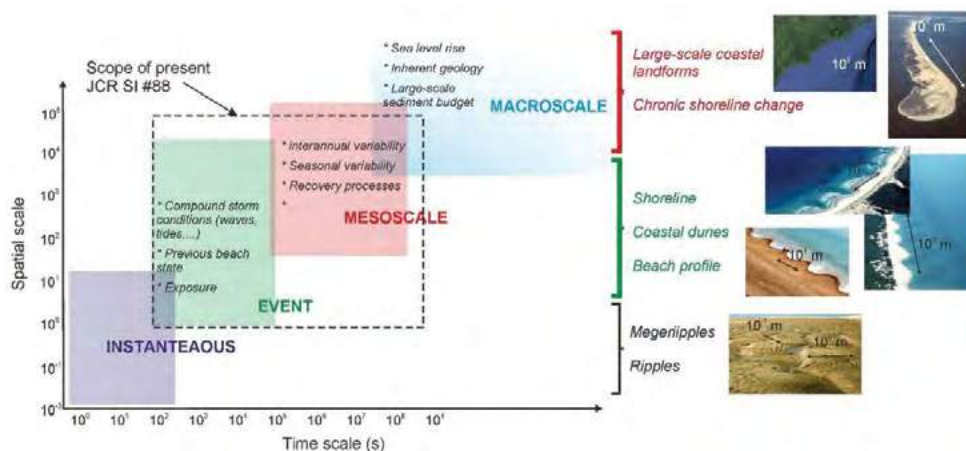


## 1. Introducción:

### uso de drones en investigación costera

Los tres principales sistemas naturales en la superficie de la tierra, la atmósfera, el océano y la superficie terrestre interactúan entre sí. Los procesos que operan en estos tres sistemas son responsables de dar forma a la zona costera, y la interacción entre los tres diferentes conjuntos de procesos hace que la zona costera sea extremadamente dinámica.

La zona costera también es una zona de transferencia de material de la superficie terrestre al sistema oceánico, con sedimentos erosionados por ríos, glaciares, etc., que se trasladan a la playa y cerca de la costa y, en última instancia, algunos llegan hasta el fondo marino. Además de su significado geomorfológico, la zona costera es particularmente importante desde una perspectiva humana. Una gran proporción de la población mundial se concentra en la zona costera, incluidas casi todas las ciudades principales. La zona costera se utiliza para la pesca, el transporte, el ocio, la eliminación de desechos, etc. y es potencialmente una fuente de energía proveniente de las mareas y el oleaje. Muchas de estas actividades representan una amenaza ambiental para los sistemas costeros, tanto físicos y biológica, a través de la contaminación, la sedimentación, el dragado, el relleno y una multitud de otras actividades que alteran la forma en que operan los sistemas naturales. En los últimos años ha aumentado la presión de las actividades de ocio centradas en los deportes acuáticos y la recreación a la orilla del mar. Además, los procesos naturales a menudo representan un peligro para la ocupación humana y la utilización de la zona costera a través de la acción de las olas, inundaciones, marejadas ciclónicas y erosión costera y sedimentación. Debido a las amenazas a la vida y las actividades humanas que representan tanto el impacto ambiental como los peligros naturales, existe un fuerte incentivo económico para mejorar nuestra comprensión de los procesos que operan en la zona costera para que podamos minimizar sus efectos y utilizar este conocimiento en el desarrollo de la planificación integral de la gestión de las zonas costeras.

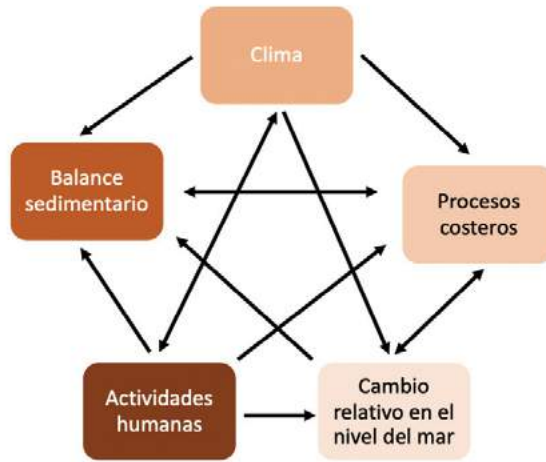


**Figura 1.** Escala espacial y temporal de los procesos que tienen lugar en las zonas costeras. Tomado de *Castelle y Chaumillon (2019)*

Debido a esta explotación intensiva y al mayor porcentaje de población en estas áreas, la estabilidad de los sistemas costeros se ha visto extremadamente comprometida (Wong et al. 2014). Por otro lado, las áreas costeras son uno de los entornos más dinámicos que existen en el planeta (Davis y Fitzgerald 2004) y se ven afectados por procesos continentales y marinos muy diversos (olas, mareas, corrientes oceánicas, vientos y descargas fluviales) que interactúan a diferentes escalas temporales y espaciales (figura 1). Son áreas, por lo tanto, particularmente vulnerables a los impactos relacionados con el cambio climático, en concreto con el aumento del nivel del mar y el incremento en la magnitud o frecuencia de las tormentas (Wong et al. 2014). Todas estas interacciones pueden dar lugar a procesos de erosión costera que a menudo tienen graves consecuencias en las costas del mundo (Davis y Fitzgerald 2004).

Como consecuencia, es necesario realizar estudios de seguimiento de las costas de forma continua y sostenible. El conocimiento de la respuesta de las áreas litorales (especialmente las costas arenosas) frente a los factores y los procesos que causan cambios morfológicos en las mismas es crucial para analizar en última instancia su evolución a corto, mediano y largo plazo (Stive et al. 2002; Klemas 2009). Las olas y corrientes que se aproximan oblicuamente a la costa y oblicuas derivadas de la acción de las tormentas son responsables de los cambios más significativos en la morfología costera (Davis y Fitzgerald 2004). De hecho, las tormentas son los procesos naturales más dominantes responsables de la erosión de las playas a corto plazo, y de su retirada a largo plazo hacia el interior (Sallenger 2000). Cada régimen crea magnitudes y patrones únicos y distinguibles de procesos netos de erosión / acreción.





**Figura 2.** Interacciones entre el clima, las actividades humanas, los cambios en el nivel del mar, el balance sedimentario y los procesos que ocurren en las costas. Modificado de Morton (1977)

Los cambios morfológicos en las costas derivados de las tormentas y la evolución costera en general se han registrado y monitorizado mediante numerosas técnicas de teledetección: imágenes de satélite (Mason et al. 1995; Sekovski et al. 2014), fotogrametría aérea en aeronaves tripuladas (Fisher y Overton 1994; Schwarzer y col. 2003; Puig et al., 2014), o LIDAR (Sallenger et al. 2003; Armaroli et al. 2012; Durán et al. 2016), combinados con los métodos basados en tierra mediante instrumentos de topografía como los sistemas de posicionamiento global diferencial cinemático en tiempo real (RTK-DGPS) (Nebel, Trembanis y Barber 2012) o el escáner láser terrestre (Hoffmeister et al. 2012; Almeida et al. 2014). Sin embargo, dado que los fenómenos costeros actúan en rangos de escala temporal y espacialmente amplios (Wieneke 1991; Short 1999; Schwarzer et al. 2003), al analizar la idoneidad de una técnica frente a otra, es necesario encontrar el equilibrio correcto entre el tiempo, las capacidades de cobertura espacial y espacial que ofrece cada método, así como la precisión de los resultados obtenidos y los costos asociados, que también dependen del objetivo del estudio. Por ejemplo, las imágenes satelitales o fotografías aéreas pueden proporcionar información de amplias extensiones a un costo asequible, pero los datos pueden estar limitados en precisión y resolución temporal. Por el contrario, la fotogrametría aérea y el LIDAR pueden ser suficientes para estas últimas limitaciones, pero a costos económicos más elevados (García-López et al. 2018; Casella et al. 2016). Se puede encontrar una comparación basada en el rango, la precisión, la eficiencia y el costo entre diferentes métodos en Song y Liu (2009).

A medida que la tecnología evoluciona, se ponen a disposición de los investigadores y gestores nuevos métodos de seguimiento sin duda ventajosos en comparación con los mencionados anteriormente. Es el caso del uso conjunto de sistemas aéreos no tripulados (UAS) para obtener imágenes de alta resolución espacial y temporal y de algoritmos de Estructura a partir del movimiento (Structure from Motion, SfM) para la generación de productos fotogramétricos de precisión. El enfoque UAS y SfM ofrece una mayor flexibilidad operativa y versatilidad en áreas más amplias; Además, constituye una forma más fácil, más rápida y de menor costo de obtener fotografías cuya información en 2D permite la generación de modelos digitales de elevación (DEM) y ortomosaicos de alta calidad, con un grado considerable de automatización (Westoby et al. 2012). Como prueba de su idoneidad, muchos estudios en todo el mundo han aplicado ya con éxito metodologías basadas en UAS y SfM en zonas costeras. Las principales aplicaciones se han dedicado a la adquisición de topografía de alta resolución de la costa (Mancini et al. 2013; Scarelli et al. 2016) y dunas (Barbero et al. 2017), para el desarrollo de planes de monitorización costera (Pérez-Alberti y Trenhaile 2015; Gonçalves y Henriques 2015; Turner et al., 2016; Casella et al. 2016), y detección de cambios costeros (Harwin y Lucieer 2012; Turner et al., 2016; Matsuba et al., 2017). Además, los UAS también se han implementado para propósitos más específicos, como pueden ser el cálculo de los parámetros de marea (Casella et al. 2014), la identificación y clasificación de diferentes zonas costeras (Papakonstantinou et al., 2016), la determinación de la estabilidad de acantilados (Barlow et al. 2017), e incluso la observación de las corrientes de resaca (Benassai et al. 2017).

## 2. TIPOLOGÍA DE DRONES AÉREOS

Los principales aspectos que distinguen a los distintos tipos de dron son fundamentalmente el propósito operativo del vehículo, los materiales utilizados en su fabricación y la complejidad y costo del sistema de control. Los drones varían ampliamente en tamaño y configuración. Por esta razón, a menudo es útil clasificar los drones en función de las capacidades que tiene para realizar una misión (Hassanallan & Abdelkelf, 2017). Como se indica en la Fig. 4, los drones pueden considerarse HTOL (aterrizaje de despegue horizontal), VTOL (aterrizaje de despegue vertical), híbrido modelo (ala basculante, rotor basculante, cuerpo basculante y ventilador canalizado), helicóptero, *heliwing*, y tipos no convencionales. En la Figura 3, se recoge una clasificación de diferentes tipos de vehículos aéreos no tripulados (Hassanallan & Abdelkelf, 2017).

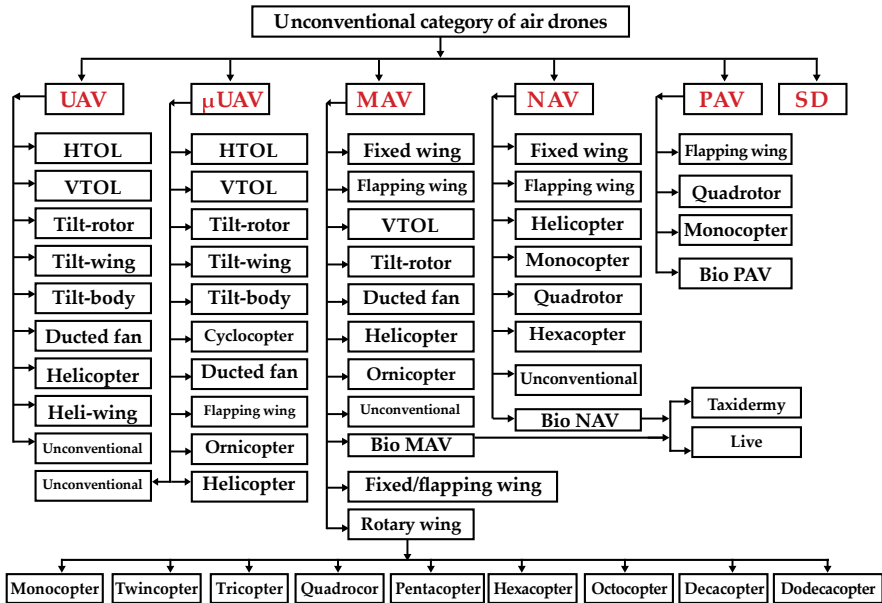


Figura 3. Tipología de drones según (Hassanallan & Abdelkelf, 2017)

### 3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN

Todas las configuraciones de drones presentadas necesitan generar movimiento. Por lo tanto, hay diferentes formas de hacer volar un dron. Los sistemas de propulsión de los drones difieren según sus formas y sus modos de vuelo. Para algunos tipos de drones, como los de ala fija, el sistema de propulsión suele ser similar al de los aviones convencionales. Por lo tanto, estos drones no necesitan un sistema de propulsión único. Por otro lado, algunos tipos de drones requieren nuevas tecnologías de y necesitan nuevos diseños y conceptos. En los sistemas de propulsión, la potencia y la densidad de energía son los dos factores más importantes. El sistema de propulsión para un dron es proporcional al peso, tamaño, misión, resistencia, etc. El sistema seleccionado debe proporcionar ahorro de combustible (gas o batería), bajo peso, tamaño pequeño y alta confiabilidad. En general, para todo tipo de drones, los sistemas de propulsión (motores, combustibles y actuadores) típicamente constituyen el 40-60% de su peso de despegue. Para los drones de ala fija, inclinable y giratoria, existen diferentes tipos de sistemas de propulsión que pueden utilizarse, incluidos motores de combustible (gas, motor de explosión, motor a reacción, motor de turbina de gas, motor Wankel, motor inyectado, etc.) y motores eléctricos (con y sin escobillas). Entre los motores de combustible, los motores de turbina de

gas son superiores a otros motores alternativos debido a su mayor relación potencia / peso 3–6 veces más que motores de pistón) y confiabilidad. Estas turbinas de gas los motores también pueden funcionar durante mucho tiempo en comparación con los motores de pistón de explosión. Sin embargo, debido al alto costo y la falta de disponibilidad de pequeños motores de turbina de gas de alto rendimiento, los motores en los UAV actuales suelen ser de otro tipo. Para drones ligeros, se pueden considerar cuatro opciones de propulsión: baterías, pilas de combustible, microdiésel y micro turbinas de gas. Los últimos tres tipos suelen tener el mismo consumo de combustible por unidad de potencia, pero entre ellos los motores de micro turbina de gas son los más pequeños y ligeros. En cualquier caso, la forma más común y fácil de volar es utilizar motores eléctricos que son altamente fiables, muy eficientes y con una capacidad de control. Los dos tipos de motores eléctricos que se utilizan en drones son con y sin escobillas, aunque dado que estos últimos son más pequeños y ligeros que los primeros, se consideran mucho más apropiados. Además del pequeño tamaño y bajo peso, otra ventaja de motores sin escobillas es la falta de pérdidas de hierro que se reflejan en una mayor eficiencia. Son el sistema de propulsión más adecuado para los drones de ala giratoria y fija porque se utiliza más de la mitad de la energía eléctrica para generar elevación.

## 4. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA

Los drones con motor de explosión suelen usar combustibles fósiles varios, como gasolina, metano o incluso hidrógeno. Sin embargo, en aviones no tripulados pequeños, se utilizan motores eléctricos alimentados por baterías que proporcionan la potencia requerida. Más del 90% de estos drones utilizan baterías de polímero de Litio (Li-PO) ya que son la mejor opción de energía debido a su bajo peso. Los combustibles fósiles pueden producir más energía que las baterías, pero los motores de combustión interna disponibles para usar en estos drones tienen una eficiencia extremadamente baja, y el uso de combustible puede causar problemas de estabilidad para los micro vehículos aéreos aparte de vibraciones que, para determinadas aplicaciones como puedan ser el uso de un LIDAR, son inaceptables. Uno de los problemas que pueden tener los drones alimentados con baterías es que no pueden volar mucho más allá de 30 minutos. Sin embargo, la micro pila de combustible está actualmente en desarrollo y esta tecnología que aún no se utiliza en drones de pequeño tamaño, puede en un futuro dar tiempos de vuelo mucho más altos.

## 5. INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES EMBARCADOS EN UAS

Sin duda, la parte más importante de un sistema de vehículo aéreo no tripulado es el sensor o sensores que se lleve a bordo en función del tipo de trabajo y de resultados que se quiere obtener. El dron no será más que la plataforma más adecuada posible para transportar dicho sensor y hacerlo operativo para la misión específica. Por tanto, si la elección de la plataforma es importante en función del tipo de trabajo que se pretende realizar, mucho más lo es la elección del sensor que va a proporcionar los datos (Figura 4).

Los sensores se pueden clasificar de muchas formas. Distinguiremos en primer lugar los sensores pasivos de los activos. Los primeros se limitan a recoger la radiación reflejada por los objetos que observa mientras que los segundos emiten una señal y recogen datos de la interacción de la misma con los objetos. Un ejemplo de estos últimos podría ser lo que se denomina un LIDAR (acrónimo inglés de Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging). Es un dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Esto nos permite construir una nube de puntos en tiempo real o casi real.



**Figura 4.** Distintos tipos de sensores embarcados en drones. De izquierda a derecha y arriba abajo: Sensor RGB, pantalla de control de sensor térmico; sensor multi-espectral de cuatro bandas y RGB; sensor multispectral de seis bandas; sensores térmicos (elaboración propia)

Los detectores pasivos los podemos encontrar de varios tipos: sensores químicos, sensores de radiación electromagnética, sensores de sonido, sensores de calor, y magnéticos. Para las aplicaciones de dinámica costera de interés en el proyecto KTTSeadrones, son los sensores de radiación electromagnética en los que nos vamos a centrar.

Una ventaja importante de la teledetección es que es posible obtener información de cualquier parte de la superficie de la Tierra analizando el contenido espectral de las imágenes. En la teledetección desde satélites y aviones es común trabajar con varias bandas de imágenes, cubriendo diferentes partes del espectro electromagnético utilizando equipos de gran rendimiento y calidad de imagen, pero con altos costos. Las cámaras multispectrales e hiperspectrales se pueden utilizar para esos objetivos. Estos dispositivos se basan en instrumentos llamados espectrómetros de imágenes. El desarrollo de estos sensores complejos se basa en la espectroscopia y la imagen remota. Sin embargo, los últimos avances asociados a las tecnologías de drones han permitido el desarrollo de sensores con tamaños y pesos reducidos de tal manera que se puedan utilizar a bordo de estos aviones. Aunque sus rendimientos no son tan altos como los utilizados en satélites y aviones, la combinación con la alta resolución espacial de los drones compensa esa desventaja.

Los sensores hiperspectrales sacrifican la resolución espacial a cambio de la resolución espectral y pueden proporcionar una medida de respuesta espectral en cientos de bandas espectrales estrechamente definidas simultáneamente. Los avances recientes en la miniaturización del sensor, junto con las bajas alturas típicas a las que vuelan los drones, conducen a resultados hiperspectrales con resoluciones de suelo de 0.2 m o incluso menores (Uto et al, 2013.). El uso de drones permite la recopilación generalizada de datos de imágenes hiperspectrales. Dichos estudios pueden proporcionar información detallada sobre la salud de la vegetación y también pueden usarse como base para cartografía especies de vegetación, (Hruska et al., 2012), lo que en investigación costera sobre estabilización de dunas con vegetación o cartografía de especies invasoras puede ser muy interesante.

Hasta hace poco, la baja capacidad de carga útil de los drones y el costo de los dispositivos de imágenes miniaturizadas de alta calidad obligaban a los usuarios a utilizar cámaras de consumo, típicamente diseñadas para registrar solo la reflectancia espectral en el rango visible (Lebourgeois et al., 2008). Pero en los últimos años, y gracias a los importantes desarrollos llevados a cabo con los nuevos sensores multispectrales, estos se pueden usar a bordo del dron. Debido a los tamaños más pequeños, sus rendimientos

son limitados y tienen resoluciones más bajas que las cámaras RGB. Estos sensores multiespectrales tienen múltiples bandas y pueden tener rangos espectrales ajustables. Muchos autores han considerado el uso de estos sensores para muchos estudios diferentes: salud de los cultivos, variables fenológicas de las plantas, contenido de agua de las plantas, etc. (Kelsey y Lucieer, 2012; Turner et al., 2011 y Berni et al. 2009). En este sentido, se pueden producir varios índices de vegetación utilizando diferentes longitudes de onda de estos sensores. El NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado) es un índice bien conocido relacionado con la presencia de vegetación verde viva. Usando el infrarrojo cercano y las longitudes de onda rojas, es posible obtener mapas que muestran diferentes estados vegetativos de las plantas en un cultivo. Se volverá a este índice más adelante.

La importancia de utilizar imágenes multiespectrales e hiperespectrales se basa en la posibilidad de resaltar las diferencias en terrenos, suelos y superficies de drones gracias a su alta resolución espacial. En ese sentido, el uso de estas tecnologías puede ser útil en estudios costeros debido al hecho de que es posible establecer diferencias en las plantas, o incluso en los estados vegetativos de la planta en un cultivo que crece en estos sitios. En ese caso, las plantas pueden exhibir comportamientos diferentes de las plantas más distantes debido a la presencia de diferentes materiales en la zona de la raíz. Las plantas reaccionan a la presencia de estos materiales y eso puede ser suficiente para modificar la respuesta espectral de las hojas.

La termografía es un campo especialmente adecuado para los drones. Las cámaras térmicas forman imágenes de la radiación infrarroja. Tradicionalmente, los dispositivos de imagen térmica requerían sistemas de enfriamiento grandes y costosos. Pero los nuevos desarrollos de sensores térmicos que utilizan nuevos materiales y diseños pueden funcionar a temperatura ambiente. Estos tienden a ser considerablemente más pequeños y menos costosos que los sensores de imagen térmica termoestabilizados tradicionales, lo que hace que se incluyan como parte de una carga útil UAS junto con una cámara normal. Sin embargo, a pesar de estos avances tecnológicos, las cámaras termográficas siguen siendo relativamente caras, y esto ha limitado su aplicación hasta la fecha. Las cámaras térmicas pueden funcionar midiendo cambios de temperatura (cámaras más baratas) o temperaturas absolutas (información radiométrica completa, cámaras más caras). En este último, es posible proporcionar toda la información digital para crear ortomosaicos, modelos de nubes de puntos, etc.

Las imágenes térmicas se han utilizado ampliamente en muchas áreas del conocimiento: biología, ingeniería, medio ambiente, etc. Un uso

importante hoy en día es en la agricultura de precisión: medir la temperatura de las plantas y su relación con el estrés hídrico (Berni et al., 2009). En los cuerpos de agua superficiales, podría desempeñar un papel importante en pesquerías, en el descubrimiento de derrames ilegales, etc, ya que probablemente tendrían temperaturas diferentes a las de las aguas receptoras.

La combinación de sensores multiespectrales y térmicos muestra un potencial importante en las aplicaciones de UAS para la arqueología gracias a su alta resolución espacial, rentabilidad y disponibilidad.

A continuación, se van a desarrollar más detenidamente el uso de estos sensores y las técnicas asociadas a los mismos en sistemas costeros.

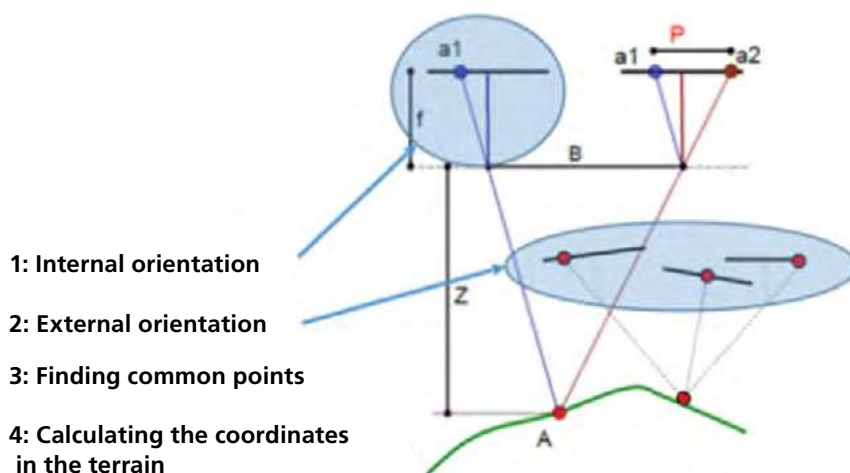
## 6. FOTOGRAMETRÍA CON UAV

### *6.1. Fotogrametría digital*

Como se indicó anteriormente, la tecnología drones ha mejorado en gran medida la adquisición de datos de cualquier lugar de interés. La fotogrametría usando drones mediante algoritmos de SfM permite la generación de nubes de puntos 3D detalladas de una escena fotografiada, únicamente a partir de la información bidimensional contenida en las imágenes obtenidas con el de dron.

Los algoritmos de SfM analizan el contenido visual de las imágenes en busca de características comunes para que coincidan en todos los conjuntos de datos de imágenes, con la ayuda de algoritmos como el algoritmo de transformación de características invariables de escala (SIFT). Estos puntos coincidentes, junto con la información de los parámetros externos de la cámara (posición y orientación) adquiridos en cada toma se utilizan para reconstruir las diferentes poses de la cámara y la trayectoria seguida por el UAS durante el vuelo, así como para triangular el 3D aproximado coordenadas de estos puntos coincidentes en un sistema de coordenadas arbitrario (James y Robson 2014). Posteriormente, la geometría de la cámara obtenida se calibra y optimiza con la ayuda de los parámetros internos de la cámara grabados en cada imagen (distancia focal, tamaño del sensor y parámetros de distorsión) en un proceso iterativo, que deriva en el cálculo de una nube de puntos 3D poco densa que representa la escena inicialmente fotografiada, pero que luego puede ser refinada y densificada produciendo Modelos Digitales de Superficie (DSM), Modelos Digitales de Terreno (DTM) y / o ortomosaicos (Figura 5).

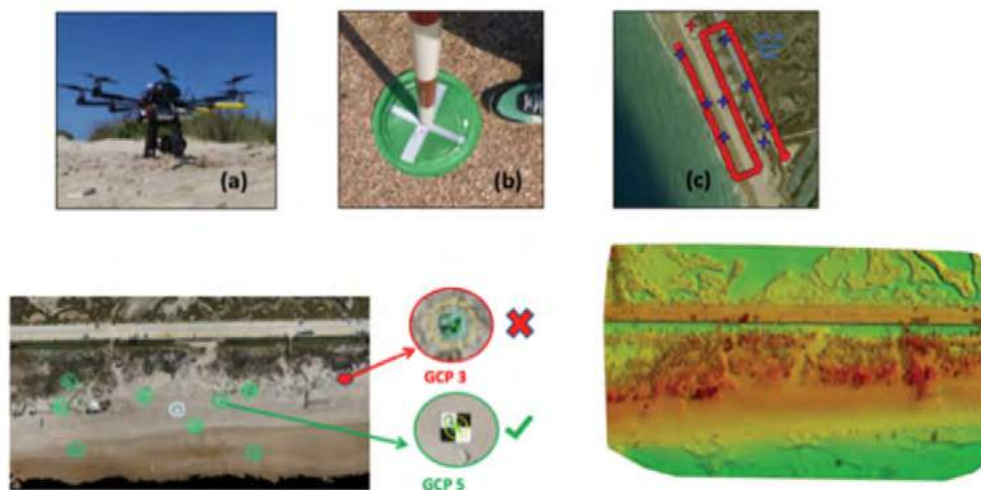




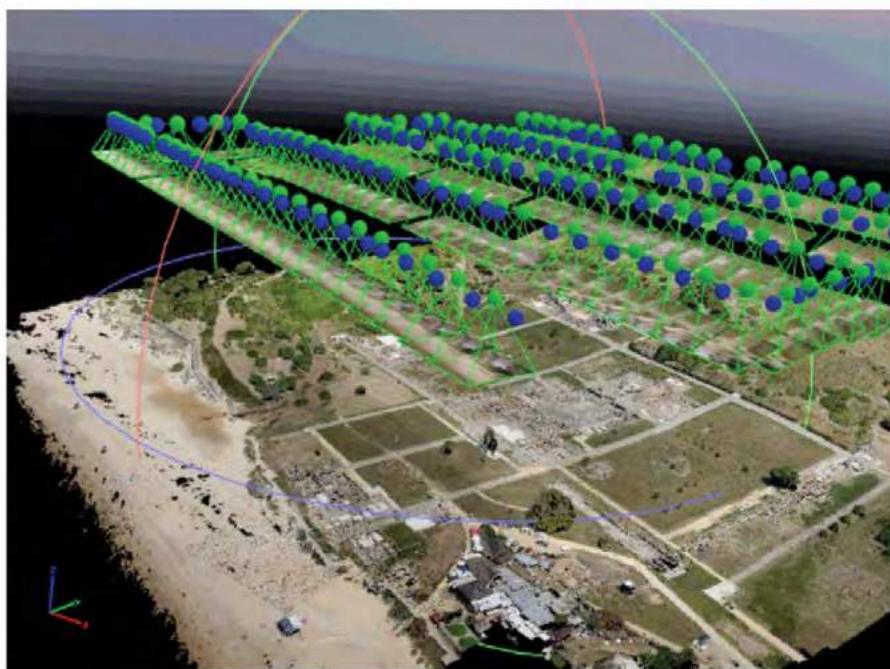
**Figura 5.** Principio general usado en fotogrametría digital desde drones

Sin embargo, la calidad de la nube de puntos depende de la calidad de las imágenes obtenidas, que a su vez depende de la selección correcta de una serie de parámetros que deben seleccionarse cuidadosamente a priori durante la planificación del vuelo. Como se puede deducir, esto último es crucial para el éxito de cualquier proyecto fotogramétrico. Por un lado, la altitud de vuelo y la distancia focal de la cámara influyen en el tamaño de los píxeles en las imágenes resultantes, que determinan la precisión horizontal y vertical de los modelos 3D finales. En cualquier distancia focal fija determinada, el tamaño de píxel aumenta proporcionalmente con la altura de vuelo. Por otro lado, las imágenes adquiridas deben mantener un adecuado nivel de superposición frontal y lateral de tal manera que cada punto sea visible y coincida con la mayor cantidad posible de imágenes circundantes, por lo que la calibración de la cámara y la triangulación posterior serán más precisas; y finalmente se obtiene la reconstrucción de nubes de puntos 3D de mayor calidad y modelos derivados (Figura 7).

Además de la cámara y los parámetros de vuelo, la distribución uniforme de los puntos de control en tierra (GCP) sobre el área a estudiar es altamente deseable para posicionar, orientar y escalar las nubes de puntos y los modelos en un sistema de coordenadas deseado, si es que el equipo no está dotado de un sistema de GPS RTK o PPK como veremos más adelante.



**Figura 6.** (a) Multirrotor con sensor RGB preparado para tomar imágenes en un sector costero. (b) Posicionamiento de puntos de control en tierra (GCP); (c) Patrón de vuelo y posición de las fotografías tomadas; (d) Ajuste de los GPC durante el proceso de elaboración de los productos fotogramétricos; (e) Modelo digital obtenido mediante procesado con software Pix4D



**Figura 7.** Ejemplo de un procesado fotogramétrico con situación de las imágenes y la nube de puntos 3D generada y coloreada a partir de imágenes RGB en un sector de la costa de Cádiz



**Figura 8.** Detalla de un ortomosaico realizado en un sector de 4 km de la costa de Cádiz, en el que puede observarse que, si la lámina de agua es transparente y el fondo contiene información visual, es posible reconstruir no solo la topografía de la parte emergida sino también parte del sector intermareal o submareal

Como se puede deducir de lo anterior, la fotogrametría basada en el uso conjunto de algoritmos SfM con imágenes obtenidas con drones reduce los tiempos y costos de adquisición de datos topográficos y aumenta la calidad de los resultados. Además, este enfoque es capaz de llegar a sitios inaccesibles o peligrosos, es un método casi no intrusivo que previene daños, y también permite el archivo de los modelos en caso de posible destrucción futura de estructuras costeras, acantilados, etc.

## *6.2. Fotogrametría digital sin apoyo en tierra*

Como acabamos de mencionar, la correcta y precisa georreferenciación de los productos obtenidos mediante fotogrametría digital usando imágenes de drones y algoritmos de SfM depende en gran medida del correcto y altamente preciso posicionamiento de los puntos de apoyo en tierra (GCP). Esto provoca que, si se quieren realizar estudios a una escala kilométrica de sectores costero, el esfuerzo de situación y georreferenciación de los GCP resulte completamente desproporcionado haciendo incluso inviable el estudio. Para ello se puede recurrir al uso de GPS con corrección cinemática

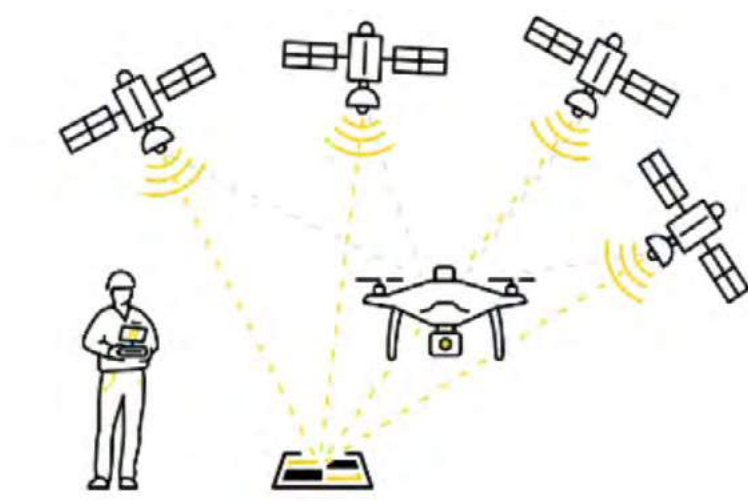
en tiempo real (RTK, Real Time Kinematics) o mediante post-procesado de los datos de GPS (PPK, Post Processing Kinematics).

El sistema de corrección cinemática en tiempo real (RTK) en un dron registra la información del GPS y geoetiqueta las imágenes que se capturan durante el vuelo. La ubicación del GPS se registra para el centro de la imagen. Una estación base activa en tierra envía datos brutos del GPS al dron. Posteriormente, el GPS a bordo del dron combina esa información y sus propias observaciones para determinar con precisión su posición con respecto a la base. Pero para lograr esto, el dron RTK debe permanecer conectado a la estación base mientras recopila datos. Desafortunadamente, durante los giros o en otras circunstancias, probablemente debido cambios bruscos en la orientación de la antena la señal puede perderse. Cuando esto sucede, mientras intenta volver a bloquear, los datos de geolocalización no son fiables.

Para solventar estos problemas de la georreferenciación precisa mediante GPS-RTK se puede recurrir a procedimientos de post procesado mediante tecnología GPS-PPK. La diferencia con respecto a los sistemas RTK es la forma de procesar los datos de la estación base para su corrección y precisión. Con los sistemas PPK, el dron geoetiquetará las coordenadas X, Y, Z a cada imagen en función de esa unidad GPS incorporada. Mientras esto sucede, una base también registra información sobre las posiciones, pero con una triangulación mucho más precisa (Figura 9). Una vez finalizado el vuelo, esos dos conjuntos de datos GPS se combinan con la marca de tiempo de la foto. Luego, se corrigen los datos GPS iniciales, poco precisos, lo que proporciona coordenadas geográficas muy precisas para las imágenes. Si bien las tecnologías RTK “en tiempo real” son apropiadas en algunas situaciones, los datos de vuelo posteriores al procesamiento utilizando un flujo de trabajo PPK brindan una capa adicional de fiabilidad a la obtención de datos de geolocalización de alta precisión.

### *6.3. Fotogrametría digital mediante georreferenciación directa (DG)*

Existen más recientemente otras tecnologías como la denominada georreferenciación directa (DG) que presentan una serie de ventajas sobre las tecnologías RTK o PPK. La georreferenciación directa (DG) y las soluciones PPK son dos técnicas de georreferenciación distintas. Para la fotogrametría con drones en general y la de áreas de morfología lineal, como puede ser el caso de las costas, la DG es más eficiente.



**Figura 9.** Esquema representado el uso del GPS-RTK en donde se pueden observar las comunicaciones entre el dron y la constelación de satélites y entre los satélites y la estación de tierra posicionada con precisión

La DG, como su nombre lo indica, es la capacidad de geolocalizar directamente los datos del sensor desde el aire hasta el suelo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia. La DG en su núcleo combina GNSS y tecnología inercial para producir una solución robusta de posición y orientación lo que tiene ventajas naturales sobre los sistemas que usan PPK, que son soluciones de solo posicionamiento. La DG es un precursor para la georreferenciación en sistemas LIDAR y sensores hiperspectrales, que precisan de sistemas inerciales de alta calidad para poder producir los datos. Dado que PPK solo proporciona la mitad de la solución, no se puede usar junto con LIDAR o sensores hiperspectrales.

En segundo lugar, la fotogrametría eficiente requiere el uso de la tecnología DG ya que PPK solo proporciona la posición del centro de fase de la antena que debe traducirse al origen del sensor. Si el sensor se instala en un soporte estabilizado, que ahora se ha convertido en la norma, los desfases dinámicos entre la antena GNSS y el origen del sensor deben modelarse como parte de la solución fotogramétrica. En el caso de DG, la solución GNSS del centro de fase de la antena se traduce con precisión al origen del sensor. Además, si el sensor está montado en un soporte estabilizado, la DG permite medir correctamente la posición y orientación del sensor.

La DG permite que las operaciones de vuelo y la logística sean más eficientes. Con una solución PPK, las líneas de vuelo deben planificarse y

volar con un alto grado de superposición (es decir, líneas de vuelo adyacentes muy separadas). Por lo general, una solución PPK requiere una superposición del 80% entre las líneas de vuelo adyacentes. Con la DG, las líneas de vuelo pueden volar a una vuelta lateral del 40%. Por lo tanto, la DG puede cubrir el doble del área en comparación con PPK.

Considerando el procesamiento de datos, la DG es mucho más eficiente que los sistemas PPK ya que hay una cantidad significativamente menor de imágenes para procesar. Además, PPK se basa en la coincidencia de puntos homólogos con una alta densidad como parte del proceso fotogramétrico lo que tiene sus propias limitaciones. La identificación de puntos homólogos con una alta densidad demanda lógicamente mucho tiempo de cálculo en el ordenador. Incluso con sistemas informáticos de alto rendimiento y algoritmos y software de reconocimiento de patrones de última generación, la identificación de un número muy elevado de puntos homólogos sigue siendo un cuello de botella en la cadena de procesamiento de datos fotogramétricos. Además, hay algunos casos en los que PPK no puede entregar una solución cartográfica adecuada. Esto generalmente ocurre en escenarios con bajo contenido visual como puedan ser las dunas (Barbero et al., 2017), copas de árboles, tierras de cultivo y cuerpos de agua. La DG, por otro lado, no depende de la identificación de una elevada cantidad de puntos homólogos y puede funcionar solo con unos pocos puntos por cada par de imágenes, lo que permite que los productos fotogramétricos se obtengan a una velocidad más rápida e independientemente del contenido de la escena, incluso cuando los algoritmos de coincidencia de puntos convencionales fallan.

Para aplicaciones fotogramétricas en respuesta a desastres o procesos muy dinámicos como los que ocurren en las costas y en los que pueden requerir tiempos de respuesta más rápidos, la tecnología mediante DG puede producir resultados en casi en tiempo real. Esto solo es posible ya que DG no se basa en una obtención de alta densidad de puntos homólogos para estimar los parámetros de orientación para cada imagen.

De esta forma, los drones ahora se pueden emplear actualmente para realizar mapas de regiones de forma lineal de manera muy eficiente y con la mayor precisión posible, gracias al uso de la DG. Dado que la posición y orientación de cada imagen está fácilmente disponible, se pueden volar dos líneas (con una vuelta lateral mínima) e incluso corredores de una sola tira, reduciendo así la adquisición de datos y, sobre todo, los tiempos de procesamiento computacional.



## 7. Sensores LIDAR

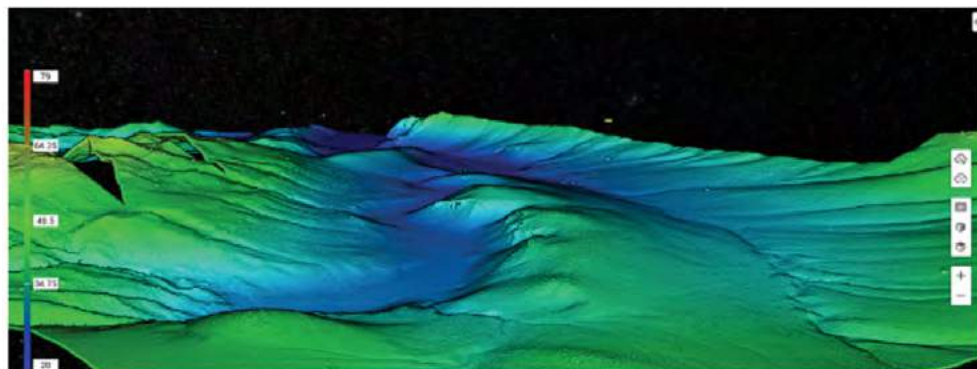
LIDAR es un acrónimo inglés para Light Imaging Detection and Range. Se trata de un método para determinar rangos (distancias) apuntando a un objeto o superficie con un láser y midiendo el tiempo que tarda la luz reflejada en regresar al receptor. También se puede usar para hacer representaciones tridimensionales digitales de áreas en la superficie terrestre y el fondo del océano variando la longitud de onda de la luz. Los sensores LIDAR se pueden instalar tanto en drones, aeronaves tripuladas y satélites para llevar a cabo levantamientos topográficos y cartográficos.

Los sensores LIDAR utilizan luz ultravioleta, visible o en el infrarrojo cercano para obtener nubes de puntos en 3D de los objetos. Las longitudes de onda varían para adaptarse al objetivo: desde aproximadamente 10 micrómetros (infrarrojo) hasta aproximadamente 250 nm (UV). Por lo general, la luz se refleja a través de la retrodispersión, a diferencia del reflejo puro que se puede encontrar con un espejo. Se utilizan diferentes tipos de dispersión para diferentes aplicaciones LIDAR: normalmente dispersión de tipo Rayleigh, dispersión de Mie, dispersión de Raman y fluorescencia (Cracknell et al., 2007).

Los sensores LIDAR embarcados en drones permiten producir nube de puntos 3-D en tiempo real y son particularmente útiles cuando las condiciones de luz ambiental son escasas o cuando el sector que se quiere cartografiar contiene poca información visual. Este es el caso de las dunas costeras, en donde, en múltiples ocasiones, debido a la escasa información visual, la fotogrametría tradicional mediante algoritmos SfM citados anteriormente fallan. En estas circunstancias el uso de sensores LIDAR representa el método más detallado y preciso para crear modelos digitales de elevación, reemplazando la fotogrametría. Adicionalmente, una de las principales ventajas en comparación con la fotogrametría es la capacidad de filtrar la vegetación del modelo de nube de puntos para crear un modelo de terreno del terreno que represente las superficies del mismo sin que contenga objetos o vegetación que oculte la superficie. Los principales productos resultantes del LIDAR aerotransportado incluyen modelos digitales de elevación (DEM) y modelos digitales de superficie (DSM). Los puntos y los puntos de tierra son los vectores de puntos discretos, mientras que DEM y DSM son cuadrículas de trama interpoladas de puntos discretos. El proceso también implica la captura de fotografías aéreas digitales que pueden utilizarse para colorear de forma real la nube de puntos obtenida (Figura 10).

Los datos de LIDAR aerotransportados se procesan utilizando diversas herramientas de software de estudio de terreno y filtrado de la nube de puntos. Los datos se interpolan a modelos digitales del terreno utilizando dicho software. El láser se dirige a la región que se pretende cartografiar y la altura de cada punto sobre el suelo se calcula restando la coordenada Z original de la elevación del modelo de terreno digital correspondiente. En base a esta altura sobre el suelo se obtienen los datos de no vegetación que pueden incluir objetos como edificios, líneas eléctricas, pájaros, insectos, etc. El resto de los puntos se tratan como vegetación y se utilizan para modelado y cartografía. Dentro de cada uno de estos productos, las métricas LIDAR se calculan calculando estadísticas como la media, la desviación estándar, la asimetría, los percentiles, la media cuadrática, etc.

Los mapas de elevación digitales de alta resolución generados por LIDAR transportados en aeronaves o drones han llevado a avances significativos en la geomorfología (en general y en la costera en particular. Las capacidades de LIDAR para detectar características topográficas sutiles en dunas o playas....



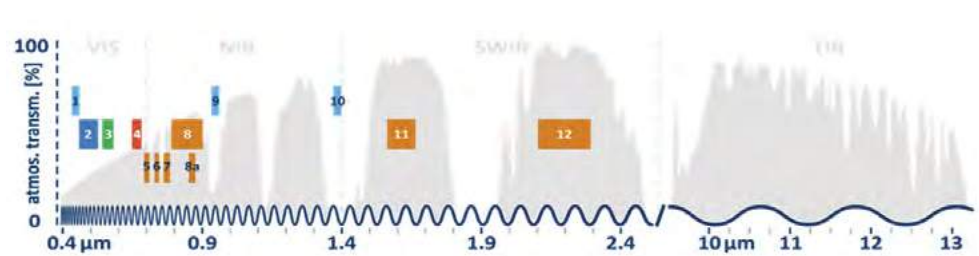
**Figura 10.** Nube de puntos 3D generada mediante un sensor LIDAR embarcado en un dron en una zona costera (datos propios)

## 8. SENSORES MULTIESPECTRALES E HIPERESPECTRALES

Los sensores multiespectrales e hiperespectrales son sensores de tipo pasivo. Recogen radiación relegada por una fuente que puede ser cualquier material y que es dispersada en diferentes longitudes de onda. Un sensor multiespectral posee la capacidad de recoger determinadas fracciones de esa radiación en las denominadas “bandas” que son tramos de longitud de



onda a las cuales el sensor es sensible. Un sensor multiespectral se caracteriza por el número de bandas que es capaz de detectar. Lo habitual es que este número oscile entre 4 y 13 bandas, cubriendo cada una de ellas desde unos pocos nanómetros hasta unas decenas de ellos, capacidad denominada resolución espectral, pero que, si se añaden todas las bandas, en conjunto pueden barrer un sector importante del espectro electromagnético como puede ser el espectro visible, el infrarrojo cercano (NIR) o el infrarrojo de onda corta SWIR o todos ellos juntos como hacen algunos sensores hiperespectrales. En la figura 11 aparecen las bandas de los satélites Sentinel 2 (A y B) y un espectro electromagnético desde el visible al infrarrojo térmico. En las ordenadas aparece la transmisividad de la atmósfera frente a la longitud de onda. En las barras con números aparecen las distintas bandas en las que trabaja este sistema de satélites que opera en el visible, NIR y el SWIR que en total son 13 (la ocho está duplicada). Estos satélites no trabajan en el infrarrojo térmico TIR.

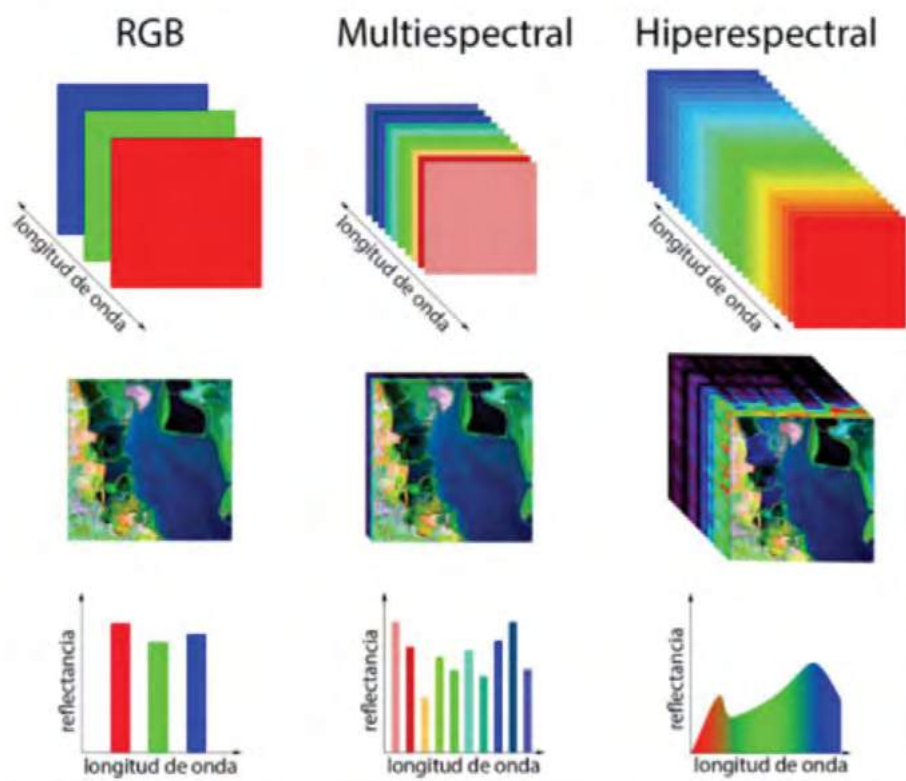


**Figura 11.** Transmisión de la atmósfera en función de la longitud de onda (desde el visible hasta el infrarrojo térmico) y representación de las bandas (barras numeradas) en las que trabaja los satélites Sentinel 2 A y B

Cada banda genera una imagen del objeto que recoge la reflectancia del mismo a esa longitud de onda. A partir de la combinación de dos o más bandas es posible tratar esas imágenes para generar mapas de índices, que permiten la interpretación de lo observado de una forma que no podría ser posible usando solo la parte visible del espectro electromagnético.

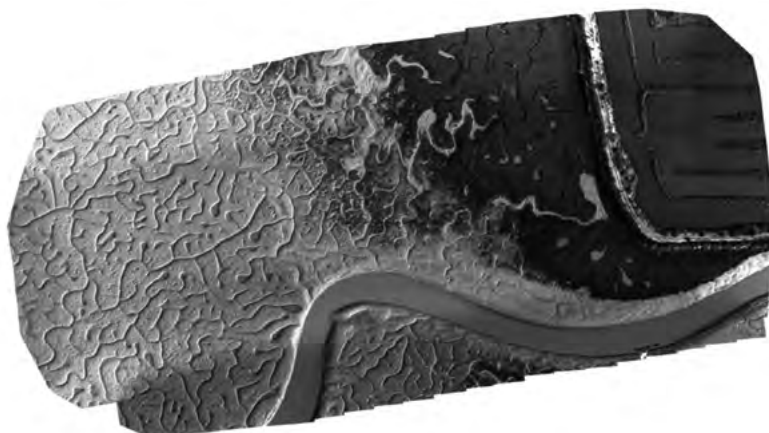
Al igual que los sensores multiespectrales, los hiperespectrales también se caracterizan por poseer bandas, pero en su caso el número de bandas puede llegar a ser muy superior, del orden de más de 100 o incluso hasta más de 500 bandas, por lo que, además de la resolución espectral de cada banda poseen una amplísima cobertura del espectro visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). El nivel de detalle de la informa-

ción obtenida es tal que permite obtener la “firma espectral” de un material, la cual es propia y exclusiva del mismo. Las posibilidades que permiten este tipo de análisis de imágenes es muy alto. Hay que tener en cuenta que un sensor hiperspectral permite obtener, para cada pixel de la imagen, su firma espectral completa del mismo incluyendo a muchas bandas que se encuentran fuera del espectro visible. Es decir, que para cada pixel se recoge información espectral en todas bandas a la vez. Es por ello, que la cantidad de información que se obtiene es muy elevada. Toda esta información no queda recogida en una imagen si no en los denominados “hipercubos”.



**Figura 12.** Comparación entre las bandas espectrales que captan un sensor visible RGB (tres bandas: rojo, verde y azul, o), un sensor multiespectral (10 bandas) y un sensor hiperspectral (entre 100 y 500 bandas)

Usando los sensores multiespectrales e hiperespectrales es posible investigar en el ámbito costero cambios en la hidrología, la turbidez del agua, la concentración de clorofila, el nivel de eutrofización, la salinidad, la temperatura, etc., pero, además, es posible, a partir de la combinación de distintas bandas y empleando software específico analizar las imágenes obteniendo índices que proporcionan una información muy valiosa. Así, por ejemplo, los sensores multiespectrales cuando se emplean para el estudio de la vegetación permiten obtener mapas de índices de vegetación como el conocido Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). Este índice obtenido a partir de la combinación de bandas rojas e infrarrojas del sensor que permiten por un lado separar la vegetación del sustrato, y por otro destacar alguna propiedad inherente a las plantas, como, por ejemplo, el grado de salud que posee, su estrés hídrico u otro tipo de información. Las plantas son capaces de absorber en las bandas del azul y del rojo fuertemente para llevar a cabo la fotosíntesis, mientras que rechazan el color verde. En el caso del infrarrojo, las plantas son muy activas y cuando están sanas emiten mucha energía en forma de reflectancia. Los índices de vegetación seleccionan bandas en el espectro visible y en el NIR para poder destacar alguna característica propia de una planta bajo estudio que permita obtener algún tipo de información relevante. El tamaño de los píxeles en los estudios con UAS es más pequeño que los alcanzados por la teledetección por satélite o desde aviones. Este mayor nivel de detalle espacial implica que la detección y distinción de las coberturas del terreno sean mucho más fáciles y detalladas. La vegetación escasa, como los arbustos, la hierba y la vegetación de dunas, da lugar a valores de NDVI moderados, de alrededor de 0,2-0,5 mientras que los valores más altos se corresponden con un tipo de vegetación más densa y sana. En un humedal costero o en una marisma salada, la distribución de las diferentes características del terreno (por ejemplo, el suelo estéril, las zonas sumergidas, la arena, la vegetación) puede evaluarse y cartografiarse mediante el NDVI, con un detalle espacial sin precedentes (Klemaš 2015). El estudio de la vegetación permite identificar el tipo y la distribución de las especies de plantas, lo cual es importante para analizar la dinámica de la vegetación, la evolución de la vegetación en las dunas, cuantificar los patrones espaciales de la evolución de la vegetación, analizar los efectos de los cambios ambientales y predecir los patrones espaciales de la diversidad de especies (Kelcey and Lucieer, 2012). Dicho análisis puede contribuir al desarrollo de acciones específicas de gestión del ecosistema que mantengan la biodiversidad y las funciones ecológicas.

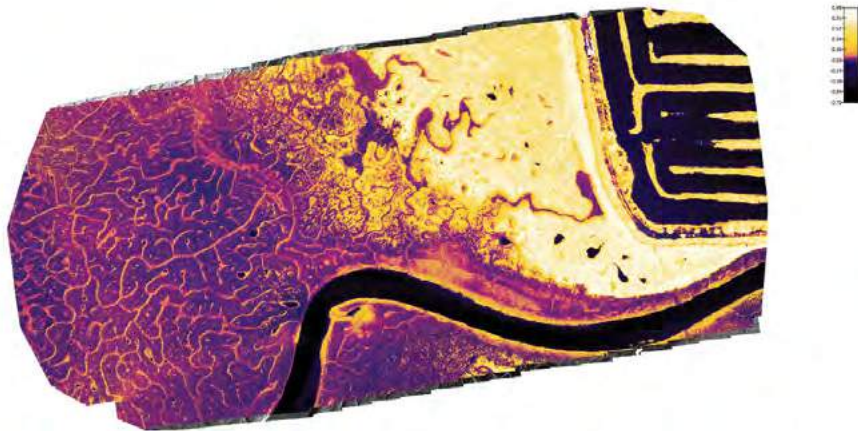


**Figura 13.** Imagen de reflectancia de una zona intermareal de un sector del saco interno de la Bahía de Cádiz en la banda del azul costero (444 nm). Esta imagen se ha formado a partir de numerosas fotografías tomadas desde un UAV con un sensor multispectral a 120 metros de altura. Las zonas de la izquierda y central son zonas intermareales, mientras que la de la derecha es una zona de tierra firme excepto el estero, (datos propios)

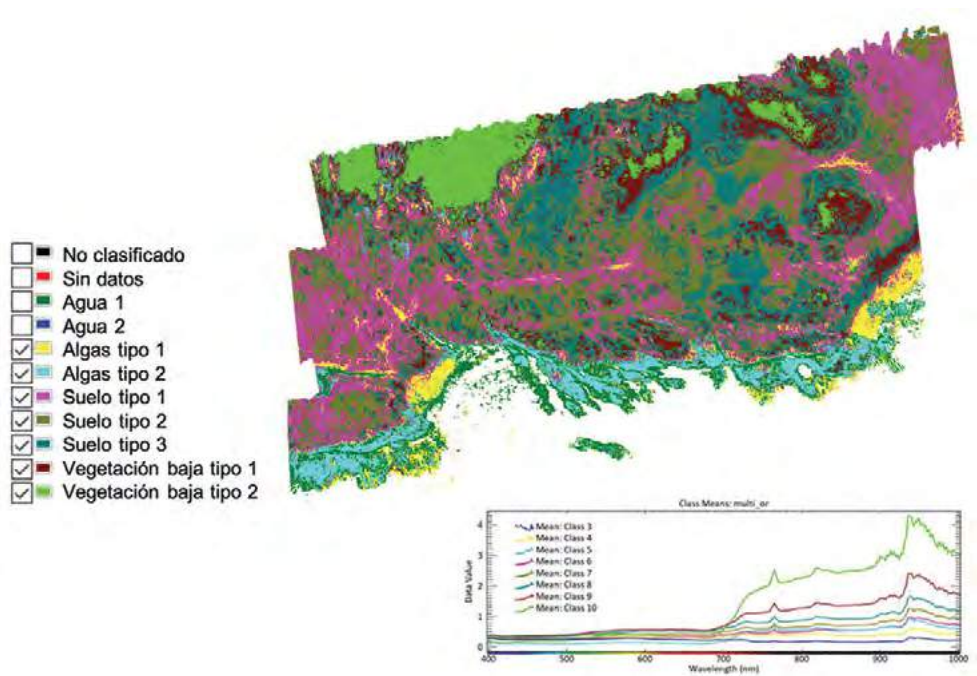
Otro tipo de investigación que permite usar este tipo de sensores en el ámbito costero implica la integración de datos de sensores remotos de UAS con estudios geofísicos de campo, que pueden proporcionar un enfoque innovador para la identificación de sitios susceptibles a riesgos ambientales por intervenciones costeras naturales y actividades antropogénicas en estos ámbitos tan sensibles a las modificaciones.



**Figura 14.** Imagen de reflectancia de la misma zona que en la fotografía 13, pero en la banda del infrarrojo cercano o NIR (842 nm). Obsérvese que en esta imagen la vegetación aparece de color más claro (zonas señaladas por flechas de color rojo) porque las plantas son muy activas en la reflexión de luz infrarroja, (datos propios)



**Figura 15.** Mapa de índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) generado por ordenador de la misma zona que las imágenes anteriores. Este mapa está realizado con las imágenes tomadas en la banda del rojo y del NIR. Cuanto más claro es el color mejor salud muestran las plantas. El agua y el camino aparecen en color negro en esta composición (datos propios)



**Figura 16.** Imagen que muestra una clasificación no supervisada a partir de varios hipercubos generados por un sensor hiperespectral. Permite cartografiar materiales en base a sus características espectrales. En la esquina inferior derecha aparecen las firmas espectrales en el visible y en el NIR de dichos materiales (datos propios)

## 9. SENSORES TÉRMICOS

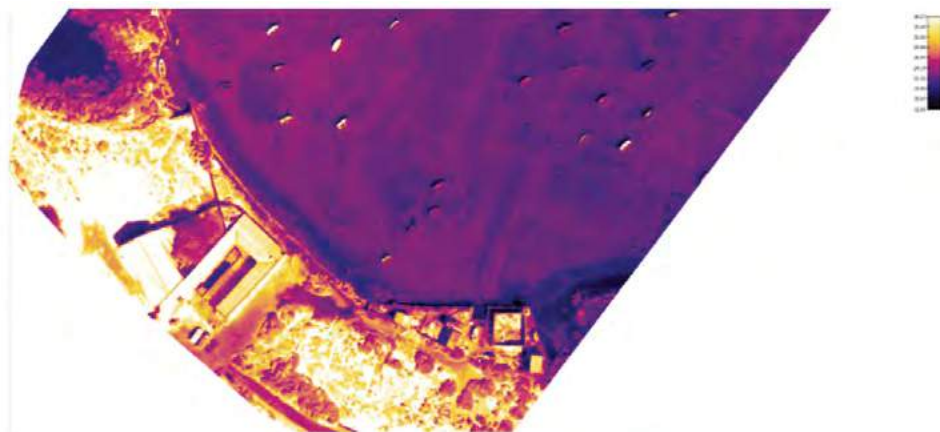
De las múltiples variables que existen en los sistemas naturales la humedad y la temperatura son, probablemente, los más medidas. La temperatura es una variable que influye de forma muy importante cualquier sistema natural, sea físico, químico o biológico. Su conocimiento genera mucho interés y ha generado una rama del conocimiento: la termografía. La termografía es una técnica que permite determinar temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. La termografía permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras térmicas y convertir la energía radiada por un cuerpo en valores de temperatura. Para poder hacer esta transformación es preciso conocer la humedad, la distancia al objeto, la temperatura del aire, la temperatura reflejada y la emisividad del cuerpo objeto de estudio. La emisividad es una propiedad fundamental en la termografía y se define como la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura. Es un concepto que debe ser bien entendido y utilizado porque de no hacerse así puede llevar a malinterpretar los termogramas obtenidos por los sensores termográficos. A modo de ejemplo: dos cuerpos con la misma temperatura, pero con diferentes emisividades pueden aparecer en un termograma con diferentes temperaturas, debidas exclusivamente a la diferencia de emisividades y no de temperatura. A mayor emisividad mayor capacidad de radiar energía por parte de un objeto.

Los sensores empleados en termografía pueden ser de dos tipos: térmicos o termográficos. Los primeros solo registran diferencias de temperatura, es decir son capaces de discriminar qué cuerpos poseen mayor o menor temperatura en una escala arbitraria, mientras que los segundos registran valores absolutos de temperatura, una vez conocidos los valores exactos de emisividad de los cuerpos objeto de estudio.

En los últimos años, se ha vivido una auténtica revolución en el desarrollo de sensores termográficos para su uso en UAS. Lo que ha hecho que las características de estos hayan mejorado de forma ostensible: disminuyendo de forma importante su peso, lo que otorga más autonomía al UAS; con mayor resolución, ahora es habitual encontrar sensores de 640x480 píxeles en el mercado civil (en el ámbito militar existen mejores resoluciones); con amplios rangos de temperatura que permiten analizar valores muy diferentes de temperaturas en los objetos, etc.



Entre las múltiples aplicaciones que poseen los sensores térmicos en la investigación costera, el estudio y observación de la fauna salvaje es uno de las principales y más exitosas aplicaciones. Una gestión eficaz de la biodiversidad depende de estudios de población precisos que estimen el número de individuos, así como la estructura de edad de las poblaciones (Morris y Doak 2002). Este tipo de estudios suelen emplear series temporales elevadas y a menudo son difíciles de llevarse a cabo por tener que acceder a lugares de difícil acceso donde se refugian los animales salvajes, o lugares donde hay un exceso de vegetación (Oliver et al., 2018). El método más empleado habitualmente es el de un gran número de voluntarios que cuentan directamente a los individuos paseando entre ellos, si es que estos no han huido, y se desarrollan durante varios días. Estos estudios sobre el terreno requieren de mucha mano de obra, son costosos, y generan perturbaciones dentro de la población que se está muestreando, así como entre las poblaciones de especies no objetivo (Ditmer et al. 2015). Oliver et al. (2018), han demostrado que el uso de UAS dotados de sensores térmicos es muy útil para llevar a cabo este tipo de censos de población salvaje entre leones marinos ocultos a menudo dentro de arboledas costeras y sin invadir sus espacios y sin asustarlos. El uso de UAS de ala rotatoria posee la ventaja frente a los de ala fija, que al poder detenerse en vuelo facilita la observación en los casos de animales muy ocultos entre la espesura que generan dudas a la observación por el follaje. En la medida de lo posible, recomiendan hacer este tipo de trabajos o bien por la noche o al alba; es decir, cuando hay un contraste térmico importante entre la temperatura de los animales y la temperatura exterior.



**Figura 17.** En esta figura aparece una parte de un termograma obtenido a partir de múltiples imágenes termográficas tomadas desde un UAV en una zona intermarreal. Se aprecian construcciones en tierra firme y embarcaciones apoyadas sobre el sedimento de la Bahía de Cádiz. Puesto que el sensor empleado es de tipo termográfico es posible conocer la temperatura para cada píxel de la imagen

Otro campo donde la aplicación de sensores térmicos a bordo de UAS está siendo utilizado es en la búsqueda de anomalías térmicas costeras para el descubrimiento de fuentes de energía renovable de origen geotérmico, por ejemplo. En la Baja California mexicana existen surgencias de aguas de origen volcánico que pueden alcanzar temperaturas cercanas a los 93 °C, pero que aparecen solo en mareas muy bajas, en las zonas intermareales. Químicamente no es posible su detección dada la matriz compleja del agua de mar, que anula la posibilidad de un seguimiento analítico como puede ocurrir por ejemplo con surgencias en aguas superficiales con menor fuerza iónica. Los objetivos de esta investigación eran: cartografiar la anomalía térmica, comprender el impacto de las mareas, cuantificar la tasa de descarga de aguas termales y la producción de calor, y discutir un uso directo de la energía. La adquisición de imágenes visibles (RGB) y térmicas (TIR) en esta zona ha demostrado ser un potente método para cartografiar la morfología y la temperatura de la anomalía térmica con alta resolución espacial y térmica ( $<2,8$  cm para RGB y  $<10$  cm para TIR). Puesto que la extensión de la anomalía térmica dependía de la amplitud de la marea, con grandes diferencias entre mareas bajas y altas la posibilidad que permiten los UAS de poder usarlos repetidamente a lo largo de una investigación facilitó mucho la consecución de los objetivos iniciales en esta investigación.

De forma parecida a lo anterior, se han empleado sistemas térmicos a bordo de drones para detectar vertidos de aguas residuales industriales y urbanos ilegales. Basándose en la diferencia de temperatura de las aguas receptoras y de estos vertidos, que habitualmente siempre muestran mayores temperaturas (Lega et al., 2012).

## 10. SISTEMAS DE MUESTREO DE AGUAS Y OTROS SENSORES DE INTERÉS EN INVESTIGACIÓN COSTERA

El estudio de la calidad de aguas es un aspecto fundamental para una adecuada conservación de los ecosistemas hídricos (Vélez-Nicolás et al. 2021; Isgró et al, 2022). Se han desarrollado múltiples sistemas que permiten monitorizar la calidad de las masas de agua. Entre ellos podemos destacar: los satélites, poseen una gran ventaja y es la extensión tan grande que pueden supervisar de una vez, pero es de sobra conocido que ni su resolución espacial ni temporal muchas veces son las mejores. Se han desarrollado también sistemas de boyas que, dotadas de sensores, permiten analizar en continuo la calidad de las aguas, pero el continuo mantenimiento de los equipos y sondas debido a la agresividad química y biológica del agua de mar hacen que no sean sistemas fáciles de emplear a lo largo del tiempo por su elevado mantenimiento. Su nula movilidad limita mucho el alcance de los datos obtenidos. Los vehículos autónomos submarinos pueden ser



herramientas muy útiles para estos propósitos, pero su incapacidad, cuando están sumergidos, de poder geoposicionarse limitan su uso si es preciso conocer adecuadamente la posición de los mismos. Es por ello, que el uso de UAS dotados de equipos que permiten analizar de forma rápida variables ambientales en el agua, incluso a unas decenas de metros de profundidad usando sondas como las CTD, por ejemplo, están cobrando cada vez más interés. Si, además, los UAS pueden emplear equipos tomamuestras que son capaces de coger volúmenes de agua lo suficientemente representativos, como un par de litros, para que sean analizados en el laboratorio el interés por estos equipos es cada vez mayor. Si a ello le sumamos que se evita tener que emplear embarcaciones tripuladas para la recogida de muestras con las limitaciones de personal y coste que eso conlleva, es fácil apreciar el potencial tan alto que suponen estos sistemas aéreos. La posibilidad de disponer en la costa de UAS preparados para la recogida inmediata de muestras de aguas ante un suceso repentino o previsto, proporciona una flexibilidad enorme a la hora de poder evaluar este tipo de sucesos como pueden ser: derrames accidentales o intencionados desde barcos, seguimiento de vertidos desde tierra, llegadas de algas invasoras, etc. Las experiencias desarrolladas hasta ahora, han demostrado que el control y el muestreo del agua mediante UAS son muy prometedoras, no sólo porque resultan útiles para realizar mediciones sobre el terreno en masas de agua inaccesibles o peligrosas, sino también porque resultan ser muy prácticas para realizar mediciones rápidas de la calidad del agua después de catástrofes naturales como inundaciones o tormentas (Hyeon, 2022).

El concepto empleado por el Proyecto KTTSeaDrones mediante el cual se emplea una embarcación no tripulada de superficie (USV) que porta un UAS multiplica la capacidad de llevar a cabo este tipo de operaciones, dado que le proporciona al UAS una autonomía aumentada, pues una parte del trayecto la hace gracias a ser transportado por la embarcación de superficie.

Los sensores que se pueden embarcar en un UAS para los propósitos de investigación o peritaje de la calidad de las aguas pueden ser de los más variados: desde sofisticados equipos de muestreo automático con varios frascos para muestras en diversas ubicaciones, sondas CTD (conductividad, temperatura y profundidad), o hasta un simple cubo. El objetivo es poder medir variables ambientales “in situ” o recoger muestras de agua y trasladarlas, a tierra o a una embarcación, para que el agua puede ser analizada en laboratorio con más detalle.

Las sondas CTD permiten medir de forma rápida algunas variables ambientales de interés, como la conductividad, el pH y la temperatura. Registran, asimismo, la profundidad a la que se realiza el muestreo y la posición del mismo (mediante antenas GNSS). Lo habitual es que los datos queden

registrados en una memoria interna para que posteriormente sean descargados una vez aterrizado el UAV. Para ello se dota al UAV de una cuerda en la que se ata en el extremo la sonda y debe ser lo suficientemente larga para que el UAV pueda sumergir la sonda hasta la profundidad requerida, sin que se vea comprometida ni la seguridad del mismo, ni su estabilidad en vuelo.



**Figuras 18 a y b.** UAV con sonda CTD acoplada a la aeronave y la misma después de despegar con la sonda lista para ser usada. Las flechas rojas señalan la ubicación de la sonda

Los equipos tomamuestras automáticos no son más que la versión aerotransportada, pero específicamente diseñada para ello, de los equipos que son empleados en tierra y que se colocan en una posición fija por la que circula una masa de agua que se desea muestrear. Permiten tomar distintas muestras de agua o una sola, dependiendo de la versión comercial y de la complejidad del equipo. Por ello, los hay que poseen un único volumen elevado de toma de agua y otros que, por el contrario, cogen distintas muestras de agua, pero en pequeños volúmenes. Estos últimos permiten tomar muestras en distintas ubicaciones, por lo que configurando al UAS de forma conveniente permiten aumentar la capacidad de muestreo en un mismo vuelo.

## 11. BIBLIOGRAFÍA.

- ALMEIDA, L.P., MASSELINK, G., RUSSEL, P., DAVIDSON, M., MCCALL, R., POATE, T. (2014). Swash Zone Morphodynamics of Coarse-Grained Beaches during Energetic Wave Conditions. Paper presented at the International Conference on Coastal Engineering, at Seoul, South Korea, June 15– 20.
- ARMAROLI, C., CIAVOLA, P., PERINI, L., CALABRESE, L., LORITO, S., VALENTINI, A., MASINA, M. (2012). Critical Storms Thresholds for Significant Morphological Changes and Damage along the Emilia- Romagna Coastline, Italy. *Geomorphology* 143, 34–51.
- BARBERO, L., GARCÍA-LÓPEZ, S., LÓPEZ-RAMÍREZ, J.A., MUÑOZ, J.J. (2017). RPAS as A New Tool for the Study of Sand Dunes in Coastal Environments: A Case Study in the South Atlantic Area of Spain. Paper presented at the 5th International Conference on Small Aerial Systems for Environmental Research, Vila Real, Portugal, June 28–30.
- BERNI, J., ZARCO-TEJADA, P.J., SUAREZ, L., Y FERERES, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(3), 722–738.
- BARLOW, J., GILHAM, J., IBARRA COFRÃ, I. (2017). Kinematic Analysis of Sea Cliff Stability Using UAV Photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing* 38, 2464–2479.
- BENASSAI, G., AUCELLI, P., BUDILLON, G., DE STEFANO, M., DI LUCCIO, D., DI PAOLA, G., MONTELLA, R., MUCERINO, L., SICA, M., PENNETTA, M. (2017). Rip Current Evidence by Hydrodynamic Simulations, Bathymetric Surveys and UAV Observation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17, 1493–1503.
- CARBAJAL-MARTÍNEZ, D., PEIFFER, L., HINOJOSA-CORONA, A., TRASVIÑA-CASTRO, A., ARREGUI-OJEDA, S.M., CARRANZA-CHÁVEZ, F.J., FLORES-LUNA, C., MÉNDEZ-ALONZO, R., INGUAGGIATO, C., CASALLAS-MORENO, K.L. (2021). UAV-based thermal imaging and heat output estimation of a coastal geothermal resource: La Jolla beach, Baja California, Mexico. *Renewable Energy* 168, 1364–1376.
- CASELLA, E., ROVERE, A., PEDRONCINI, A., STARK, C.P., CASELLA, M., FERRARI, M., FIRPO, M. (2016). Drones as Tools for Monitoring Beach Topography Changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Marine Letters* 36(2), 151–163.
- CASTELLE, B., CHAUMILLON, E. (2019). Coastal Change in Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France Inferred from a National Monitoring

- Network: A Summary from the Current Special Issue. *Journal of Coastal Research* 88(1), 3-9.
- CRACKNELL, A.P., LADSON, H. (2007). Introduction to Remote Sensing (2 ed.). London: Taylor and Francis.
- DAVIS JR, R.A., FITZGERALD, D.M. (2004). Beaches and Coasts. Oxford: Wiley-Blackwell.
- DITMER M.A., VINCENT J.B., WERDEN L.K., TANNER J.C., LASKE T.G., IAIZZO P.A., FIEBERG J.R. (2015). Bears show a physiological but limited behavioral response to unmanned aerial vehicles. *Current Biology* 25(17), 2278–2283.
- DURÁN, R., GUILLEN, J., RUIZ, A., JIMÉNEZ, J.A., SAGRISTÀ, E. (2016). Morphological Changes, Beach Inundation and Overwash Caused by an Extreme Storm on a Low-Lying Embayed Beach Bounded by a Dune System (NW Mediterranean). *Geomorphology* 274, 129–142.
- EPPELBAUM, L.V. (2009). Near-surface temperature survey: An independent tool for buried archaeological targets delineation. *Journal of Cultural Heritage* 12(1), 93-103.
- FISHER, J.S., OVERTON, M.F. (1994). Interpretation of Shoreline Position from Aerial Photographs. *Coastal Engineering Proceedings Special Issue* 24, 1998–2003.
- GARCÍA-LÓPEZ, S., RUIZ-ORTIZ, V., BARBERO, L. Y SÁNCHEZ-BELLÓN, A. (2018). Contribution of the UAS to the determination of the water budget in a coastal wetland: a case study in the natural park of the Bay of Cádiz (SW Spain). *European Journal of Remote Sensing* 51(1), 965–977.
- GONÇALVES, J.A., HENRIQUES, R. (2015). UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 101–111.
- HARWIN, S., LUCIEER, A. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing* 4 (6), 1573–1599.
- HASSANALIAN, M., ABDELEKEFI, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Science* 91, 99-131.
- HYEON RYU, J. (2022). UAS-based real-time water quality monitoring, sampling, and visualization platform (UASWQP). *HardwareX* 11, e00277
- HOFFMEISTER, D., TILLY, N., CURDT, C., AASEN, H., NTAGERETZIS, K., HADLER, H., WILLERSHÄUSER, T., VÖTT, A., BARETH, G. (2012). Terrestrial Laser Scanning for Coastal Geomorphologic Research in Western Greece. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

- Information Sciences, XXXIX-B5. Paper presented at the XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, August 25–September 1 2012. doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-511-2012
- HRUSKA, R., MITCHELL, J., ANDERSON, M., Y GLENN, N.F. (2012). Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing* 4(9), 2736–2752.
- ISGRÓ, M.A., BASALLOTE, M.D., BARBERO, L. (2022). Unmanned Aerial System-Based Multispectral Water Quality Monitoring in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Mine Water and the Environment* 41, 30–4.
- JAMES, M. R., ROBSON, S. (2014). Mitigating Systematic Error in Topographic Models Derived from UAV and Ground-Based Image Networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(10), 1413–1420.
- KELCEY, J., LUCIEER, A. (2012). Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *Remote Sensing* 4(5), 1462–1493.
- KLEMAS, V.V. (2009). The Role of Remote Sensing in Predicting and Determining Coastal Storm Impacts. *Journal of Coastal Research* 25(6), 1264–1275.
- KLEMAS, V.V. (2015). Coastal and environmental remote sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An overview. *Journal of Coastal Research* 31(5), 1260–1267.
- LEBOURGEOIS, V., BEGUE, A., LABBE, S., MALLAVAN, B., PREVOT, L., ROUX, B. (2008). Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. *Sensors* 8(11), 7300–7322.
- LEGA, M., KOSMATKA, J., FERRARA, C., RUSSO, F., NAPOLI, R.M.A., PERSECHINO, G. (2012). Using Advanced Aerial Platforms and Infrared Thermography to Track Environmental Contamination. *Environmental Forensics* 13(4), 332–338.
- MANCINI, F., DUBBINI, M., GATELLI, M., STECCHI, F., FABBRI, S., GABBIANELLI, G. (2013). Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sensing* 5(12), 6880–6898.
- MASON, D.C., DAVENPORT, I.J., ROBINSON, G.J., FLATHER, R.A., MCCARTNEY, B.S. (1995). Construction of an Inter-Tidal Digital Elevation Model by the ‘Water-Lined’ Method. *Geophysical Research Letters* 22(23), 3187–3190.
- MATSUBA, Y., SATO, S., HADANO, K. (2017). Rapid Change in Coastal Morphology Due to Sand- Bypassing Captured by UAV-based Monitoring System. Paper presented at the Coastal Dynamics Conference, Helsingør, Denmark, June 12–16.

- MORRIS, W.F., DOAK, D.F. (2002). Quantitative conservation biology. Sinauer, Sunderland, Mass.
- NEBEL, S. H., TREMBANIS, A.C., BARBER, D.C. (2012). Shoreline Analysis and Barrier Island Dynamics: Decadal Scale Patterns from Cedar Island, Virginia. *Journal of Coastal Research* 28(2), 332–341.
- JORDAN, O., KEY, N., GOLDSTIEN, S., ZAWAR-REZA, P. (2018). An assessment of thermal-image acquisition with an unmanned aerial vehicle (UAV) for direct counts of coastal marine mammals ashore. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 6(2), 100–108.
- PAPAKONSTANTINO, A., TOPOUZELIS, K., PAVLOGEORGATOS, G. (2016). Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5(6), 75.
- PEREZ-ALBERTI, A., TRENHAILE, A.S. (2015). An Initial Evaluation of Drone-Based Monitoring of Boulder Beaches in Galicia, North-Western Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 105–111.
- PUIG, M., DEL RÍO, L., PLOMARITIS, T.A., BENAVENTE, J. (2014). Influence of Storms on Coastal Retreat in SW Spain. *Journal of Coastal Research* 70, 193–198.
- POIRIER, N., HAUTEFEUILLE, F., CALASTRENC, C. (2013). Low altitude thermal survey by means of an automated unmanned aerial vehicle for the detection of archaeological buried structures. *Archaeological Prospection* 20(4), 303–307.
- SALLENGER, A.H. (2000). Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research* 16(3), 890–895.
- SANSONI, G., TREBESCHI, M., DOCCHIO, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors* 9, 568–601.
- SCARELLI, F.M., CANTELLI, L., BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., GABBIANELLI, G. (2016). Natural and Anthropogenic Coastal System Comparison Using DSM from a Low Cost UAV Survey (Capão Novo, RS/Brazil). *Journal of Coastal Research* 75, 1232–1236.
- SEKOVSKI, I., STECCHI, F., MANCINI, F., DEL RÍO, L. (2014). Image Classification Methods Applied to Shoreline Extraction on Very High-Resolution Multispectral Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 35(10), 3556–3578.
- SCHWARZER, K., DIESING, M., LARSON, M., NIEDERMEYER, R.O., SCHUMACHER, W., FURMANCZYK, K. (2003). Coastline Evolution at Different Time Scales – Examples from the Pomeranian Bight, Southern Baltic Sea. *Marine Geology* 194(1–2), 79–101.

- SHORT, A.D. (1999). Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. New York: John Wiley.
- STIVE, M.J.F., AARNINKHOF, S.G.J., HAMM, L., HANSON, H., LARSON, M., WIJNBERG, K.M., NICHOLLS, R.J., CAPOBIANCO, M. (2002). Variability of Shore and Shoreline Evolution. *Coastal Engineering* 47(2), 211–235.
- SONG, G.S., LIU, P.K. (2009). Topographical Mapping in Littoral Regions Using the GPS Backpack Tidaline Tracing Skill. *International Journal of Remote Sensing* 30(3), 555–575.
- TURNER, D., LUCIEER, A., WATSON, C. (2011). Development of an unmanned aerial vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery. Proceedings of 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia, 10–15 April 2011.
- TURNER, I.L., HARLEY, M.D., DRUMMOND, C.D. (2016). UAVs for Coastal Surveying. *Coastal Engineering* 114, 19–24.
- VÉLEZ-NICOLÁS, M., GARCÍA-LÓPEZ, S., BARBERO, L., RUIZ-ORTIZ, V., SÁNCHEZ-BELLÓN, Á. (2021). Applications of Unmanned Aerial Systems (UASs) in Hydrology: A Review. *Remote Sensing* 13, 1359.
- WIENEKE, F. (1991). The Use of Remote Sensing in Coastal Research. *GeoJournal* 24(1), 71–76.
- WONG, P.P., LOSADA, I.J., GATTUSO, J.P., HINKEL, J., KHATTABI, A., MCINNES, K.L., SAITO, Y., SALLENGER, A. (2014). Coastal Systems and Low-Lying Areas. En *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by C. B. Field, V. R. Barros, D. J.





# 03.

## Vehículos Operados Remotamente (ROVs) y dispositivos acústicos de imagen como sistemas de ayuda en la gestión de instalaciones de acuicultura semi-intensiva

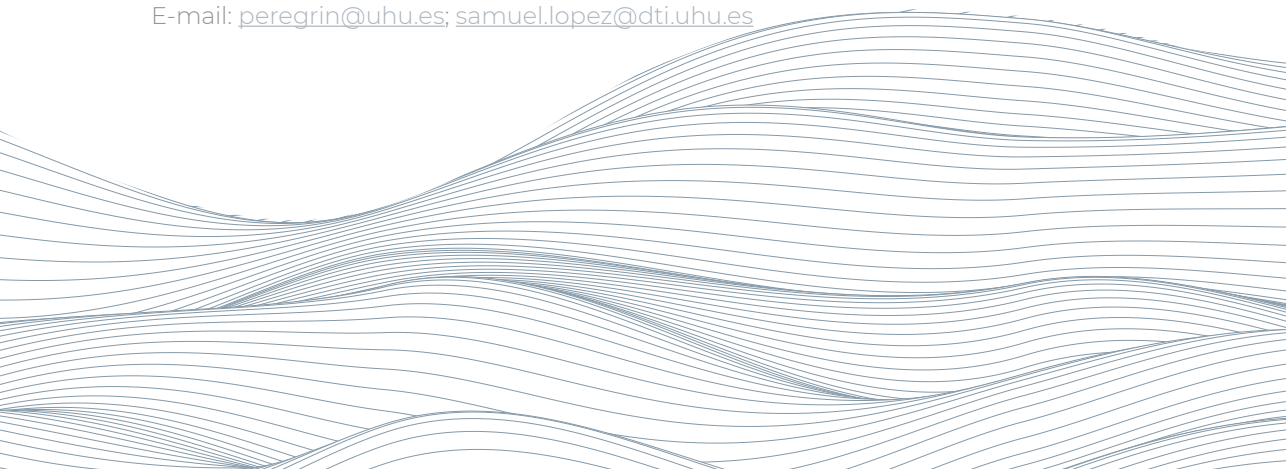
J.C. Gutiérrez Estrada<sup>1</sup> | I. Pulido Calvo<sup>1</sup> | F. Gómez Bravo<sup>2</sup> |  
A. Peregrín<sup>3,4</sup> | A. Garrocho Gruz<sup>2</sup> | S. López Domínguez<sup>4</sup> |  
J. Castro Gutiérrez<sup>1</sup> | I. de la Rosa Lucas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva, Spain. E-mail: [juanc@uhu.es](mailto:juanc@uhu.es); [ipulido@uhu.es](mailto:ipulido@uhu.es); [jairo.castro@dcaf.uhu.es](mailto:jairo.castro@dcaf.uhu.es); [ignacio.delarosa@dcaf.uhu.es](mailto:ignacio.delarosa@dcaf.uhu.es)

<sup>2</sup>Dpto. Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva, Spain. E-mail: [fernando.gomez@diesia.uhu.es](mailto:fernando.gomez@diesia.uhu.es); [alejandro.garrocho@diesia.uhu.es](mailto:alejandro.garrocho@diesia.uhu.es)

<sup>3</sup>Centro de Estudios Avanzados en Física, Matemáticas y Computación (CEAFMC). Instituto Interuniversitario de Investigación en Data Science and Computational Intelligence (DaSCI), Universidad de Huelva, 21007 Huelva, Spain. E-mail: [peregrin@uhu.es](mailto:peregrin@uhu.es)

<sup>4</sup>Dpto. Tecnologías de la Información, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva, Spain. E-mail: [peregrin@uhu.es](mailto:peregrin@uhu.es); [samuel.lopez@dti.uhu.es](mailto:samuel.lopez@dti.uhu.es)



## Sumario:

1. Introducción
2. Vehículos operados remotamente (ROVs)
3. ROVs en acuicultura
4. Sistemas fijos o remotos sumergidos (RUSs) y boyas derivantes (DBs)
5. Control y sensores en vehículos operados remotamente convencionales (ROVs) e híbridos (HROVs)
  - 5.1. Arquitectura de control en ROVs y HROVs;
  - 5.2. Misiones submarinas autónomas, remotamente operadas e híbridas
  - 5.3. Sensores acústicos para la localización submarina
  - 5.4. Retos abiertos en la navegación submarina
  - 5.5. Sensores para la percepción en aplicaciones submarinas
    - 5.5.1. Sensores ópticos
    - 5.5.2. Sensores acústicos
  - 5.6. Retos en el desarrollo de sistemas de percepción submarina
6. Procesamiento y análisis de la información generada por sensores instalados en ROVs y sistemas fijos: Inteligencia Artificial
  - 6.1. Computación inteligente, ciencia de los datos y *Big Data* y *Machine Learning*
  - 6.2. *Big Data*
  - 6.3. Aplicaciones de la inteligencia artificial a la estimación de la biomasa de peces
7. Estimación de abundancia y biomasa en balsas de cría de esteros mejorados. Aplicación de sónares de imagen
  - 7.1. Salinas del Astur
  - 7.2. Obtención de datos y procesamiento de imágenes sonar
  - 7.3. Estaciones de censo para estimar el número de peces
  - 7.4. Estimación de la abundancia
8. Conclusiones
9. Bibliografía.

## Resumen

Este capítulo se constituye como una exposición resumida de los resultados obtenidos en las acciones 1.3, 2.3 y 3.3 del proyecto KTTSeaDrones cuyos resultados completos se recogen en los entregables 1.3A, 2.3A1, 2.3A2, Adenda 2.3A y entregable 3.3A. Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sistemática del uso de los vehículos remotamente operados (ROVs) y sistemas fijos o remotos sumergidos (RUSs) y derivantes (DBs) en diferentes sistemas de explotación y producción acuícola así como en hábitats con potencial para la implantación de programas de producción. También se ha abordado el análisis del control de este tipo de vehículos así como las características de los sensores que pueden ser instalados en cada plataforma. Se exploran diferentes métodos derivados del análisis de la información masiva generada por los sensores acoplados a bordo, particularmente las diferentes metodologías englobadas dentro del campo de la Inteligencia Artificial (AI) y el *Big Data*, y se analiza la aplicabilidad de los sónares de imagen para la estimación de la abundancia y biomasa en instalaciones de acuicultura semi-intensiva.

## Resumo

Este capítulo é um resumo dos resultados obtidos nas acções 1.3, 2.3 e 3.3 do projecto KTTSeaDrones, cujos resultados completos são apresentados em resultados 1.3A, 2.3A1, 2.3A2, Adenda 2.3A e resultado 3.3A. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre a utilização de veículos operados à distância (ROVs) e sistemas subaquáticos fixos ou remotos (RUSs) e derivadores (DBs) em diferentes sistemas de produção e exploração aquícola, bem como em habitats com potencial para a implementação de programas de produção. A análise do controlo deste tipo de veículos, bem como as características dos sensores que podem ser instalados em cada plataforma, também foi abordada. São explorados diferentes métodos derivados da análise da informação maciça gerada pelos sensores a bordo, particularmente as diferentes metodologias englobadas no campo da Inteligência Artificial (IA) e dos *Big Data*, e é analisada a aplicabilidade dos sónares de imagem para a estimativa da abundância e biomassa em instalações de aquacultura semi-intensiva.

## 1. Introducción:

### Vehículos Operados Remotamente (ROVs) y dispositivos acústicos de imagen como sistemas de ayuda en la gestión de instalaciones de acuicultura semi-intensiva

En la actualidad, las sociedades humanas se enfrentan al desafío de proporcionar fuentes de proteínas de origen animal salvaguardando al mismo tiempo los objetivos de sustentabilidad y conservación de la biodiversidad. En este contexto, la explotación de los recursos pesqueros sobre una base ecosistémica y una producción acuícola inteligente, sostenible e integradora jugará un papel imprescindible en las próximas décadas y constituirá uno de los pilares fundamentales del Plan de Crecimiento Azul propugnado por la Unión Europea. Este plan, basado en el Código de Conducta de Pesca Responsable (FAO, 1995), establece una serie de instrumentos que facilitan la aplicación de sistemas de gestión que aseguren un desarrollo eficaz de la pesca y la acuicultura.

Adoptar este nuevo enfoque sobre la pesca extractiva y la producción acuícola se hace aún más imprescindible cuando se analizan las tendencias de capturas de las flotas pesqueras y la producción acuícola a nivel mundial. Los datos básicamente muestran que el volumen de capturas de la industria pesquera está estancado alrededor de los 90 millones de toneladas desde principios de los años 90, mientras que la acuicultura creció en el período comprendido entre 2001 y 2016 a un ritmo del 4.5% (Brugère y Ridler, 2004; FAO, 2018; APROMAR, 2018). Por tanto, de forma global se puede considerar que en la actualidad la acuicultura contribuye de forma más eficaz al aprovechamiento de los recursos naturales y al desarrollo económico que la pesca tradicional.

Esta marcada diferencia de crecimiento entre la pesca tradicional y la acuicultura ha sido posible no solo gracias a una importante diversificación de la producción y a un conocimiento profundo de la biología de las especies cultivadas, sino que además se ha basado en una adecuada organización empresarial y sobre todo en el desarrollo de nuevos alimentos

específicos y la introducción de importantes innovaciones tecnológicas. De hecho, el objetivo de desarrollo sostenible 14.a sobre vida submarina (SDG 14.a) establecido en la agenda 2030 de las Naciones Unidas destaca como camino prioritario para alcanzar sus metas el aumento significativo de los conocimientos científicos y el desarrollo de la capacidad de investigación y transferencia de tecnología al sector productivo de la acuicultura (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>).

Aunque la realidad de la acuicultura moderna es la de un sistema de producción altamente tecnificado, a corto y medio plazo la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental de las instalaciones acuícolas estarán fuertemente asociadas a un control aún más preciso de las operaciones llevadas a cabo sobre el cultivo. Un análisis profundo del sistema de manejo mediante la introducción de nuevas tecnologías permitirá optimizar los niveles de nutrición, supervisar y pronosticar cambios cualitativos en el medio de cultivo, llevar a cabo estimaciones predecibles de los crecimientos y biomásas así como gestionar adecuadamente los regímenes de retirada de la producción. Como resultado habrá menos alimento perdido, la mortalidad no contabilizada será menor y el piscicultor podrá controlar y responder más fácilmente a problemas patológicos y cambios en las condiciones físico-químicas del agua con lo que se tenderá a un uso más eficiente del capital ligado a los peces, alimentos y la instalación en su conjunto.

En los últimos años, la tecnificación en la acuicultura se ha implantado particularmente en aspectos relacionados con la alimentación de los peces (Foster et al., 1995; Alanärä, 1996; Cho y Bureau, 1998; Lagardère y Mallekh, 2000; Bulcock et al., 2001; Papandroulakis et al., 2002; Petrell y Ang, 2001; Parsonage y Petrell, 2003; Rubio et al., 2004; Chang et al., 2005; Velázquez y Martínez, 2005; Soto-Zarazúa et al., 2010; Føre et al., 2011; Loo, 2013; Smith y Tabrett, 2013; Atoum et al., 2015; Wu et al., 2015), la evaluación del comportamiento en jaulas y balsas de cría (Rose et al., 2005; Conti et al., 2006; Covès et al., 2006; Xu et al., 2006; Chris et al., 2009; Duarte et al., 2009; Pinkiewicz et al., 2011; Torisawa y Kadota, 2011; Cha et al., 2012; Papadakis et al., 2012; Polonschii et al., 2013; Liu et al., 2014; Sadoul et al., 2014; Føre et al., 2016; Kolarevic et al., 2016), estimación del crecimiento y biomasa (Costa et al., 2006; Costa et al., 2009; Balaban et al., 2010a y 2010b; Gümüs y Balaban, 2010; Serpa et al., 2013), estimación de parámetros físico-químicos (van Dam y Pauly, 1995; Burford y Lorenzen, 2004; Moulick et al., 2011; Gutiérrez-Estrada et al., 2004; Tang et al., 2009a y 2009b; Lala et al., 2017; Thomas et al., 2017), sistemas de recirculación, filtración del agua y estimación de desechos (Chen et al., 1993; Kamstra et al., 1998; Aitcheson et al., 2000; Barak y van Rijn, 2000; Barak et

al., 2003; Boyd, 2003; Bureau et al., 2003; Ebeling et al., 2003; Gelfand et al., 2003; Suzuki et al., 2003; Brazil y Summerfelt, 2006; Ebeling et al., 2006; Klas et al., 2006; van Rijn et al., 2006; Boopathy et al., 2007; Avnimelech, 2006; Martins et al., 2010; Azevedo et al., 2011; Danaher et al., 2011; Goncalves y Gagnon, 2011; van Rijn, 2013) y el uso eficiente del agua y la energía (Pulido-Calvo et al., 2006; Gutiérrez-Estrada y Pulido-Calvo, 2007; Pulido-Calvo et al., 2008; Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2011; Gutiérrez-Estrada et al., 2012; Pulido-Calvo et al., 2014).

En la actualidad, el continuo avance en plataformas de desarrollo y programación, la significativa mejora de la conectividad a internet, el acceso a bases de datos y la capacidad de cálculo y procesamiento de información de dispositivos móviles así como la accesibilidad y reducción de costes de los componentes electrónicos facilitan el acceso y adquisición de nuevas tecnologías que pueden permitir a los acuicultores optimizar sus procesos de producción (FAO, 2018). Sin duda, una de las tecnologías emergentes más prometedoras en este sentido es el uso de plataformas multisensóricas instaladas en drones aéreos (RPAs) y acuáticos autónomos (*Autonomous Underwater Vehicles* –AUVs-) y particularmente en vehículos remotamente operados (*Remotely Operated Vehicles* –ROVs-) así como sistemas fijos o remotos sumergidos y boyas derivantes (*Remote underwater systems* –RUSs- and *Drifting Buoys* –DBs-) (Christ y Wernli, 2014). Esto es debido a que este tipo de tecnologías están desarrolladas en torno a plataformas comerciales robustas y testadas que presentan como característica más destacable la capacidad de obtención de información *in situ* y en tiempo real del comportamiento y distribución de las especies acuícolas mediante el uso de técnicas no destructivas y mínimamente intrusivas como el análisis de imágenes y distintos tipos de sistemas acústicos y ópticos (Karpov et al., 2012; Lauermann, 2014; Mallet y Pelletier, 2014; Huvenne et al., 2018).

Por tanto, el objetivo prioritario de este trabajo es llevar a cabo una revisión bibliográfica sistemática del uso de los vehículos remotamente operados (ROVs) y sistemas fijos o remotos sumergidos (RUSs) y derivantes (DBs) en diferentes sistemas de producción acuícola así como en hábitats con potencial para la implantación de programas de producción. Seguidamente este estudio aborda el análisis del control de este tipo de vehículos así como las características de la sensórica que puede ser instalada en cada plataforma. Se exploran diferentes métodos derivados del análisis de la información masiva generada por los sensores acoplados a bordo, particularmente las diferentes metodologías englobadas dentro del campo de la Inteligencia Artificial (AI) y el *Big Data*, y analiza la aplicabilidad de los

sonares de imagen para la estimación de la abundancia y biomasa en instalaciones de acuicultura semi-intensiva.

Este capítulo se constituye como una exposición resumida de los resultados obtenidos en las acciones 1.3, 2.3 y 3.3 del proyecto KTTSeaDrones cuyos resultados completos se recogen en los entregables 1.3A, 2.3A1, 2.3A2, Adenda 2.3A y entregable 3.3A (Gutiérrez-Estrada et al., 2019; Garrocho-Cruz et al., 2020; López-Domínguez et al., 2021; Garrocho-Cruz et al., 2022) y que se pueden descargar desde <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>.

## 2. Vehículos operados remotamente (ROVs)

Los vehículos operados remotamente (ROVs) son plataformas robóticas controladas por un operario que se utilizan fundamentalmente para el reconocimiento, inspección, observación y desarrollo de tareas específicas bajo el agua. Están normalmente constituidos por una plataforma marginalmente flotante sobre la que se instalan un conjunto de motores o propulsores que permiten su desplazamiento a través de la columna de agua, así como un conjunto de sensores cuya naturaleza dependerá del tipo de operación o misión a la que está destinado.

Los primeros ROVs fueron construidos en la década de los 60 por el ejército estadounidense y fueron utilizados en misiones de carácter militar (Ridao et al., 2007). No sería hasta los primeros años de los 80 cuando diferentes instituciones de investigación oceanográfica empezaron a diseñar y construir sus propias plataformas de desarrollo con una sensórica dedicada exclusivamente a la investigación y exploración oceanográfica (Nomoto y Hattori, 1986; Yoerger et al., 1986; Kyo et al., 1995; ALVIN Review Committee, 1992; Cadiou et al., 1998).

Las primeras aplicaciones de ROVs comerciales en la evaluación de poblaciones de fauna acuática fueron desarrolladas por Bergström et al. (1987). Estos autores utilizaron un mini-ROV llamado 'Sea Owl MkII' desarrollado por la Estación de Investigación Marina de Kristineberg (Universidad de Gotemburgo) para calibrar estimaciones de capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) con medidas de densidad absoluta de gambas del género *Pandalus*. La densidad absoluta fue estimada a partir de la contabilización de individuos registrados en la videograbación por un área barrida delimitada por barras verticales situadas en la parte delantera del ROV y separadas por una distancia de 0.75 m.

A partir de este primer trabajo otros autores desarrollaron estrategias de evaluación similares con otras especies (Butler et al., 1991; Adams et al.,

1995). Butler et al. (1991) describieron dos métodos nuevos para llevar a cabo estimaciones de poblaciones de peces demersales a partir de datos independientes de las pesquerías comerciales y video-transectos obtenidos con ROVs y sumergibles tripulados. Estos autores destacaron el gran potencial del uso de los ROVs con sistemas de video grabación frente al uso de sumergibles tripulados debido a que los costes asociados a éstos pueden llegar a ser prohibitivos cuando grandes líneas de transectos deben ser analizadas.

A mediados de los 90, Adams et al. (1995) llevaron a cabo estimaciones de poblaciones de peces demersales a partir de muestras obtenidas con redes de arrastre e imágenes de video con cámaras instaladas en ROVs. Estos autores concluyeron que las estimaciones obtenidas a partir del análisis de imágenes fueron significativamente mejores para evaluaciones ambientales y al menos igualmente de fiables en el caso de especies con especial interés para la industria pesquera.

Por tanto, desde mediados de la década de los 90 se empiezan a vislumbrar las ventajas de estos equipos respecto a metodologías más convencionales. La gran capacidad de maniobrabilidad de estos equipos junto con una perturbación mínima del medio y la combinación de la videograbación con la obtención de datos físico-químicos *in situ* permiten llevar a cabo estimaciones precisas de megafauna en unas condiciones difícilmente replicables haciendo uso de otro tipo de técnicas (Rumoth, 1994). Por ello no es sorprendente que a partir de este momento y hasta la actualidad el número de estudios en los que se evalúa la abundancia y riqueza de especie, diversidad de las comunidades de peces, estructura trófica, haciendo uso de ROVs se haya incrementado significativamente (Auster et al., 1997; Moser et al., 1998; Amend et al., 2001; Auster et al., 2003; Johnson et al., 2003; Karpov et al., 2004; Benz et al., 2007; Harter et al., 2009; Carpenter y Shull, 2011; Dance et al., 2011; Soffker et al., 2011; Bryan et al., 2013; Pacunski et al., 2013; Duffy et al., 2014; Pita et al., 2014; Pradella et al., 2014; Ajemian et al., 2015a, 2015b; Consoli et al., 2016; 2013; Hemery y Henkel, 2015; Haggarty et al., 2016; Henry et al., 2016; Quattrini et al., 2017; McLean et al., 2018; Moreno et al., 2018).

### 3. ROVs en acuicultura

Los primeros diseños de ROVs con un uso dedicado a la adquisición de conocimientos y control en instalaciones acuícolas fueron desarrollados por SINTEF (<https://www.sintef.no/en/>) y SIMRAD Subsea (<https://www.kongsberg.com/es/maritime/contact/simrad/>) en 1985 (Klepaker et al., 1987). Estas empresas diseñaron un ROV prototipo consistente en un vehículo submarino controlado mediante un enlace de comandos acústicos cuyas instruc-

ciones eran establecidas por un operador. Este primer ROV constaba de tres motores de control así como de un dispositivo de control de televisión asociado a una cámara de alta sensibilidad con una capacidad de giro de 95°. Asimismo integraba una ecosonda multihaz de transductor cuádruple con la capacidad de determinar la posición relativa de un pez al ROV así como su tamaño. Este dispositivo se diseñó fundamentalmente para llevar a cabo operaciones de vigilancia en sistemas de producción localizados en fiordos noruegos.

Posteriormente Balchen (1991) estableció el tipo de aplicación en la que los ROVs podían ser utilizados en el campo de la acuicultura. Este autor indicó que la principal función de esta tecnología estaría centrada en la inspección, la cual incluiría el control visual de la población confinada así como la recolección de datos sobre la temperatura y otros parámetros de la calidad del agua, contabilización del número de ejemplares y estimación de biomasa.

Otra importante aplicación de los ROVs que Balchen (1991) identifica es la manipulación de objetos y dispositivos. Tales tareas pueden ser divididas en dos categorías: operaciones rutinarias y extraordinarias. Entre las primeras identificó operaciones tales como manejo de válvulas, conexión e instalación de diferentes equipos necesarios para el funcionamiento de la instalación y reparación de redes entre otros. Asimismo, este autor describió otras posibles tareas como el mantenimiento y manejo de sistemas de jaulas completamente sumergidas como las propuestas por Osborne et al. (1990), operaciones de avatares de pastores o la localización de zonas de cría de langostas en emplazamientos naturales.

En este mismo trabajo y publicaciones posteriores, Balchen (1991, 1996) avanza algunas de las características técnicas que este tipo de dispositivos deben tener para poder ser utilizados en acuicultura como el nivel de autonomía, el suministro de energía, la posibilidad de posicionamiento geográfico o la capacidad, nivel y tipo de información que puede ser transmitida.

A mediados de los años 90 se empiezan a desarrollar algunos equipos comerciales para uso exclusivo en acuicultura (Drew, 1993; Frost et al., 1996) basándose en la experiencia adquirida en el diseño de prototipos, en la modelación de la hidrodinámica asociada a los dispositivos, modelos de simulación y en el avance en la captura de imágenes y su posterior análisis (Lewis et al., 1984; Dand, 1986; MacArthur, 1988; Goheen y Jefferys, 1990; Ruff et al., 1995).



La bajada de los costes de producción y la disponibilidad de componentes electrónicos programables permite hoy día el diseño y construcción de ROVs de bajo coste con aplicaciones directas en acuicultura. Un ejemplo lo encontramos en Osen et al. (2017). Estos autores diseñaron, construyeron y testaron un ROV que unido a un vehículo de superficie autónomo constituyen una plataforma denominada 'Sea Farm Inspector' que permite realizar operaciones de inspección de los componentes de jaulas de cultivo de salmones además de recopilar información de las condiciones de la calidad del agua sin que esto suponga niveles de intervención que introduzca factores de stress en el cultivo (Osen et al., 2018).

En la actualidad existen multitud de equipos diseñados específicamente para este campo. Por ejemplo, Argus Mariner es un ROV que ha sido testado con diferentes sistemas de línea de base ultra corta (USBL) con el objetivo de evaluar la capacidad de este equipo para navegar dentro de las jaulas de cultivo para ser utilizado como una plataforma multisensorial (Rundtop y Frank, 2016). Otro ejemplo es el proyecto Sintef NetClean 24/7 (<https://www.sintef.no/en/projects/netclean-247/>) en el que se ha diseñado y desarrollado un ROV denominado REMORA con capacidad autónoma y con tareas de prevención e inspección de bioincrustaciones en jaulas de cultivo de salmón. El biofouling es un importante problema para la piscicultura del salmón en todo el mundo, especialmente en Noruega, ya que su presencia disminuye el crecimiento de los peces. Esto es consecuencia de que instalaciones más limpias es sinónimo de ausencia de determinados parásitos de esta especie. Otros impactos de la acumulación de biofouling incluyen la disminución de los niveles de oxígeno dentro de las jaulas, la deformación neta de la red y el aumento de la tensión en los sistemas de amarre. Una de las principales medidas para contrarrestar el biofouling hoy en día es la limpieza in situ de redes con sistemas de proyección de agua a alta presión.

La idea subyacente en este proyecto es la de desarrollar un robot autónomo y sin ataduras para la prevención del biofouling y la inspección de la integridad de la red. El robot instalado de forma permanente es pequeño, energéticamente eficiente, tiene su propia estación de acoplamiento y realiza operaciones continuas de limpieza e inspección de la red de contención.

Siguiendo a Balchen (1991), varios proyectos están empezando a diseñar y desarrollar ROVs tejedores (<https://www.sintef.no/en/latest-news/underwater-robot-with-needle-and-thread/>). En la actualidad, si durante la inspección se advierten señales de deterioro en las redes, se debe enviar a un buceador para que haga las reparaciones. Esto es un trabajo costoso, arriesgado y que requiere mucho tiempo. Los ROVs desarrollados realizan

una inspección automática y tienen la capacidad de detectar y reparar automáticamente los orificios.

Otros proyectos plantean la asociación cooperativa entre ROVs y otros dispositivos como drones aéreos (RPAs) y vehículos autónomos de superficie (USVs). Este es el caso del proyecto ARTIFEX (<https://www.sintef.no/en/latest-news/tomorrows-fish-farms-will-be-unmanned1/>). Este proyecto incluye cuatro aspectos: diseño de vehículos, sistemas autónomos y operaciones aerotransportadas y submarinas. Todas estas operaciones pueden ser monitoreadas y operadas por una sola persona ubicada en tierra. La función del RPA es vigilar el proceso de alimentación de los peces, mientras que el ROV lleva a cabo inspecciones submarinas y tareas como la reparación de los daños en las redes para garantizar que los agujeros no sean lo suficientemente grandes como para que los peces puedan escapar. Ambos dispositivos (RPA y ROV) estarán conectados a un USV que suministrará energía y servirá de base de operaciones móvil para los dos dispositivos anteriores.

#### 4. Sistemas fijos o remotos sumergidos (RUSs) y boyas derivantes (DBs)

El primer trabajo publicado que informa sobre el uso de un sistema fijo o remoto sumergido (RUS) en el medio ambiente costero se remonta a los años 50. La Asociación Escocesa de Biología Marina de Millport desarrolló una plataforma con el objetivo de estudiar el fondo de un medio acuático sobre la que se instaló un sistema de video en circuito cerrado. Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo en el Acuario de la Sociedad Zoológica de Londres en 1949 (Barnes, 1952, 1953). Un par de años más tarde (1951), la Marina Real Británica construyó una plataforma similar que fue empleada para la identificación de un submarino perdido en el mar ese mismo año (Barnes, 1955).

Posteriormente, Backus y Barnes (1957) utilizaron esta misma plataforma con el objetivo de llevar a cabo identificaciones ictiológicas para lo cual se instaló en este RUS un circuito cerrado de televisión conjuntamente con una ecosonda operando a 12 y 34 kHz. Estos autores concluyeron que la identificación de las diferentes especies puede llevarse a cabo mediante el uso de cámaras de televisión y que se pueden establecer correlaciones significativas con las secuencias producidas por el sistema de ecosonda.

Los resultados obtenidos por estos autores animaron a algunas instituciones como la Universidad de Miami (Holt, 1967) a desarrollar nuevos RUSs en los que se instalaron cámaras de televisión conjuntamente con hi-

drófonos. Este sistema registraba datos de forma coordinada con una boya derivante (DB) en la que se instalaron diferentes sensores de carácter ambiental que permitían medir la velocidad del viento, la dirección y velocidad de la corriente, altura de ola y temperatura del agua a diferentes profundidades. A mediados de los 70, Isaacs y Schwartzlose (1975) desarrollaron una boya sobre la que se instaló una cámara que permitía filmar la fauna bentónica que era atraída por carnada fijada a la línea principal de la boya. Tras un tiempo pre-programado, un sistema de corte de la línea con el ancla permitía recuperar la cámara gracias a la instalación de un radio transmisor. Otros autores como Fedra y Machan (1979) diseñaron un RUS que instalaba un sistema autónomo con una cámara de 16 mm y un sistema de iluminación alimentado por una batería de 12 V que por primera vez era controlado por un ordenador digital.

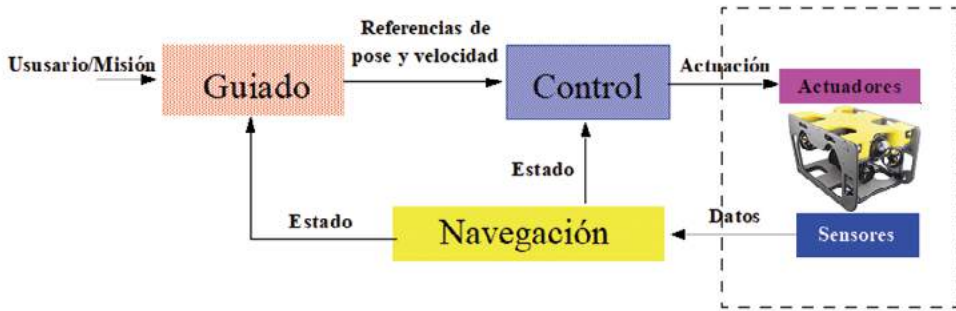
A partir de estos primeros trabajos otros autores han desarrollado plataformas similares con nuevas funcionalidades que permiten estudiar la riqueza de especie de diferentes ecosistemas subacuáticos, el ensamblaje de las comunidades de peces, el comportamiento así como llevar a cabo estimaciones de la abundancia y biomasa de las poblaciones piscícolas (Willis and Babcock, 2000; Dunbrack y Zielinski, 2003; Cappelletti et al., 2004; Stokesbury et al., 2004; Watson et al., 2005; Jan et al., 2007; Tyne et al., 2010; Aguzzi et al., 2011; Goetze et al., 2011; Aguzzi et al., 2012; Chabanet et al., 2012; Pelletier et al., 2012; White et al., 2013; Unsworth et al., 2014; Dunlop et al., 2015; Tanner et al., 2015; Myers, et al., 2016; Whitmarsh et al., 2016; Cundy et al., 2017; King et al., 2017; Jabado et al., 2018; Mirizzi et al., 2018; Sherman et al., 2018; Clarke et al., 2019; Devine et al., 2019; Zarco-Perello y Enríquez, 2019).

## **5. Control y sensores en vehículos operados remotamente convencionales (ROVs) e híbridos (HROVs)**

### *5.1 Arquitectura de control de ROVs y HROVs*

La arquitectura tradicionalmente asociada al control de vehículos autónomos está vinculada con los conceptos de Guiado (G), Navegación (N) y Control (C) (Farrell, 2008) (Figura 1).

En el Guiado se establecen las operaciones necesarias para determinar la ruta, camino o trayectoria para que el vehículo realice la misión establecida. El módulo de guiado es el responsable de entregar las referencias de pose y velocidad al módulo de control.



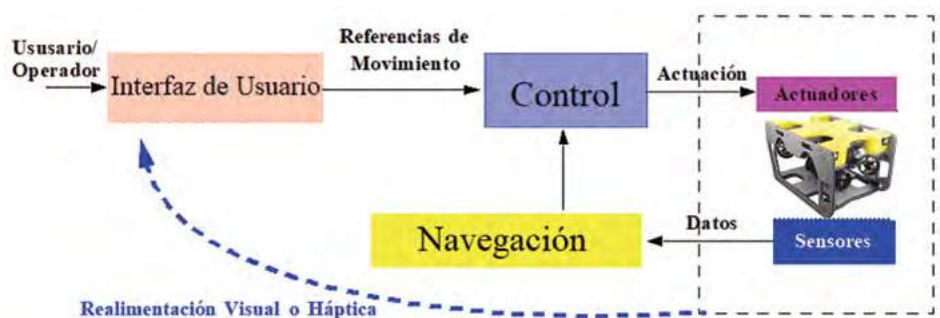
**Figura 1.** Arquitectura GNC de Guiado (G), Navegación (N) y Control (C) de un vehículo autónomo (Gutiérrez-Estrada et al., 2019)

El término Control comprende el conjunto de elementos *hardware* y *software* que permiten manipular los actuadores (volante, timón, propulsores, etc.) que provocan el movimiento del sistema, con el fin de seguir las referencias generadas por el módulo de guiado y así ejecutar las tareas establecidas en la misión.

El concepto Navegación engloba las operaciones que permiten establecer el estado del vehículo, proporcionando a los módulos de Control y Guiado el ‘*feedback*’ necesario para que la misión se desarrolle de forma estable y efectiva. El estado del sistema, en términos físicos, engloba el conocimiento de la pose del vehículo (posición y actitud u orientación en el espacio) y sus velocidades lineal y angular. Sin embargo, este concepto también puede incluir representaciones más abstractas del sistema vinculadas con una descripción interna o cualitativa del mismo.

Desde el punto de vista del usuario, estos sistemas presentan un comportamiento autónomo, entendiendo por tal el hecho de que una vez el usuario establece o configura la misión deseada, el sistema evoluciona de forma independiente al mismo, hasta que éste decida intervenir de nuevo.

Por el contrario, los sistemas operados remotamente (Figura 2) se caracterizan por mantener el bloque de control y navegación y sustituir el módulo de guiado por un módulo interfaz de usuario, de manera que el guiado del vehículo lo hace el usuario interactivamente, en su papel de operador. En esta configuración el estado del sistema es frecuentemente estimado por el propio operador a partir de la información realimentada mediante imagen o interfaces hápticas, de forma que el operador es corresponsable de mantener la estabilidad y eficiencia de la misión. Los vehículos submari-



**Figura 2.** Arquitectura de control de un Vehículo Remotamente Operado (Gutiérrez-Estrada et al., 2019)

nos autónomos (AUVs) y los operados remotamente (ROVs) presentan estas mismas arquitecturas.

Como alternativa a estas dos estrategias de intervención submarina, aparece el concepto de ROV híbrido (HROV) (Sánchez, 2021). Por una parte, los HROVs presentan la capacidad de ser conducidos manualmente, a partir de la información visual o sensorial proporcionada. Pero por otra, son capaces de realizar de forma autónoma determinadas operaciones como respuesta a los requerimientos del operador.

Existen en la bibliografía distintos desarrollos de HROV que implementan diversos grados de capacidad de autonomía en función de las aplicaciones para las que han sido diseñados. Así cabe citar al ‘*Double Eagle Sarov*’ desarrollado por SAAB (<https://www.saab.com/products/double-eagle>) que puede trabajar como vehículo autónomo (AUV), con un sistema de navegación inercial incorporado que le permite desplazarse a grandes distancias y profundidades. El ‘*Sarov*’ puede también manejarse a través de varios kilómetros de cable de fibra óptica o de un umbilical que proporciona tanto alimentación como comunicaciones a tiempo real al vehículo. Este vehículo puede utilizarse para la detección, clasificación, identificación y desactivación de minas.

También es digno de mención el ‘*Nereus*’ (<https://www.whoi.edu/oceanus/feature/new-hybrid-deep-sea-vehicle-is-christened-nereus/>), desarrollado por la ‘*Woods Hole Oceanographic Institution*’. Este HROV permite realizar transectos de navegación autónoma aplicando técnicas de navegación tradicionales y conmutar a un modo teleoperado en el que incluso se puede controlar un manipulador para recoger muestras. Desafortunadamente el

'Nereus' se perdió en el transcurso de una experimentación en mayo del 2014 (Sánchez, 2021).

Especial mención merece el HROV 'Aquanaut' (<https://spectrum.ieee.org/meet-aquanaut-the-underwater-transformer>), desarrollado por 'Houston Mechatronics', que permite la conmutación entre modo operado y autónomo de una forma peculiar, ya que modifica su morfología con el fin de facilitar el cambio de operatividad. Cuando actúa como AUV, la morfología es la típica de un vehículo submarino. En cambio, a petición del operario el vehículo, puede transformarse desplegando dos brazos robóticos y una cabeza en forma de cuña (Sánchez, 2021). La comunicación entre el robot y el operario se hace mediante un modem acústico, permitiendo la ejecución de acciones autónomas en respuesta a peticiones de acciones básicas realizadas por el operador. De esta forma el operador no conduce directamente el HROV, pero controla la secuencia de acciones que éste realiza.

Por último, hay que destacar el robot 'Ocean-One', (<http://cs.stanford.edu/group/manips/ocean-one.html>) un humanoide submarino que permite la manipulación ambidiestra con retroalimentación háptica, lo que concede al operador una capacidad sin precedentes para explorar las profundidades de los océanos con alta fidelidad. Este humanoide fue concebido por la Universidad de Ciencia y Tecnología Rey Abdullah, en Arabia Saudí, y desarrollado por la Universidad de Stanford (California).

Para poder implementar sistemas HROV es necesario resolver un conjunto de retos que abarcan desde el diseño mecánico, la arquitectura de control o el interfaz hombre máquina ('Human Machine Interface', HMI) (Sánchez, 2021). Desde el punto de vista del diseño, es necesario compatibilizar la navegación autónoma de largo recorrido, y por tanto sin necesidad de conectividad continua con tierra, con la conducción operada, en la que se necesita realimentar continuamente al operador con la información del entorno del vehículo. En este sentido, la teleoperación puede estar soportada por un umbilical, por el que se transmite información en tiempo real. Sin embargo, esta posibilidad limita el radio de acción de la navegación autónoma. En lo que respecta a la estructura de control, la arquitectura GNC está pensada para que la intervención del operador esté vinculada a la definición de una ruta, y a pocas operaciones durante el transcurso de la operación (parada, reinicio, activación de algún módulo, y no mucho más). Sin embargo, la estrategia de operación remota desarrollada en los ROVs está planteada para que la intervención del operador se realice de forma continua, sin que suelen aparecer estructuras de control inherentes a las operaciones definidas. Por último, los interfaces hombre máquina definidos por los requisitos de interacción en UAVs y ROVs son de naturaleza muy

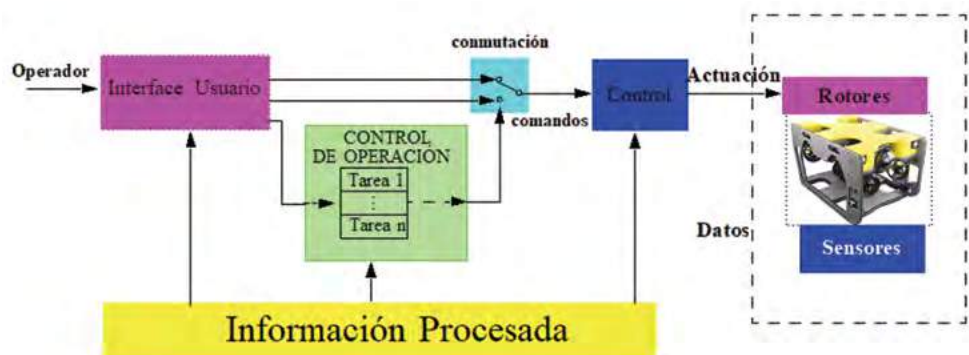
dispar, debido fundamentalmente a las diferencias descritas anteriormente y a las particularidades de las operaciones para los que han sido definidos.

En este contexto, los ROV de pequeña dimensión utilizados para tareas de mantenimiento acuícola parecen una opción muy propicia para el desarrollo de HROVs, entendiendo que las operaciones para las que los primeros están diseñados pueden requerir tanto de actuaciones operadas como de tareas autónomas. Además, su diseño mecánico no requiere de una especial adecuación, pues las intervenciones autónomas están limitadas a un rango de distancias cortas, lo que hace posible mantener el umbilical en cualquiera de las fases en las que se encuentre la operación. Por otro lado, las tareas de intervención que se realizan con estos vehículos permiten establecer un marco claro que delimita el ámbito de la actividad autónoma del de la operada. Es por esto, que en este tipo de aplicaciones la adaptación más relevante ha de realizarse en la arquitectura de control y en el HMI. Elementos que deben ser convenientemente modificados con el fin de mantener la compatibilidad e interoperabilidad entre fase autónoma y operada.

Particularmente, en granjas piscícolas de intemperie, tales como esteros o piscinas naturales, concurren numerosas situaciones en las que la turbidez del agua impide la realimentación de información visual al operador. Para estos casos es necesario añadir a la arquitectura de control inicial del ROV elementos adicionales que auxilien al operador en su actividad o que incluso permitan dar cierto margen de autonomía al ROV, lo que significa convertirlo en un HROV. Con este fin, en el proyecto KTTSeaDrones se ha propuesto realizar una modificación en la arquitectura de control de un ROV comercial de pequeña dimensión para convertirlo en un HROV que ayude a realizar tareas de mantenimiento y estimación de parámetros de operación (abundancia y biomasa) en este tipo de instalaciones.

El objetivo es modificar la arquitectura inicial de la figura 2, agregando nuevos módulos (figura 3). Uno de ellos, se encargará de proporcionar al operador información procesada que le ayude a identificar distintos tipos de elementos situados a su alrededor y seleccionar el rumbo para acercarse a las zonas de interés, bien para tomar algún tipo de medidas, o para registrar información del entorno, como por ejemplo el número de peces que se encuentren en la zona visitada, nivel de oxígeno, pH etc.

El otro elemento añadido se corresponde con un módulo de control de operación, que tendrá como responsabilidad el control de alto nivel en la ejecución de una secuencia de tareas básicas que compondrán la realización de una operación automática. Este módulo es encargado de materiali-



**Figura 3.** Propuesta de arquitectura de control de un Vehículo Híbrido Remotamente Operado (HROV)

zar el comportamiento autónomo del HROV, estableciendo un diálogo con el controlador de bajo nivel, utilizando para ello el mismo protocolo que se encuentra implementado en el HMI, basado en comandos de movimiento. Este módulo recibirá igualmente la información procesada de manera que será posible cerrar el bucle de control al nivel de tarea.

Adicionalmente, el HMI deberá ser modificado de manera que ofrezca la posibilidad de elegir entre distintas opciones de operatividad en función de la información recibida. Por una parte, el operador podrá conducir el vehículo, en la forma tradicional, interactuando mediante comandos de movimiento con el controlador de bajo nivel. O podrá seleccionar la actuación del módulo de control de operación, y activar el módulo de conmutación que permita que el diálogo con el controlador de bajo nivel se efectúe desde dicho controlador. En esta última esta modalidad, la intervención del operador será puntual en el tiempo, recayendo en el módulo controlador de operación la realización de la tarea de forma continua, quedando el operador como responsable de supervisar el proceso, determinar la continuidad o no del mismo o activar una nueva operación en cualquier instante.

## *5.2 Misiones submarinas autónomas, remotamente operadas e híbridas*

El estado del arte en referencia a los sistemas de Guiado y Control de vehículos submarinos se encuentra bastante maduro (Antonelli et al., 2008; Fossen, 2011; Caharija et al., 2016).



Desde el punto de vista del Guiado, las técnicas para la generación de trayectorias y rutas siguen las mismas pautas que las empleadas con robots autónomos terrestres o aéreos, si bien su aplicación se ve condicionada por las peculiaridades de las aplicaciones submarinas (Petres et al., 2005).

Igualmente, si tomamos en consideración las técnicas de control (seguimiento de rumbo, control de actitud y profundidad, seguimiento de transectos, etc.), los vehículos que actualmente hay en el mercado efectúan con gran eficiencia dichas tareas fundamentales. En cambio, las técnicas para Navegación se encuentran muy afectadas por las características de los sistemas sensoriales que se utilizan bajo el agua (Petillot et al., 2019).

Los sistemas de navegación utilizan distintas fuentes de información sensorial para determinar la pose y velocidad del vehículo. La estimación del estado a partir de datos de distinta naturaleza suele basarse en la utilización de algoritmos que permiten la fusión sensorial a partir del conocimiento de la dinámica del vehículo (Thrun et al., 2005). La natural incertidumbre asociada al registro de información que realizan los sensores requiere del uso de procedimientos probabilísticos que reduzcan la incertidumbre final de la estimación. Así, son clásicos los métodos que modelan la estocasticidad de los procesos mediante funciones gaussianas (Chui y Chen, 2017) o los que utilizan métodos de simulación de Montecarlo para modelar los procesos probabilísticos mediante distribuciones multimodales (del Toro, 2007).

En la actualidad, la información que suele utilizarse en misiones submarinas para localización tiene origen propioceptivo y exteroceptivo (Petillot et al., 2019). Concretamente, es frecuente utilizar información procedente de sistemas de medida de velocidad por efecto doppler (DVLs) y de Unidades de Medida Inercial (IMU) que permiten medir aceleraciones, orientaciones y velocidades angulares.

La utilización directa de sistemas de localización global, como los basados en técnicas GNSS, quedan descartados debido a la gran dificultad de propagación que en el agua tienen las ondas electromagnéticas.

En general la utilización de sensores exteroceptivos suele ser un apoyo determinante para mejorar la precisión de las tareas a realizar durante la navegación. Así en robótica móvil es muy utilizada la localización basada en mapas (Williams et al., 2001). En este caso suelen usarse sensores de rango (sonar, LIDAR, etc.) y el mapa para determinar la pose del robot en función de las medidas reales y la probabilidad asociada a las mismas.

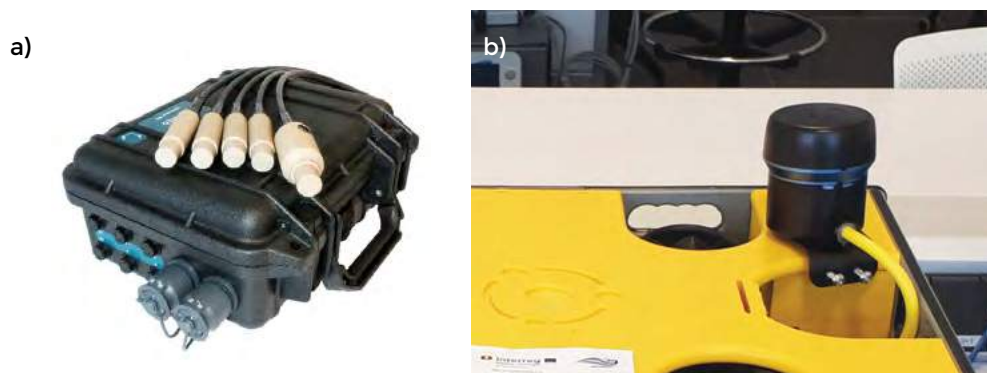
Otra técnica bien conocida es el llamado SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) en la que la localización y la construcción del mapa

se realizan al mismo tiempo en base a la identificación de puntos característicos (Aulinas, 2008). Sin embargo, debido a la poca resolución de los sensores de rango en aplicaciones submarinas y la poca singularidad de los puntos característicos en el medio subacuático, las técnicas de SLAM siguen siendo una cuestión abierta para este tipo de aplicaciones.

Las últimas tendencias en localización submarina tienden a considerar el uso combinado de sensores inerciales con sistemas de posicionamiento acústico (USBL, SBL y LBL). Sin embargo, estos sistemas presentan varios inconvenientes. Por una parte, requieren una calibración precisa de la velocidad con que se transmiten las señales, y por otra sufren los problemas de caminos múltiples de propagación y aparición de rebotes propios de los sistemas acústicos. Otra desventaja es que tienen un alcance limitado y solo se pueden aplicar en áreas confinadas (Paull et al., 2014). En la siguiente sección se detallan algunas de las características más importantes de estos sistemas.

En cuanto al desarrollo de la arquitectura de control propuesta para los HROVs, en Gómez-Bravo et al. (2021) se describe una aplicación de ésta para realizar operaciones de mantenimiento dentro de una balsa que constituye una instalación piscícola de intemperie.

En esta aplicación, el módulo de información procesada tiene como misión proporcionar información al usuario sobre los elementos de interés que se encuentran alrededor del ROV, estableciendo su localización dentro de la instalación explotada y marcando el rumbo necesario para visitar las proximidades del elemento. Con esta información el operador bien podrá navegar manualmente hasta las cercanías del objeto seleccionado o elegir el modo de conducción automática. El sistema desarrollado se basa en el uso de un módulo de posicionamiento acústico SBL (*Water linked*) (figura 4a) que permite



**Figura 4.** a) Water linked (<https://bluerobotics.com/>); b) Ping360.

geolocalizar el vehículo dentro de la balsa. Adicionalmente, el vehículo se encuentra dotado un sensor sonar PING 360 (figura 4b) que permite registrar objetos que se encuentran en el entorno del vehículo.

Como puede comprobarse en la figura 5a, en estas instalaciones la visibilidad bajo el agua es muy limitada por lo que la conducción del vehículo sin información adicional a la visual es dificultosa. Por ello, la información proporcionada por el sonar es procesada para identificar el conjunto de objetos que, encontrándose en el entorno del HROV, puedan ser de interés para el operador (figura 5b).

Esta información incluye la ubicación de los objetos con relación al vehículo y su tamaño (figuras 5a, 5b y 5c). Los datos relativos a la localización del vehículo y a la posición de los objetos son fusionados para tener una representación geolocalizada del mapa de objetos (figura 6a). Esta información es proporcionada al operador que seleccionara el objeto o zona de interés que desea visitar.

A partir de aquí, el sistema indica el rumbo que ha de seguir el operario si quiere operar el HROV de forma manual. Por el contrario, si se desea una conducción automática, será el HROV el que, en primer lugar, se reorienta automáticamente hacia el objeto seleccionado y se desplace hasta las cercanías de éste quedando a una distancia predeterminada del mismo.

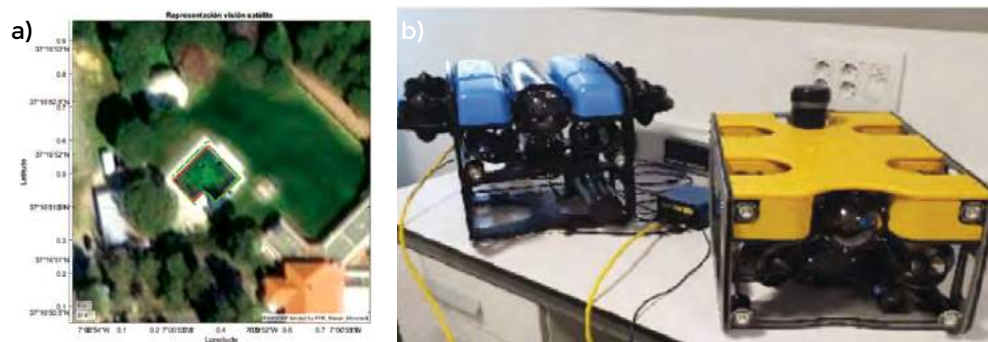


**Figura 5.** a) Medidas proporcionadas por el sonar; b) Experimentación en piscina; c) Información procesada proporcionada al operador en el interfaz de usuario.

La metodología propuesta en este proyecto se ha implantado en dos ROV comerciales, BlueROV2 y SibiuPro (figura 6b). Ambos vehículos han sido equipados con sensores que permiten la ejecución de tareas en un estanque piscícola, estando preparados para tomar valores físico-químicos del ecosistema, adquirir valores telemétricos, percibir información del entorno

y establecer la pose del vehículo mediante un sistema de posicionamiento submarino.

En los siguientes apartados se describen las principales características de los sensores que suelen ir embarcados en vehículos para intervenciones submarinas y que permiten realimentar la información necesaria para implementar tanto operaciones autónomas como teleoperadas o híbridas.



**Figura 6.** a) Obstáculos geolocalizados; b) BlueROV2 y SibiuPro (de izquierda a derecha)

### 5.3 Sensores acústicos para la localización submarina

Un sistema USBL (*Ultra-Short BaseLine*) (Petillot et al., 2019) consiste en un transceptor que se fija a la parte inferior de un barco y un transpondedor que es transportado por el vehículo que se desea localizar. La localización del vehículo se realiza a partir de los rangos de distancia que son medidos por el transceptor. Su funcionamiento se basa en la emisión de un pulso acústico por parte del transceptor. Este es recibido por el transpondedor que contesta con su propio pulso. En el lado del transceptor, el rango de distancia se determina a partir de la medida del tiempo empleado desde que se emitió el pulso hasta que es recibido. El transceptor normalmente posee tres o más transductores separados por una estructura de 10 cm o menos. Mediante la medida de diferencia de fase de las señales recibidas por los transductores es posible medir la dirección en la que está situado el transpondedor. También es posible trabajar con una configuración inversa en la que el transceptor está situado en el vehículo y el transpondedor se ubica en el objetivo a alcanzar, de manera que es dicho objetivo el que queda localizado respecto al vehículo.

Los sistemas SBL (*Short BaseLine*) (Christ y Wernli, 2014) poseen una estructura y funcionamiento parecido al de los USBL pero a diferencia de estos, los transceptores se montan en una estructura que permite variar la distancia entre ellos. En este caso, la precisión de la medida mejora en tanto lo haga esta distancia.

Los sistemas LBL (*Long BaseLine*) (Petillot et al., 2019) se caracterizan porque utilizan redes de estructuras de transpondedores. Ahora, el vehículo es quien transporta el transceptor. Habitualmente se utilizan para abarcar un espacio de trabajo de mayor dimensión que los USBL y los SBL. Su utilización permite obtener una precisión de posicionamiento muy alta y una estabilidad de la estimación de la pose que es independiente de la profundidad del agua.

Cuando es necesaria una localización absoluta del vehículo, estos sistemas acústicos se suelen combinar con sistemas de localización GNSS conectados a la base de los transpondedores, de manera que una vez conocida con precisión la localización de la base, el geoposicionamiento absoluto del vehículo se obtiene mediante la combinación de la localización local y la de la base.

#### 5.4 Retos abiertos en la navegación submarina

El mayor reto pendiente desde el punto de vista de la realización de tareas submarinas se encuentra en la navegación en un entorno desconocido, sin información a priori de su estructura, sin actualización externa de la posición y sin utilizar costosas infraestructuras. La reducción de la incertidumbre, dadas las limitaciones de los sistemas de localización, también es un asunto pendiente dentro de este reto.

Igualmente queda como reto abierto para los años venideros la utilización de múltiples vehículos que colaboren en la ejecución de tareas submarinas. A este respecto, la mayor limitación se encuentra en utilizar el mismo medio de comunicación (el acústico), con un ancho de banda muy limitado, para transportar la información de dos tareas diferenciadas: la navegación y la coordinación entre vehículos (Petillot et al., 2019).

#### 5.5 Sensores para la percepción en aplicaciones submarinas

Hay que tener en cuenta, que el objetivo de una misión puede estar más allá de la realización de las tareas típicas de navegación, siendo necesario entonces el desarrollo de un sistema de percepción inteligente que atienda a la realización de otras tareas que la misión pueda demandar: iden-

tificación, clasificación, etc. No obstante, debido a las restricciones de flotabilidad, la cantidad y naturaleza de los sensores que puede llevar a bordo un vehículo submarino están muy limitadas. Básicamente hay dos tipos de sensores que pueden utilizarse para desarrollar sistemas de percepción en aplicaciones submarinas: ópticos y acústicos.

### 5.5.1 Sensores ópticos

Como en las aplicaciones de robótica terrestre y aérea, las cámaras pueden utilizarse para detección de objetos, inspección, reconstrucción y clasificación (Williams y Dugelay, 2016). Pueden también utilizarse para evitar colisiones o para mantenerse a una distancia de seguridad de un obstáculo o del fondo. Es de destacar las posibilidades que ofrece la utilización de cámaras hiperespectrales (Johnsen, 2016) y cámaras de visión estéreo que permiten la realización de tareas submarinas con mayor precisión (Ouyang, 2012). Sin embargo, las condiciones de visibilidad son una desventaja para la utilización de estos sensores. La falta de iluminación y la turbidez del medio acuático limitan bastante el uso de sensores ópticos, ya que la posibilidad de utilizar iluminación artificial está limitada por la capacidad de carga del vehículo.

### 5.5.2 Sensores acústicos

Son diversos los sensores acústicos que pueden utilizarse para aplicaciones submarinas. Un ejemplo son los sensores de eco, para medir la distancia al fondo, cuyo fin es mantener al vehículo a cierta distancia de seguridad del mismo (Petillot et al., 2019). Otro tipo de sensores acústicos son los sonares de imagen (Karabchevsky et al., 2011), que pueden utilizarse para mapear fondos submarinos, búsqueda de objetos o realización de medidas topográficas. Los sónares de barrido lateral (Coiras et al., 2007) tienen una gran similitud con estos sensores pero presentan una resolución inferior.

Los sonares multihaz pueden ser utilizados para detección y reconocimiento de objetos, así como para realizar labores de navegación. En los últimos años, este tipo de sensores presentan frecuencias de trabajo más altas (hasta 3 MHz) proporcionando imágenes con resolución milimétrica (menos de 10 mm). Estos sonares se pueden usar para inspeccionar con precisión distintos tipos de estructuras. Asimismo, varios autores han informado de que este tipo de dispositivos puede utilizarse para contar y evaluar el comportamiento de los peces (Moursund et al., 2003; Tiffan et al., 2004). Por ejemplo, Holmes et al. (2006) utilizaron un sistema de sonar de identificación de doble frecuencia (DIDSON) para evaluar y contar salmones rojos (*Onchorhynchus nerka*) en poblaciones que regresan a desovar en el río

Fraser (Canadá). Estos autores informaron de que las regresiones entre los recuentos del DIDSON y los datos de recuento visual obtenidos mediante procedimientos tradicionales eran estadísticamente indistinguibles de la línea 1:1, lo que les permitió estimar de forma muy precisa el número de peces para cada evento migratorio. Asimismo, Han et al. (2009) utilizaron el sistema DIDSON para el recuento y el dimensionamiento de rabiles de piscifactoría (*Seriola quinqueradiata*) de gran tamaño criados en jaulas de red marina. Estos autores concluyeron que este sistema de sonar podía utilizarse para contabilizar eficazmente el número de peces grandes en este tipo de piscifactorías. Por otro lado, Grothues et al. (2016) utilizaron los retornos de sonares de barrido lateral de alta frecuencia conectados a vehículos submarinos autónomos (AUV) que fueron programados para llevar a cabo misiones realizadas específicamente para el reconocimiento sonar de peces. Sus resultados mostraron que, aunque este tipo de sonar no está diseñado específicamente para este objetivo, puede utilizarse para identificar, medir y contar peces, sobre todo si los peces están agrupados formando bancos.

Por su parte los sensores acústicos presentan sus propias desventajas, como es el caso de la correcta calibración en función del estado del medio acuático (temperatura, salinidad, etc.) o la aparición de sombras acústicas y artefactos en las medidas que deben ser correctamente tratados con algoritmos de filtrado para que la información proporcionada sea adecuadamente interpretada (Petillot et al., 2019).

### 5.6 Retos en el desarrollo de sistemas de percepción submarina

Una manera de resolver las desventajas que presentan tanto los sensores ópticos como los acústicos puede encontrarse en la combinación de ambos o incluso la combinación con otro tipo de sensores como es el caso los LIDAR submarinos (McLeod et al., 2013). Esta fusión sensorial puede usarse para hacer la navegación más fiable y segura o para realizar tareas de reconstrucción 3D o de búsqueda e inspección (Ferreira et al., 2016). Sin embargo, esta metodología es un desafío complejo en el que todavía está pendiente encontrar una solución robusta.

Por otra parte, independientemente de los condicionantes físicos y de compatibilidad de los diferentes sensores funcionando conjuntamente, el principal reto al que se enfrenta el uso y por tanto el desarrollo de los sistemas de percepción submarina es el almacenamiento, gestión y análisis automático de los datos generados por estos dispositivos. Por ejemplo, en un transecto promedio de 20 minutos en una balsa de cría de tamaño medio en el que se haga uso de un sistema sonar de imagen como DIDSON, ARIS o OCULUS funcionando a una frecuencia promedio de 1.2 MHz, se genera



un archivo de imagen de aproximadamente 5 GB en el que se pueden identificar miles de peces. El procesamiento manual de estas imágenes con el objetivo de estimar abundancia y biomasa implica un número de horas de trabajo tal que claramente se difumina la utilidad del uso de estos dispositivos y la información generada. Por tanto, el problema de la obtención de conocimiento útil para la gestión de instalaciones acuícolas generado a partir del análisis de la información proporcionada por sistemas de percepción submarina instalada en ROVs solo puede ser abordada mediante modelos y aproximaciones integradas dentro del campo de la Inteligencia Artificial.

## 6. Procesamiento y análisis de la información generada por sensores instalados en ROVs y sistemas fijos: Inteligencia Artificial

A mediados de la década de los 60, Watt (1966) escribió un trabajo en el que indicaba que el gran problema del avance de algunas ramas de las ciencias como la ecología o las ciencias pesqueras era, más que la obtención de datos, la capacidad de análisis de la información generada así como la extracción de conocimiento. Este autor indicó que una de las tecnologías más prometedoras era el uso y análisis de imágenes así como su interpretación automática mediante sistemas computerizados.

Los primeros sistemas automáticos de análisis de imágenes mediante computador fueron desarrollados por la *National Biomedical Research Foundation* a través del programa FIDAC (Ledley, 1965). En esencia, este sistema enfrentaba el negativo de una fotografía a un tubo generador de rayos catódicos que proporcionaba una matriz de filas y columnas con puntos de luz. La intensidad de cada punto era medida en una escala de siete niveles de grises y esa información era transmitida a un computador digital mediante un registrador especial. A partir de esta digitalización inicial, el sistema era capaz de descubrir patrones comunes a todas las fotografías tomadas.

Desde el desarrollo de estos primeros sistemas de análisis de imágenes se ha avanzado significativamente tanto en la forma de proporcionar la información como en el volumen de datos generados (Bui, 1991; Rose, 1992; Whorff y Griffing, 1992; Reid y Simmons, 1993; Caltran y Silan, 1996; Bates y Tiersch, 1997; Cadrin y Friedland, 1999; LeFeuvre et al., 2000; Ting-Wan y Jian-Hua, 2008; Oya y Kawasue, 2008; Scheneider et al., 2019), por lo que hoy en día no se concibe la extracción de conocimiento a partir de registros de imágenes sin la intervención de diferentes metodologías incluidas dentro del campo de la Inteligencia Artificial.



La Inteligencia Artificial es un área científico-tecnológica que está transformando actualmente el mundo en unos niveles que recuerdan al que en su día produjeron el motor de vapor o la electricidad, o hace menos tiempo, el microprocesador o la aparición de la propia Internet. Su objetivo es producir máquinas o programas que exhiban comportamiento inteligente en determinados entornos de aplicación, es decir, propio de actuaciones de seres humanos. Se trata de una disciplina transversal que ha alcanzado su madurez y cuyas innumerables aplicaciones hoy en día alcanzan áreas tan diversas como la industria, la agricultura, pesca y acuicultura, la salud y medicina, o la educación. Por primera vez desde sus inicios, sus múltiples aplicaciones han dejado de parecer ya cosa de la ciencia ficción sino una realidad palpable que nos rodea en el día a día, y aún en expansión. La implantación que se está llevando a cabo actualmente en todas las áreas, indudablemente definirá de forma decisiva el mundo en el que viviremos.

### *6.1 Computación Inteligente, Ciencia de los Datos y Big Data, y Machine Learning*

Un elemento en común de las diferentes tecnologías de vanguardia en Inteligencia Artificial es que utilizan los datos como motor, bien en su fase de diseño, o bien de forma más específica, posteriormente para perfeccionar su comportamiento. Los Sistemas Inteligentes, es decir, los contruidos empleando estas tecnologías para resolver problemas, han dejado de emplear de forma dominante el conocimiento del que se les dotaba en la fase de programación por los propios programadores que lo creaban, a utilizar el conocimiento que obtienen a partir de los datos disponibles, es decir, a aprender por sí mismos a partir de la experiencia previa.

Hoy en día, la captación de datos no es en la mayoría de los casos una dificultad pues los grandes avances en el mundo de la electrónica y los sensores, capaces de medir infinidad de parámetros con unos costes de implantación muy reducidos, la difusión de dispositivos microcontroladores en todo tipo de aplicaciones (incluso los que portamos los humanos y con los que generamos información no sólo indirectamente por nuestra actividad diaria sino también proactivamente: social media), y las redes de interconexión entre dispositivos, permite recoger datos de todo tipo, y por tanto, alimentar a todas estas tecnologías entorno a la Inteligencia Artificial que los utilizan. Sin embargo, el almacenamiento masivo de este volumen y particularmente la gestión y el procesamiento de todos estos datos sí continúa siendo un reto, y nos introduce en la disciplina del *Big Data* (Herrera, 2014; Li et al., 2015), o en general a la Ciencia de los Datos, como tecnología global que trata de obtener utilidad del estudio de los datos como ciencia (Dhar, 2013), abarcando desde su preparación y análisis, hasta su visualización y gestión (Cady, 2017).

La Computación Inteligente es una disciplina integrada por un conjunto de técnicas dentro del campo de la Inteligencia Artificial, tales como las Redes Neuronales Artificiales [incluyendo al *Deep Learning* (Goodfellow et al., 2016)], los Algoritmos Evolutivos, la Inteligencia de Enjambre, los Sistemas Inmunológicos y los Sistemas Difusos, orientadas a resolver problemas complejos del mundo real donde otros recursos, matemáticos y estadísticos o tradicionales, no podrían hacerlo por su complejidad intrínseca, por la necesidad del manejo de incertidumbre o por su aleatoriedad natural. Estos recursos de la Computación Inteligente, son precisamente empleados de forma masiva en la Ciencia de los Datos.

En particular los Sistemas Difusos (Mamdani, 1977) son muy empleados desde hace décadas tanto para modelar sistemas (predicción y descripción, en entornos de regresión, clasificación y agrupamiento) como para control (Herrera, 2008). Sus cualidades más valoradas se basan en sus aptitudes para razonar de forma aproximada en entornos de incertidumbre, así como su capacidad expresiva, interpretabilidad o posibilidad de supervisión humana del conocimiento que manejan. En el campo de la robótica, tiene aplicación en control inteligente, en navegación o en fusión sensorial, por citar algunos ejemplos clásicos.

Por otro lado, los Algoritmos Evolutivos (Eiben y Smith, 2003) son muy empleados por sus buenas cualidades para tareas de búsqueda, optimización y aprendizaje. Son robustos, bastante independientes del problema a resolver, y por ello con mucha frecuencia empleados en problemas complejos, es decir, con elevado número de variables, diversos óptimos locales, más de un objetivo, multimodales, etc. (Freitas, 2002). El nivel de madurez de su ámbito de desarrollo es bastante elevado, y así, es fácil encontrar bibliografía sobre los modelos más adecuados para resolver problemas en diferentes ámbitos o circunstancias. Los Algoritmos Evolutivos junto con los Sistemas Difusos han dado lugar a la disciplina de los Sistemas Difusos Evolutivos (Fernández et al., 2016) donde los segundos permiten diseñar y aprender las bases de conocimiento de los primeros a partir de conjuntos de datos siendo, por tanto, una herramienta de gran utilidad práctica.

El *Deep Learning* (Goodfellow et al., 2016) o aprendizaje profundo es un área muy de actualidad del *Machine Learning*, que consiste en el empleo de modelos avanzados de redes neuronales artificiales, es decir, se trata de modelos predictivos capaces de crear estructuras internas de conocimiento, incluso más allá en algunas áreas específicas de lo que los humanos somos capaces, por lo que son aptas para resolver problemas complejos. El gran desarrollo del *Deep Learning* se sustenta a su vez en la madurez de

otras dos tecnologías: el *Big Data*, para la gestión de los grandes volúmenes de datos o ejemplos que son necesarios para su entrenamiento; y la computación de altas prestaciones, en particular, la computación basada en *Graphics Processing Units* (GPUs), por su capacidad de procesamiento con múltiples elementos en paralelo. En la actualidad, esta tecnología está siendo revolucionaria por su amplia aplicación en múltiples áreas, si bien, destaca particularmente en el procesamiento de imágenes y/o videos, es decir, en el área de la visión por computador (reconocimiento o detección de elementos en tiempo real en una escena, seguimiento de objetos, comprensión de imágenes, etc.), o señales complejas desde sensores.

## 6.2 Big Data

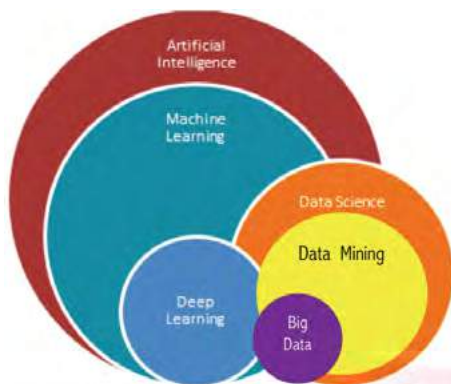
Se estima que en 2020 habrá en el mundo alrededor de 40 trillones de gigabytes de datos de los que el 90% se habrán generado durante 2018 y 2019 (<https://techjury.net/stats-about/big-data-statistics>). El *Big Data* hoy en día, comprende todo un conjunto de tecnologías desarrolladas a partir de una tecnología seminal ideada por Google en 2003, denominada *MapReduce* (Dean et al., 2008). Esta consiste en una plataforma para llevar a cabo, de forma relativamente sencilla, almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de información de forma distribuida en grandes *clusters* o granjas de servidores, frente a procedimientos tradicionales de procesamiento paralelo y distribuido de la época. *MapReduce* se ha convertido en un paradigma propiamente de almacenamiento y tratamiento distribuido de datos (Fernández et al., 2014).

Con posterioridad y en un entorno de rápida y continua evolución, cabe destacar entre las tecnologías que se pueden denominar como “herederas” de *MapReduce* a la plataforma *Apache Spark* (Karau et al., 2015), posiblemente la tecnología dominante en estos momentos en entornos de *Big Data*, creada específicamente para mejorar en particular los aspectos de procesamiento distribuido de su antecesora. *Apache Spark* da cabida no sólo al mismo modelo de procesamiento *MapReduce* sino también a otros, inclusive el suyo, y en general todos ellos con la particularidad de hacer un uso más eficiente de la memoria bajo un modelo de abstracción propio cuyos resultados prácticos permiten unas mejoras de velocidad muy notables -en base a una buena escalabilidad horizontal (Mailavaram et al., 2019), diseño de algoritmos iterativos de forma eficiente y en general una mejor gestión y flexibilidad en el flujo de datos para el diseño de experimentos. Asimismo, podemos señalar también propuestas posteriores al citado *Apache Spark*, tales como *Apache Flink* (Hueske y Kalavri, 2017), orientada

a facilitar la implementación del tratamiento de datos en tiempo real, muy frecuente en diversas aplicaciones del mundo real.

La tecnología entorno al *Big Data* permite el procesamiento de ingentes cantidades de datos, que sin ella, no habría sido posible, pero esta tecnología en sí misma, no permite encontrar el conocimiento que hay más allá de la información si no es gracias a su hibridación con el *Machine Learning* (Cai y Zhu, 2015; Rao et al., 2019) y, por tanto, manteniéndose todo el conocimiento desarrollado durante las últimas décadas en esta área, al servicio de las nuevas implementaciones para grandes volúmenes de datos.

En la Figura 7 se puede observar una representación de la ubicación y las hibridaciones de varias de estas áreas comentadas dentro del marco de global de la Informática (o más propiamente, del *Computer Science*).



**Figura 7.** Ubicación del *Deep Learning* y el *Big Data*, dentro del marco del *Data Science*, el *Machine Learning* y la Inteligencia Artificial, a su vez en el global ámbito del *Computer Science* (Gutiérrez-Estrada et al., 2019)

Las citadas hibridaciones se pueden encontrar en infinidad de trabajos científicos tales como aquellos orientados a preprocesamiento (García et al., 2016), estudios con problemas de datos no balanceados (Chawla et al., 2004; He y García 2009) e inclusive en entornos de *Big Data* (Triguero et al., 2015), selección de instancias (Brighton y Mellish, 2002) y en particular con *Big Data* (Triguero et al., 2015), selección de características (Jai y Zongker, 1997; Kira y Rendell, 1992) también con casos específicos en *Big Data* (Peralta et al., 2015), discretización (Liu et al., 2002) y discretización en *Big Data* (Ramírez-Gallego et al., 2016), o sistemas borrosos evolutivos (Alcala-Fernández et al., 2007; Márquez et al., 2007) y también ellos con *Big Data* (Márquez et al., 2012; Márquez et al., 2013; Márquez et al., 2017; López et al., 2019).

### 6.3 Aplicaciones de la Inteligencia Artificial a la estimación de la biomasa de peces

El *Big Data* en la acuicultura industrial, de modo similar a otros procesos productivos, se utiliza fundamentalmente para realizar análisis entorno a la producción, es decir, proporcionar conocimiento útil a la gestión de este tipo de explotaciones, que posibilite la toma de decisiones orientadas a la mejora de la productividad y la eficiencia del proceso completo. En este sentido, y para cumplir este objetivo, los datos, que son la fuente que alimenta este recurso, deben obtenerse de todo el proceso, empleando para ello desde diversas herramientas de adquisición en la explotación, hasta mecanismos de trazabilidad del producto en los mercados.

Centrados en el proceso de producción, la estimación de la biomasa o abundancia de peces en una explotación es una de las necesidades más importantes en la acuicultura, pues no sólo permite observar su crecimiento y momento óptimo de captura, sino que basado en ella se puede administrar la alimentación diaria, y controlar otros aspectos importantes como la densidad de la población.

Los métodos de estimación tradicionales se basan en la intervención humana, es decir, son procesos invasivos de muestreo manual, que además de ser tediosos, afectan al estrés de los animales. Por este motivo existe en el sector la necesidad de disponer de elementos no invasivos y más rápidos para obtener las estimaciones. Estos elementos se basan tanto en el uso de sensores apropiados, como de los elementos de cálculo adaptados a las medidas realizadas por los citados sensores que consideren también al resto de parámetros necesarios de la explotación. Una revisión de los métodos no intrusivos que se han empleado para este fin se puede encontrar en Li et al. (2020), donde puede observarse que uno de los elementos con mayor potencialidad es la visión artificial, pues si bien su uso para la estimación de biomasa se remonta a algunos años atrás (Hufschmied et al., 2011) (antes si sólo se considera para realizar determinadas medidas fisiológicas (Naiberg et al. 1993), su crecimiento es particularmente destacable desde 2015, motivado por un lado por el abaratamiento de los sensores, pero sobretodo, por los avances en los recursos de procesamiento surgidos en el ámbito de la Inteligencia Artificial, y *Deep Learning* en particular.

En Li et al. (2019) se concluye que el sector se encuentra en un camino de necesidad de mejora en cuanto a precisión y aumento del nivel de inteligencia (basado asimismo principalmente en las técnicas de Inteligencia Artificial) empleado, el cual se consigue mediante la cooperación entre los expertos en piscifactorías, científicos e ingenieros.

## 7. Estimación de abundancia y biomasa en balsas de cría de esteros mejorados. Aplicación de sonares de imagen.

Hoy en día, los esteros mejorados (EM) son uno de los principales sistemas de cultivo en el sur de la Península Ibérica, particularmente en Andalucía. Estos sistemas de cría de peces proporcionan aproximadamente dos tercios de la producción acuática de esta zona (Gutiérrez-Estrada et al., 2012) lo que ha supuesto una importante contribución a la economía regional en los últimos años. Por otro lado, además del factor económico, estos sistemas tienen una gran importancia desde el punto de vista de la conservación de los espacios naturales, ya que desarrollan su actividad en extensas explotaciones salinas abandonadas que son reacondicionadas y mantenidas para cultivar de forma sostenible peces de muy alta calidad.

La producción sostenible proporciona a los EM una posición competitiva frente a sistemas más intensivos ya que estos sistemas se encuadran dentro de la Iniciativa de Crecimiento Azul la cual es una estrategia fomentada por la Unión Europea de apoyo al crecimiento sostenible del sector marino-acuícola que reconoce el gran potencial para la innovación de este sector de la sociedad y su importancia como motor de la economía europea (Soto et al., 2008; FAO, 2010; European Commission, 2011; FAO, 2017; Bruguère et al., 2018). En este marco, el consumidor como eslabón final del sector acuícola, percibe que el pescado producido es un producto de muy alta calidad criado de forma sostenible y respetuosa con el medio ambiente y, por tanto, está dispuesto a pagar más por él. Sin embargo, la consolidación de estos sistemas como una industria sólida y desarrollada depende en gran medida de la mejora y adaptación continua para hacer las instalaciones más eficientes y rentables (Liu et al., 2013; Pulido-Calvo et al., 2014). De esta forma, se deben implementar procesos y procedimientos que faciliten el manejo de los peces en los estanques, satisfaciendo los exigentes criterios de sostenibilidad y productividad establecidos.

En este sentido, un aspecto crucial que puede hacer peligrar la viabilidad económica en este tipo de instalaciones es la correcta cuantificación y control del número de peces en los estanques. En este tipo de instalaciones los piscicultores saben cuántos peces introducen en los estanques, pero desconocen la abundancia y distribución de la biomasa al final de la temporada de cultivo ya que la mortalidad es muy difícil de contabilizar y las tasas de crecimiento pueden ser muy diferentes entre los individuos, balsas e instalaciones.

Tradicionalmente, la estimación de la abundancia de peces en este tipo de instalaciones puede afrontarse desde diferentes enfoques, aunque normalmente se lleva a cabo a partir de una muestra representativa. La ob-

tención de esta muestra implica la gestión de la lámina de agua y la intervención de varios trabajadores durante un periodo de tiempo relativamente largo. Este enfoque proporciona una instantánea de la abundancia y la biomasa en un momento determinado e implica un manejo de los peces y la balsa que puede introducir factores de estrés en la población de peces. Una alternativa a esta aproximación es el uso de procedimientos no invasivos basados en sistemas de sensores como sonares multihaz o sonares de imagen (Fore et al., 2018; Li et al. 2020).

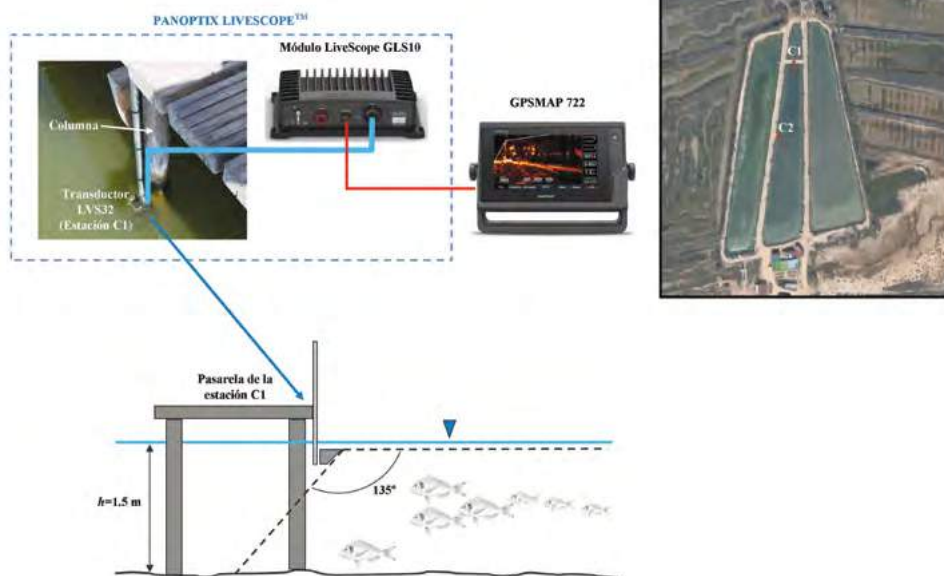
### 7.1. Salinas del Astur

La evaluación de los sistemas sonar de imagen para la estimación de abundancia y biomasa en el marco del proyecto KTTSeaDrones se llevó a cabo en las instalaciones de Salinas del Astur. Esta piscifactoría es un estero mejorado de tamaño pequeño-mediano situado en el sur de España ( $37^{\circ} 12' N$ ,  $6^{\circ} 59' W$ ) cerca Punta Umbría, en la provincia de Huelva (Andalucía), y estando dedicada fundamentalmente a la producción de dorada (*Sparus aurata*). Construida sobre una antigua salina cuenta actualmente con tres estanques con una profundidad media de 1,5 m y un volumen total de agua de  $7.000 m^3$ ,  $5.100 m^3$  y  $7.950 m^3$ , respectivamente (Figura 8). El agua se bombea desde el río Bota, que es un afluente mareal del río Odiel. En los estanques, las doradas crecen desde un peso de 30-100 g hasta pesos comerciales (alrededor de 400 g). En el momento en el que se realizó el estudio, un total entre 10.500 y 12.375 peces con un peso promedio de 250 g estaban contenidos en la balsa central de Salinas del Astur.



**Figura 8.** Localización de Salinas del Astur





**Figura 9.** Representación esquemática de la posición del Sistema Panoptix LiveScope™ en la balsa central de Salinas del Astur (estación de censo C1) y su haz de sonar. Arriba a la derecha, posición y dirección del haz en las estaciones de censo C1 y C2.

## 7.2. Obtención de datos y procesamiento de imágenes sonar

La recogida de imágenes del sonar se realizó mediante un transductor Garmin LVS32 conectado al sistema Panoptix LiveScope™ funcionando en alta frecuencia (1,1 MHz) y en modo de vista frontal. En este modo, el haz del transductor escanea un abanico de 135 grados de amplitud y 20 grados de ancho. Esta configuración muestra una imagen de vídeo realista y monocromática de los peces mientras se mueven a través del haz del sonar (Figura 9).

Las imágenes se obtuvieron mediante el plotter Garmin GPSMAP 722 de 7" conectado al sistema Panoptix LiveScope™. La extracción de información de las imágenes se llevó a cabo mediante la asistencia del software Labellmg, el cual es una herramienta de anotación gráfica de imágenes y etiquetado de objetos originalmente desarrollada por Russell et al. (2013). Labellmg está escrito en Python y utiliza Qt para su interfaz gráfica. El usuario puede etiquetar, identificar y marcar cada señal de los peces con una caja cuyas coordenadas ( $xmin$ ,  $xmax$ ,  $ymin$ ,  $ymax$ ) se registran en un archivo XML (Figura 10).



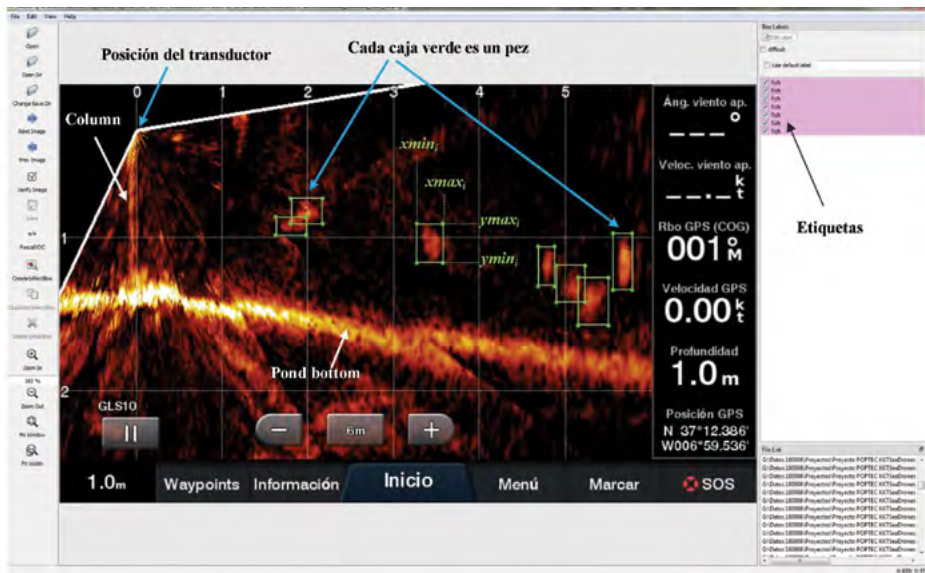


Figura 10. Tratamiento de imágenes sonar con el software Labelling

Dado que el haz del transductor funcionaba en modo de vista frontal, la altura de los peces se detectó en todos los casos independientemente de la posición del pez en relación con el eje de emisión-recepción del transductor. La altura de cada pez se estimó a partir de  $y_{max} - y_{min}$ . En función de esta diferencia de escala se dedujo la longitud y el peso de los peces a partir de una muestra obtenida en Salinas del Astur (Figura 11). Las relaciones experimentales obtenidas se muestran en la figura 12.

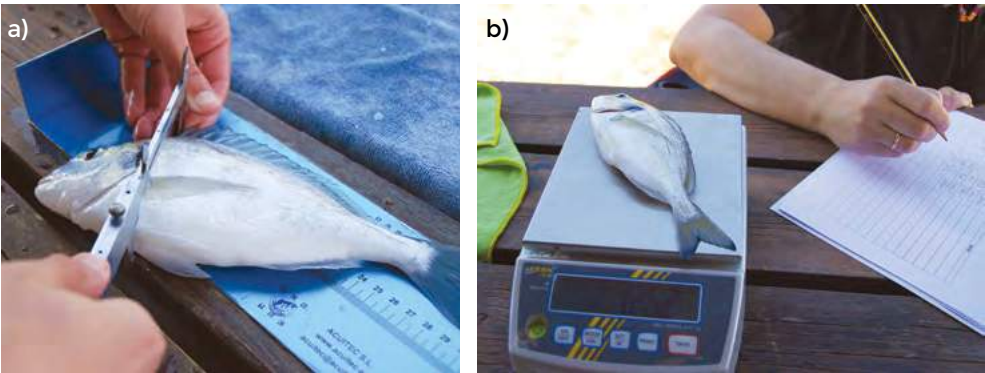
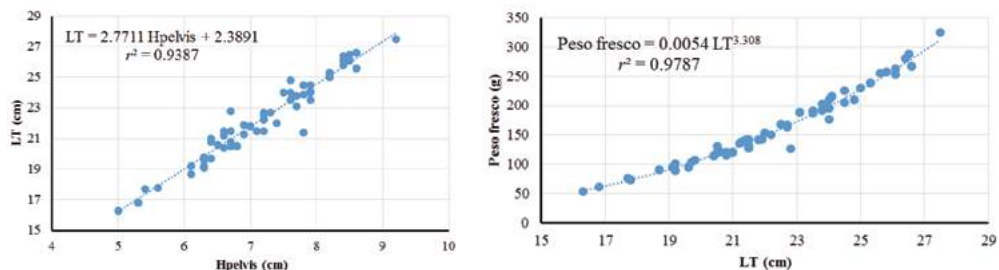


Figura 11. Toma de datos en Salinas del Astur; (a) Tamaño a la altura de la pelvis (Hpelvis); (b) Medida del peso fresco



**Figura 12.** Toma de datos en Salinas del Astur; (a) Tamaño a la altura de la pelvis (Hpelvis); (b) Medida del peso fresco

### 7.3. Estaciones de censo para estimar el número de peces

La estimación de la abundancia de una especie mediante procedimientos de estaciones de censo surgió como alternativa a los métodos de transectos para la evaluación de las poblaciones de aves en zonas escarpadas y parceladas, donde es muy difícil establecer una línea de progresión, o en hábitats morfológicamente complejos donde la detección de aves es muy difícil (Ramsey y Scott, 1979; Reynolds et al., 1980; Fancy, 1997). Estos métodos proporcionan índices de recuento visual a partir de los datos obtenidos por observadores (o detectores) situados en un punto fijo o estación. En esta estación el observador-detector registra todos los ejemplares detectados en bandas concéntricas de anchura prefijada. Mediante la repetición del muestreo en diferentes estaciones se puede obtener una distribución de contactos por bandas concéntricas y a partir de estos datos se puede estimar la abundancia total. Las condiciones en las que se aplican estos métodos de estimación de la abundancia son similares a las encontradas en la balsa de cultivo, lo que hace posible que se puedan adaptar para estimar la abundancia de peces.

Este método supone que la detectabilidad del espécimen [ $g(x)=1-cx$ ] es una función que depende de una constante  $c$  que a su vez depende de muchos factores (Robbins, 1981). En nuestro caso,  $c$  depende de la posición relativa del pez en relación con el haz de barrido y de la capacidad del observador para diferenciar entre un pez y el ruido en las imágenes del sonar. Por otro lado, la estimación de la densidad (especímenes/ $m^3$ ) se basa en la determinación de un cono de detectabilidad (Järvinen, 1978) por lo que aproximadamente  $2/3$  (66%) de los ejemplares no son detectados. De esta forma, el valor del índice de abundancia estimado ( $n_t$ ) que dependen del radio de detección del transductor, el ángulo que determina la anchura del

haz del transductor y la profundidad media en la balsa debe incrementarse en un 33%.

Se establecieron dos puntos de censo (C1 y C2) (Figura 9). Cada punto se utilizó como estación de censo en días diferentes (C1: 16 de julio de 2020; C2: 24 de julio de 2020). Cada día se grabaron imágenes de sonar a intervalos de cinco minutos, lo que supuso 78 periodos de recuento. Teniendo en cuenta que las imágenes se captaron en dos zonas de registro, suponiendo una función de detectabilidad exponencial y 78 periodos de recuento como eventos independientes, la densidad en los estanques también puede estimarse a partir del procedimiento propuesto por Sutherland (2006).

La utilidad de un índice de abundancia reside en su capacidad para proporcionar información sobre la densidad de una especie. Esta capacidad depende de la proporcionalidad entre el índice de abundancia y la abundancia real (Skalski y Robson, 1992). Sin embargo, no existen estudios experimentales que establezcan relaciones de proporcionalidad entre el índice de abundancia y la abundancia absoluta cuando el índice de abundancia depende del tamaño del detector. Es por ello por lo que Gutiérrez-Estrada et al. (2022) propusieron un factor de corrección de estimador de abundancia ( $cf$ ) en función de la relación entre el tamaño del detector y de la balsa analizada que para el caso de Salinas del Astur fue de un 11% ( $cf = 1,11$ ).

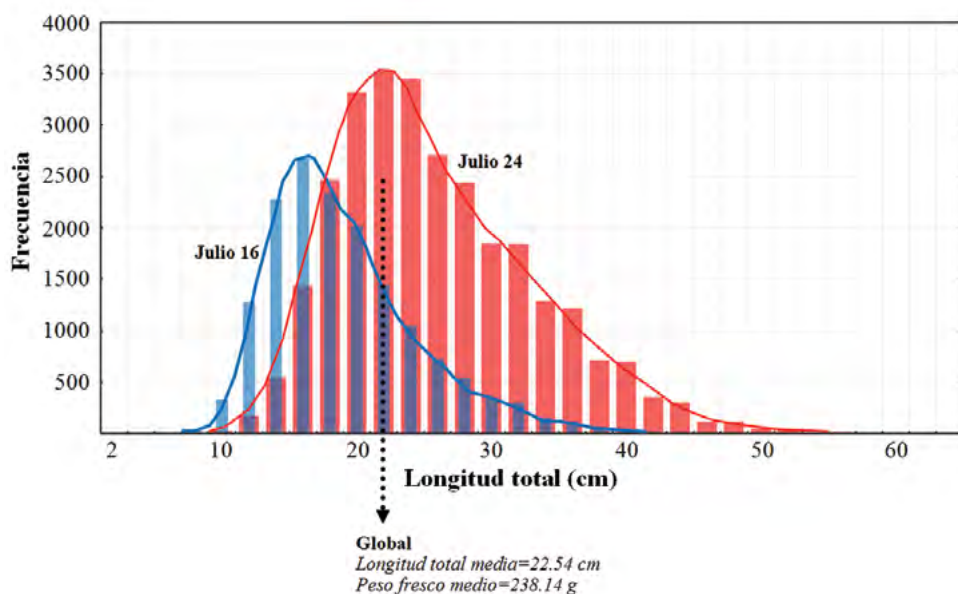
#### 7.4. Estimación de la abundancia

Se registraron un total de 4.003 imágenes entre el 16 de julio (1.851 imágenes) y el 24 de julio (2.152 imágenes) de 2020. La media del número de peces detectados en cada uno de los 78 periodos de recuento de cinco minutos. Los resultados indican que el 16 de julio el número medio fue de  $8,95 \pm 6,16$  peces imagen<sup>-1</sup> 5 min<sup>-1</sup> y por tanto la densidad media para este día fue de 1,58 ejemplares m<sup>3</sup>. El 24 de julio, el número máximo de peces imagen<sup>-1</sup> 5 min<sup>-1</sup> se estimó en  $12,81 \pm 5,62$  lo que supuso una densidad media de 2,26 ejemplares m<sup>3</sup>. Globalmente, la media para ambos días fue de  $10,82 \pm 6,17$  peces imagen<sup>-1</sup> 5 min<sup>-1</sup>. De esta forma, para el primer día (16 de julio) la media de abundancia total estimada en la balsa fue de  $8.039 \cdot cf$  (8924) ejemplares y para el segundo día (24 de julio) la abundancia estimada aumentó a  $11.507 \cdot cf$  (12.772) ejemplares. Esto supone que, combinando ambos días, la abundancia estimada fue de  $9.719 \cdot cf$  (10.848) peces.

Aplicando las relaciones peso-longitud establecidas para Salinas del Astur y teniendo en cuenta la distribución de frecuencia por tamaño en función de las imágenes sonar (figura 13) se estimó que para el 16 de julio la biomasa total estimada fue de 1.007,34 kg y de 3.924,32 kg para el 24 de julio, lo

que supone una biomasa media estimada de 2.508,31 kg. De esta forma, la densidad media en la balsa de cultivo fue de 0,49 kg/m<sup>3</sup>.

A partir del procedimiento propuesto por Sutherland (2006), considerando un total dos zonas de registro y asumiendo una función de detectabilidad exponencial con 78 periodos de conteo independientes, la densidad estimada en el estanque fue de 2,2 ejemplares m<sup>2</sup>, lo que teniendo en cuenta el tamaño del estanque supone una abundancia total de 11.216·cf (12.450) peces.



**Figura 13.** Distribuciones de frecuencia por tamaño estimado y funciones de densidad a partir de imágenes de sonar para el 16 y el 24 de julio (Gutiérrez-Estrada et al., 2022)

## 8. Conclusiones

La correcta planificación y gestión de los lotes de venta en instalaciones de acuicultura de esteros mejorados requiere la evaluación detallada de la producción en las balsas de cultivo, para lo que es necesario estimar con precisión dos parámetros biológicos básicos: (a) la abundancia o número de ejemplares que constituyen la población contenida en las balsas en un instante determinado y; (b) la biomasa asociada a la abundancia que depende de la distribución por tallas de los peces. Para la obtención precisa de estos

parámetros es fundamental el uso y desarrollo de nuevos procedimientos y equipos que permitan obtener los datos necesarios para su estimación sin modificar el comportamiento de los peces confinados y con una interferencia mínima en las operaciones necesarias para el mantenimiento de la instalación. De esta forma, el uso combinado de pequeñas plataformas robóticas operadas remotamente (ROVs) en las que se integren diferentes sensores como sónares junto con el tratamiento de la información generada mediante técnicas de inteligencia artificial hace posible la estimación de la abundancia y biomasa de forma eficiente, a bajo coste y en tiempo real.

Los resultados obtenidos como consecuencia del desarrollo de la Acción 3 del proyecto KTTSeaDrones (Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras, 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E), del Programa INTERREG VA España-Portugal (POCTEP) 2014-2020, indican que el uso de imágenes de sonar combinadas con procedimientos de estimación utilizados típicamente en el campo del censo de aves puede ser extremadamente exitoso en la operación y gestión de la acuicultura semi-intensiva en estanques tradicionales. La metodología propuesta permite a los acuicultores tener una aproximación muy cercana de la abundancia de peces (al menos tan cercana como la realizada por el acuicultor a partir de métodos tradicionales) de forma rápida, rentable y evitando los problemas asociados a la extracción de ejemplares y la gestión directa de la población. Adicionalmente, el acuicultor puede contar con una herramienta que proporciona la probabilidad asociada a la abundancia por tallas contenidas en los estanques lo que permite una eficiente planificación y gestión de los lotes de venta.

## 9. Bibliografía

- AGUZZI, J., MANUEL, A., CONDAL, F., GUILLEN, J., NOGUERAS, M., DEL RIO, J., COSTA, C., MENE-SATTI, P., PUIG, P., SARDA, F., TOMA, D., PALANQUES, A. (2011). The New Seafloor Observatory (OBSEA) for remote and long-term coastal ecosystem monitoring. *Sensors* 11, 5850–5872.
- AITCHESON, S.J., ARNET, J., MURRAY, K.R., ZHANG, J. (2000). Removal of aquaculture therapeutants by carbon adsorption: 1. Equilibrium adsorption behaviour of single components. *Aquaculture* 183, 269–284.
- AJEMIAN, M.J., WETZ, J.J., SHIPLEY-LOZANO, B., DALE SHIVELY, J., STUNZ, G.W. (2015a). An analysis of artificial reef fish community structure along the northwestern gulf of Mexico shelf: potential impacts of “rigs-to-reefs” programs. *PLoS ONE* 10, 126354.

- AJEMIAN, M.J., WETZ, J.J., SHIPLEY-LOZANO, B., STUNZ, G.W. (2015b). Rapid assessment of fish communities on submerged oil and gas platform reefs using remotely operated vehicles. *Fisheries Research* 167, 143–155.
- ALANÄRÄ, A. (1996). The use of self-feeders in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) production. *Aquaculture* 145, 1–20.
- ALCALA-FERNANDEZ, J., HERRERA, F., MÁRQUEZ, F.A., PEREGRÍN, A. (2007). Increasing fuzzy rules cooperation based on evolutionary adaptive inference systems. *International Journal of Intelligent Systems* 22(9), 1035–1064.
- ALVIN Review Committee, 1992. Summary Report of the ALVIN review meeting. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.
- AMEND, M., FOX, D., ROMSOS, C. (2001). 2001 Nearshore Rocky Reef Assessment ROV Survey. En: Final Report for 2001 Grant Cooperative Agreement PS01053. (Oregon: Oregon Department of Fish and Wildlife, Marine Habitat Project, Marine Program).
- ANTONELLI, G., FOSSEN, T., YOERGER, D. (2008). Underwater Robotics. En: Springer Handbook of Robotics, 1st ed. B. Siciliano y O. Khatib, Eds. Berlin, Germany: Springer.
- APROMAR (2018). La acuicultura en España. Asociación Empresarial de Acuicultura de España, Madrid 94 pp.
- ATOUM, Y., SRIVASTAVA, S., LIU, X. (2015). Automatic feeding control for dense aquaculture fish tanks. *IEEE Signal Processing Letters* 22(8), 1089–1093.
- AULINAS, J., PETILLOT, Y., SALVI, J., LLADO, X. (2008). The SLAM problem: A survey. Artificial Intelligence Research and Development, Proceedings of the 11th *International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence* 184(1), 363–371.
- AUSTER, P.J., LINDHOLM, J., VALENTINE, P.C. (2003). Variation in habitat use by juvenile Acadian redbfish, *Sebastes fasciatus*. *Environmental Biology of Fishes* 68, 381–389.
- AUSTER, P.J., MALATESTA, R.J., DONALDSON, C.L.S. (1997). Distributional responses to small-scale habitat variability by early juvenile silver hake, *Merluccius bilinearis*. *Environmental Biology of Fishes* 50, 195–200.
- AVNIMELECH, Y. (2006). Biofilters: the need for a comprehensive approach. *Aquacultural Engineering* 34, 172–178.
- AZEVEDO, P.A., PODEMSKI, C.L., HESSLEIN, R.H., KASIAN, S.E.M., FINDLAY, D.L., BUREAU, D.P. (2011). Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality. *Aquaculture* 311, 175–186.

- BACKUS, R.H., BARNES, H. (1957). Television-echo sounder observations of midwater sound scatterers. *Deep-Sea Research* 4, 116–119.
- BALABAN, M.O., CHOMBEAU, M., CIRBAN, D., GÜMÜS, B. (2010a). Prediction of the weight of Alaskan pollock using image analysis. *Journal of Food Science* 75, E552–E556.
- BALABAN, M.O., SORIANO, M.G., RUIZ, E.G. (2010b). Using image analysis to predict the weight of Alaskan salmon of different species. *Journal of Food Science* 75, E157–E162.
- BALCHEN, J.G. (1991). Possible roles of remotely operated underwater vehicles (ROV) and robotics in mariculture of the future. *Modeling, Identification and Control* 12(4), 207–217.
- BALCHEN, J.G. (1996). Model based teleoperation of untethered underwater vehicles with manipulators, MOBATEL. *Modeling, Identification and Control* 17(1), 37–45.
- BARAK, Y., CYTRYN, E., GELFAND, I., KROM, M., VAN RIJN, J. (2003). Phosphate removal in a marine prototype recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 220, 313–326.
- BARAK, Y., VAN RIJN, J. (2000). Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system. *Aquacultural Engineering* 22, 121–136.
- BARNES, H. (1952). Under-water television and marine biology. *Nature* 169, 477–479.
- BARNES, H. (1953). Underwater television and research in marine biology, bottom topography and geology. I. A description of the equipment and its use on board ship. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 6, 123–133.
- BARNES, H. (1955). Underwater television and research in marine biology, bottom topography and geology. II. Experience with the equipment. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 8, 213–236.
- BATES, M.C., TIERSCH, T.R. (1997). Low cost computer assisted image analysis for fisheries research. *Progressive Fish-Culturist* 59(3), 235–240.
- BENZ, G.W., HOFFMAYER, E.R., DRIGGERS, W.B., ALLEN, D., BISHOP, L.E., BROWN, D.A. (2007). First record of a sleeper shark in the western Gulf of Mexico and comments on taxonomic uncertainty within *Somniosus* (*Somniosus*). *Bulletin of Marine Science* 80, 343–351.
- BOOPATHY, R., BONVILLAIN, C., FONTENOT, Q., KILGEN, M. (2007). Biological treatment of low-salinity shrimp aquaculture wastewater using sequencing batch reactor. *International Biodeterioration and Biodegradation* 59, 16–19.
- BOYD, C.E. 2003. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. *Aquaculture* 226, 101–112.



- BRAZIL, B.L., SUMMERFELT, S.T. (2006). Aerobic treatment of gravity thickening tank supernatant. *Aquacultural Engineering* 34, 92–102.
- BRIGHTON, H., MELLISH, C. (2002). Advances in instance selection for instance-based learning algorithms. *Data Mining and Knowledge Discovery* 6(2), 153–172.
- BRUGÈRE, C., RIDLER, N. (2004). Global aquaculture Outlook in the next decades: an analysis of national aquaculture production. Forecasts 2030. FAO Fisheries Circular 1001, 49 pp.
- BRUGÈRE, C., AGUILAR-MANJARREZ, J., BEVERIDGE, M.C.M., SOTO, D. (2018). The ecosystem approach to aquaculture 10 years on-a critical review and consideration of its future role in blue growth. *Reviews in Aquaculture* 0, 1–22.
- BRYAN, D.R., KILFOYLE, K., GILMORE, JR. R.G., SPIELER, R.E. (2013). Characterization of the mesophotic reef fish community in south Florida, USA. *Journal of Applied Ichthyology* 29, 108–117.
- BUI, E.N. (1991). Applications of image-analysis to soil micromorphology. *Agriculture Ecosystems and Environment* 34, 305–313.
- BULCOCK, P., BOSTOCK, J., JAUNCEY, K., BEVERIDGE, M.C.M., TELFER, T. (2001). The evolution of aquaculture feed supply systems. *Eurofish* 2, 74–76.
- BUREAU, D.P., GUNTHER, S.J., CHO, C.Y. (2003). Chemical composition and preliminary theoretical estimates of waste outputs of rainbow trout reared in commercial cage culture operations in Ontario. *North American Journal of Aquaculture* 65, 33–38.
- BURFORD, M.A., LORENZEN, K. (2004) Modeling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediment remineralization. *Aquaculture* 229, 129–145.
- CADIOU, J., COUDRAY, S., LEON, P., PERRIER, M. (1998). Control architecture of a new deep scientific ROV: Victor 6000. OCEAN 1998 MTS/IEEE Conference.
- CADRIN, S.X., FRIEDLAND, K.D. (1999). The utility of image processing techniques for morphometric analysis and stock identification. *Fisheries Research* 43(1-3), 129–139.
- CADY, F. (2017). The Data Science Handbook. John Wiley & Sons, Inc.
- CAHARIJA, W., PETTERSEN, K. Y., BIBULI, M., CALADO, P., ZEREIK, E., BRAGA, J. (2016). Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 24(5), 1623–1642.
- CAI, L., ZHU, Y. (2015). The challenges of data quality and data quality assessment in the Big Data Era. *Data Science Journal* 14(2), 1–10.



- CALTRAN, H., SILAN, P. (1996). Fill filaments of *Liza ramada*, a biotope for ectoparasites: surface area acquisition using image analysis and growth models. *Journal of Fish Biology* 49(6), 1267-1279.
- CAPPO, M., SPEARE, P., DE'ATH, G. (2004). Comparison of baited remote underwater video stations (BRUVS) and prawn (shrimp) trawls for assessments of fish bio-diversity in inter-reefal areas of the Great Barrier Reef Marine Park. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 302, 123-152.
- CARPENTER, B.M., SHULL, D.H. (2011). A comparison of two methods, paired diver surveys and remotely operated vehicle surveys, for determining rockfish abundance. En: Rockfish Technical Report, Task 5 (Whatcom County: NOAA).
- CHA, B.J., BAE, B.S., CHO, S.K., OH, J.K. (2012). A simple method to quantify fish behavior by forming time-lapse images. *Aquacultural Engineering* 51, 15-20.
- CHABANET, P., LOISEAU, N., JOIN, J.L., PONTON, D. (2012). VideoSolo, an autonomous video system for high-frequency monitoring of aquatic biota, applied to coral reef fishes in the Glorioso Islands (SWIO). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 430-431, 10-16.
- CHANG, C.M., FANG, W., JAO, R.C., SHYU, C.Z., LIAO, I.C. (2005). Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel. *Aquacultural Engineering* 32, 343-353.
- CHAWLA, N.V., JAPKOWICZ, N., KOTCZ, A. (2004). Editorial: special issue on learning from imbalanced data sets. *ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data Mining Explorations Newsletter* 6(1), 1-6.
- CHEN, S., COFFIN, D.E., MALONE, R.F. (1993). Production, characteristics, and modeling of aquacultural sludge from a recirculating aquacultural system using a granular media biofilter. En: Wang, J.-K. (Ed.), *Techniques for Modern Aquaculture*. ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 16-25.
- CHO, C.Y., BUREAU, D.P. (1998). Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources* 11, 199-210.
- CHRIS, R., MICHAEL, C., WHUNTTING, H., WINSORH, W. (2009). A self-contained system for observing and quantifying the behavior of Atlantic cod, *Gadus morhua*, in an offshore aquaculture cage. *Aquaculture* 293, 49-56.
- CHRIST, R.D., WERNLI, R.L. (2014). *The ROV manual. A user guide for remotely operated vehicles*, Oxford 679 pp.
- CHUI, C.K., CHEN, G. (2017). *Kalman filtering*. Springer International Publishing.

- CLARKE, T.M., WHITMARSH, S.K., FAIRWEATHER, P.G. HUveneERS, C. (2019). Overlap in fish assemblages observed using pelagic and benthic baited remote underwater video stations. *Marine and Freshwater Research* 70(6), 870-880.
- COIRAS, E., PETILLOT, Y., LANE, D.M. (2007). Multiresolution 3-D reconstruction from side-scan sonar images. *IEEE Transactions on Image Processing* 16(2), 382-390.
- CONSOLI, P., ESPOSITO, V., BATTAGLIA, P., ALTOBELLI, C., PERZIA, P., ROMEO, T., CANESE, S., ANDALORO, F. (2016). Fish distribution and habitat complexity on banks of the Strait of Sicily (central Mediterranean Sea) from remotely-operated vehicle (ROV) exploration. *PLoS ONE* 11, e0167809.
- CONTI, S.G., ROUX, P., FAUVEL, C., MAURER, B.D., DEMER, D.A. (2006). Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank. *Aquaculture* 251, 314-323.
- COSTA, C., LOY, A., CATAUDELLA, S., DAVIS, D., SCARDI, M. (2006). Extracting fish size using dual underwater cameras. *Aquacultural Engineering* 35, 218-227.
- COSTA, C., SCARDI, M., VITALINI, V., CATAUDELLA, S. (2009). A dual camera system for counting and sizing Northern Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*; Linnaeus, 1758) stock, during transfer to aquaculture cages, with a semi automatic Artificial Neural Network tool. *Aquaculture* 291, 161-167.
- COVÉS, D., BEAUCHAUD, M., ATTIA, J., DUTTO, G., BOUCHUT, C., BÉGOUT, M.L. (2006). Long-term monitoring of individual fish triggering activity on a self-feeding system: an example using European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture* 253, 385-392.
- CUNDY, M.E., SNATANA-FARCON, J., FERGUSON, A.M., FAIRCLOUGH, D.V., JENNINGS, P., HARVEY, E.S. (2017). Baited remote underwater stereo-video outperforms baited downward-facing single-video for assessment of fish diversity, abundance and size composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 497, 19-32.
- DANAHER, J.J., RAKOCY, J.E., SHULTZ, R.C., BAILEY, D.S., PANTANELLA, E. (2011). Dewatering and composting aquaculture waste as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Acta Horticulturae* 89: 223-230.
- DANCE, M.A., PATTERSON III, W.F., ADDIS, D.T. (2011). Fish community and trophic structure at artificial reef sites in the Northeastern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* 87, 301-324.

- DAND, I. (1986). An introduction to the hydrodynamic desing of ROV's. British Maritime Technology Report, October 1986.
- DEAN, J., GHEMAWAT, S. (2008). MapReduce: simplified data processing on large clusters. Communications of the ACM - 50th anniversary issue: 1958-2008 51(1), 107-113.
- DEL TORO PERAL, M., GÓMEZ-BRAVO, F., VALE, A. (2007). State Variables Estimation Using Particle Filter: Experimental Comparison with Kalman Filter. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing.
- DEVINE, B.M., WHEELAND, L.J., NEVES, B.M., FISHER, J.A.D. (2018). Baited remote underwater video estimates of benthic fish and invertebrate diversity within the easter Canadian. *Artic Polar Biology* 42, 1323-1341.
- DHAR, V. (2013). Data science and prediction. Communications of the ACM 56(12), 64-73.
- DREW, M. (1993). Commercial sector ROV system available for science. *Marine and Technology Society Journal* 26(4), 81.
- DUARTE, S., REIG, L., OCA, J. (2009). Measurement of sole activity by digital image analysis. *Aquacultural Engineering* 41, 22-27.
- DUFFY, G.A., LUNDSTEN, L., KUHNZ, L.A., PAULL, C.K. (2014). A comparison of megafaunal communities in five submarine canyons off Southern California, USA. *Deep Sea Research Part II* 104, 259-266.
- DUNBRACK, R.L., ZIELINSKI, R. (2003). Seasonal and diurnal activity of six gill sharks (*Hexanchus griseus*) on a shallow water reef in the Strait of Georgia British Columbia. *Canadian Journal of Zoology* 81, 1107-1111.
- DUNLOP, K.M., RUXTON, G.D., BAILEY, D.M. (2015). Absolute abundance estimates from shallow water baited underwater camera surveys; a stochastic modeling approach tested against field data. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 472, 126-134.
- EBELING, J.M., WELSH, C.F., RISHEL, K.L. (2006). Performance evaluation of the Hydrotech belt filter using coagulation/flocculation aids (alum/polymers) for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture microscreen backwash effluent. *Aquacultural Engineering* 35, 61-77.
- EIBEN, A.E., SMITH, J.E. (2003). Introduction to Evolutionary Computing. Springer.
- EUROPEAN COMMISSION (2011). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The Economic and Social Committee and the Committee of the Regions-Our Life Insurance, Our

Natural Capital: An EU Biodiversity Strategy to 2020; SEC(2011) 540 final; SEC: Brussels, Belgium.

- FANCY, S.G. 1997. A new approach for analyzing bird densities from variable circular-plot counts. *Pacific Science* 51(1), 107-114.
- FAO (1995). Código de conducta para la pesca responsable. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma 46 pp.
- FAO. 2010. Aquaculture Development. 4. Ecosystem Approach to Aquaculture. FAO: Rome, Italy Volume 5.
- FAO. 2017. Blue Growth Initiative-Partnering with Countries to Achieve the Sustainable Development Goals; FAO: Rome, Italy.
- FAO (2018). The state of world fisheries and aquaculture. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma 210 pp.
- FARRELL, J.A. (2008). Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. The McGraw-Hill Companies, USA.
- FEDRA, K., MACHAN, R. (1979). A self-contained underwater time-lapse camera for in situ long-term observations. *Marine Biology* 55, 239-246.
- FERNÁNDEZ, A., LÓPEZ, V., DEL JESÚS, M.J., HERRERA, F. (2015). Revisiting Evolutionary Fuzzy Systems: Taxonomy, Applications, New Trends and Challenges. *Knowledge Based Systems* 80, 109-121.
- FERNÁNDEZ, A., RÍO, S., LÓPEZ, V., BAWAKID, A., DEL JESÚS, M.J., BENÍTEZ, J.M., HERRERA, F. (2014). Big Data with Cloud Computing: An insight on the computing environment, MapReduce and programming frameworks. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 4(5), 380-409.
- FERREIRA, F., MACHADO, D., FERRI, G., DUGELAY, S., POTTER, J. (2016). Underwater optical and acoustic imaging: A time for fusion? a brief overview of the state-of-the-art. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, 1-6.
- FØRE, M., ALFREDSEN, J.A., GRONNINGSATER, A. (2011). Development of two telemetry-based systems for monitoring the feeding behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in aquaculture sea-cages. *Computers and Electronics in Agriculture* 76, 240-251.
- FØRE, M., FRANK, K., NORTON, T., SVENDSEN, E., ALFREDSEN, J.A., DEMPSTER, T., EGUIRAUN, H., WATSON, W., STAHL, A., SUNDE, L.M., SCHELLEWALD, C., SKØIEN, R., ALVER, M.O., BERCKMANS, D. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering* 173, 176-193.
- FØRE, M., ALVER, M., ALFREDSEN, J.A., MARAFIOTI, G., SENNESET, G., BIRKEVOLD, J., WILLUMSEN, F.V., LANGE, G., ESPMARK, A., TERJESEN, B.F. (2016) Modelling growth performance and feeding behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*

- L.) in commercial-size aquaculture net pens: model details and validation through full-scale experiments. *Aquaculture* 464, 268–278.
- FOSSSEN, T.I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley and Sons Ltd, 567 pp.
- FOSTER, M., PETRELL, R., ITO, M.R., WARD, R. (1995). Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis. *Aquacultural Engineering* 14, 251–269.
- FREITAS, A. (2002). Data Mining and Knowledge Discovery with Evolutionary Algorithms. Springer.
- FROST, A.R., MCMASTER, A.P., SAUNDERS, K.G., LEE, S.R. (1996). The development of a remotely operated vehicle (ROV) for aquaculture. *Aquacultural Engineering* 15(6), 461–483.
- GARCÍA, S., RAMÍREZ-GALLEGO, S., LUENGO, J., BENÍTEZ, J.M., HERRERA, F. (2016). Big Data preprocessing: methods and prospects. *Big Data Analytics* 1, 9.
- GARCÍA SÁNCHEZ, J.C. (2021). Towards a multimodal interface for the specification of intervention tasks in underwater robotics. Tesis Doctoral, Universidad Jaume I, 2021.
- GARROCHO-CRUZ, A., GÓMEZ-BRAVO, F., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I., CASTRO-GUTIÉRREZ, J., LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, S., PEREGRÍN-RUBIO, A. (2019). Informe sobre el desarrollo de sensores en sistemas fijos (boyas) y ROVs para su uso en estuarios y explotaciones piscícolas. Informe técnico de la Acción 2.3A1 del Proyecto KTTSeaDrones cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>).
- GARROCHO-CRUZ, A., GÓMEZ-BRAVO, F., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I., CASTRO-GUTIÉRREZ, J., LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, S., PEREGRÍN-RUBIO, A. (2022). Informe sobre el desarrollo de sensores en sistemas fijos (boyas) y ROVs para su uso en estuarios y explotaciones piscícolas. Informe técnico de la Acción 2.3A (Adenda) del Proyecto KTTSeaDrones cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>).
- GELFAND, I., BARAK, Y., EVEN-CHEN, Z., CYTRYN, E., KROM, M., NEORI, A., VAN RIJN, J. (2003). A novel zero-discharge intensive seawater recirculating system for culture of marine fish. *Journal of the World Aquaculture Society* 34, 344–358.

- GOHEEN, K.R., JEFFERYS, E.R. (1990). System identification of remotely operated vehicle dynamics. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 112, 230-236.
- GÓMEZ-BRAVO, F., GARROCHO-CRUZ, A., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J. C., PULIDO-CALVO, I., CASTRO-GUTIÉRREZ, J., PEREGRÍN-RUBIO, A., LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, S. (2021). Localizando elementos de interés mediante vehículos operados remotamente para la explotación sostenible de granjas acuícolas. En XLII Jornadas de Automática (pp. 617-624), Universidad de La Coruña.
- GONCALVES, A.A., GAGNON, G.A. (2011). Ozone application in recirculating aquaculture systems: an overview. *Ozone Science and Engineering* 33, 345-367.
- GOODFELLOW, I., BENGIO, Y., COURVILLE, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
- GROTHUES, T.M., NEWHALL, A.E., LYNCH, J.F., VOGEL, K.S., GAWARKIEWICZ, G.G. (2016). High-frequency side-scan sonar fish reconnaissance by autonomous underwater vehicles. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 74(2), 240-255.
- GÜMÜS, B., BALABAN, M.O. (2010). Prediction of the weight of aquacultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by image analysis. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 19, 227-237.
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., DE PEDRO-SANZ, E., LÓPEZ-LUQUE, R., PULIDO-CALVO, I. (2004). Comparison between traditional methods and artificial neural networks for ammonia concentration forecasting in an eel (*Anguilla anguilla* L.) intensive rearing system. *Aquacultural Engineering* 31, 183-203.
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I. (2007). Water temperature regimen analysis of intensive fishfarms associated with cooling effluents from power plants. *Biosystems Engineering* 96(4), 581-591.
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I., DE LA ROSA, I., MARCHINI, B. (2012). Modeling inflow rates for the water exchange management in semi-intensive aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering* 48, 19-30.
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PEREGRÍN-RUBIO, A., GÓMEZ-BRAVO, F., PULIDO-CALVO, I., GONZÁLEZ-CABRERA, M. (2019): Informe introductorio sobre desarrollo y evaluación de sistemas fijos (boyas), pequeños vehículos marinos (ROVs) y análisis de datos e imágenes en zonas estuáricas y explotaciones acuícolas. Informe técnico de la Acción 1.3 del Proyecto KTTSeaDrones cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional

- FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>).
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I., CASTRO-GUTIÉRREZ, J., PEREGRÍN-RUBIO, A., LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, S., GÓMEZ-BRAVO, F., GARROCHO-CRUZ, A. (2022). Fish abundance estimation with imaging sonar in semi-intensive aquaculture ponds. *Aquacultural Engineering* 97, 102235.
- HAGGARTY, D.R., SHURIN, J.B., YAMANAKA, K.L. (2016). Assessing population recovery inside british columbia's rockfish conservation areas with a remotely operated vehicle. *Fisheries Research* 183, 165–179.
- HAN, J., HONDA, N., ASADA, A., SHIBATA, K. (2009). Automated acoustic method for counting and sizing farmed fish during transfer using DIDSON. *Fisheries Science* 75, 1359-1367.
- HARTER, S.L., RIBERA, M.M., SHEPARD, A.N., REED, J.K. (2009). Assessment of fish populations and habitat on Oculina bank, a deep-sea coral marine protected area off eastern Florida. *Fishery Bulletin* 107, 195–206.
- HE, H., GARCÍA, E.A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 21(9), 1263-1284.
- HEMERY, L.G., HENKEL, S.K. (2016). Patterns of benthic mega-invertebrate habitat associations in the Pacific Northwest continental shelf waters. *Biodiversity Conservation* 25(9), 1761-1772.
- HENRY, L.A., STEHMANN, M.F., DE CLIPPELE, L., FINDLAY, H.S., GOLDING, N., ROBERTS, J.M. (2016). Seamount egg-laying grounds of the deep-water skate *Bathyraja richardsoni*. *Journal of Fish Biology* 89, 1473–1481.
- HERRERA, F. (2008). Genetic fuzzy systems: taxonomy, current research trends and prospects. *Evolutionary Intelligence* 1(1), 27–46.
- HERRERA, F. (2014). Big data: Procesando los datos en la sociedad digital. *Revista de Física* 14, 40-44.
- HOLT, D. (1967). Opportunities for research utilizing underwater TV and acoustic systems. *BioScience* 17, 635–636.
- HUESKE, F., KALAVRI, V. (2017). Stream Processing with Apache Flink. O'Reilly Media, Inc.
- HUFSCHMIED P, FANKHAUSER T, PUGOVKIN D. (2011). Automatic stress-free sorting of sturgeons inside culture tanks using image processing. *Journal of Applied Ichthyology* 27(2), 622– 626.

- HUVENNE, V.A.I., ROBERT, K., MARSH, L., IACONO, C.L., BAS, T.L., WYNN, R.B. (2018). ROVs and AUVs. En: Submarine geomorphology, Springer International Publishing, 93-108.
- ISAACS, J.D., SCHWARZLOSE, R.A. (1975). Active animals of the deep-sea floor. *Scientific American* 233(4), 84-91.
- JABADO, R.W., AL HAMELI, S.M., GRANDOURT, E.M., AL DHAHERI, S.S. (2018). Low abundance of sharks and rays in baited remote underwater video surveys in the Arabian Gulf. *Scientific Reports* 8, 15597.
- JAIN, A., ZONGKER, D. (1997). Feature selection: Evaluation, application, and small sample performance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19(2), 153-158.
- JAN, R.Q., SHAO, Y.T., LIN, F.P., FAN, T.Y., TU, Y.Y., TSAI, H.S., SHAO, K.T. (2007). An underwater camera system for real-time coral reef fish monitoring. *Raffles Bulletin of Zoology* 14, 273-279.
- JÄRVINEN, O. (1978). Estimating relative densities of land birds by point counts. *Annales Zoologici Fennici* 15(4), 290-293.
- JOHNSEN, G., LUDVIGSEN, M., SØRENSEN, A., AAS, L. (2016). The use of underwater hyperspectral imaging deployed on remotely operated vehicles: Methods and applications. *IFAC-PapersOnLine* 49(23), 476-481.
- JOHNSON, S.W., MURPHY, M.L., CSEPP, D.J. (2003). Distribution, habitat, and behavior of rockfishes, *Sebastes* spp., in nearshore waters of southeastern Alaska: observations from a remotely operated vehicle. *Environmental Biology of Fishes* 66, 259-270.
- KAMSTRA, A., JWVANDER, H., NIJHOF, M. (1998). Performance and optimization of trickling filters on eel farms. *Aquacultural Engineering* 17, 175-192.
- KARABCHEVSKY, S., KAHANA, D., BEN-HARUSH, O., GUTERMAN, H. (2011). FPGA-based adaptive speckle suppression filter for underwater imaging sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 36(4), 646-657.
- KARAU, H., KONWINSKI, A., WENDELL, P., ZAHARIA, M. (2015). Learning Spark: Lightning-Fast Big Data Analytics. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472 (USA).
- KARPOV, K., LAUERMANN, A., CAILLIET, G., PRALL, M. (2004). Comparing Fisherman-Directed Hook and Trap Sampling of Groundfish to ROV-Based Assessment: Phase I – Methods Development in Collaboration Between Fisherman, FDFG, and University Scientists. San Jose, CA: California Department of Fish and Game and Moss Landing Marine Laboratories.



- KARPOV, K.A., BERGEN, M., GEIBEL, J.J. (2012). Monitoring fish in California Channel Islands marine protected areas with a remotely operated vehicle: the first five years. *Marine Ecology Progress Series* 453, 159-172.
- KING, A.J., GEROGÉ, A., BUCKLE, D.J., NOVAK, P.A., FULTON, C.J. (2017). Efficacy of remote underwater video cameras for monitoring tropical wetland fishes. *Hydrobiologia* 807(1), 145-164.
- KIRA, K., RENDELL, L.A. (1992). A practical approach to feature selection. *Machine Learning Proceedings*, 249-256.
- KLAS, S., MOZES, N., LAHAV, O. (2006). Development of a single-sludge denitrification method for nitrate removal from RAS effluents: lab-scale results vs model prediction. *Aquaculture* 259, 342–353.
- KLEPAKER, R.A., VESTGARD, K., HALLSET, J.O., BALCHEN, J.G. (1987). The application of a free-swimming ROV in aquaculture. *Modeling, Identification and Control* 8(1), 19-26.
- KOLAREVIC, J., AAS-HANSEN, Ø., ESPMARK, A., BAEVERFJORD, G., TERJESEN, B.F., DAMSGARD, B. (2016). The use of acoustic acceleration transmitter tags for monitoring of Atlantic salmon swimming activity in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquacultural Engineering* 72–73, 30–39.
- KYO, M., HIYAZAKI, E., TSUKIOKA, S., OCHI, H., AMITANI, Y., TSUCHIYA, T., AOKI, T., TAKAGAWA, S. (1995). The sea trial of 'kaiko', the full ocean depth research ROV. OCEAN 1995 MTS/IEEE Conference.
- LAGARDÈRE, J.P., MALLEKH, R., MARIANI, A. (2004). Acoustic characteristics of two feeding modes used by brown trout (*Salmo trutta*), rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Scophthalmus maximus*). *Aquaculture* 240, 607–616.
- LAUERMANN, A. (2014). South coast MPA study region ROV deployment 1. January 2014 Interim Report, 31 pp.
- LEDLEY, R.S. (1965). Use of computers in biology and medicine. McGraw-Hill, New York.
- LEFEUVRE, P., ROSE, G.A., GOSINE, R., HALE, R., PEARSON, W., KHAN, R. (2000). Acoustic species identification in the Northwest Atlantic using digital image processing. *Fisheries Research* 47 (2-3), 137-147.
- LEWIS, D.J., LIPSCOMBE, J.M., TOMASSON, P.G. (1984). The simulation of remotely operated underwater vehicles. En: Proceedings, ROV'84, The Marine Technology Society, San Diego, California, 245-252.
- LI, K.C., JIANG, H., YANG, L.T., CUZZOCREA, A. (2015). Big Data: Algorithms, Analytics, and Applications, Chapman & Hall/CRC.

- LI, D., MIAO, Z., PENG, F., WANG, L., HAO, Y., WANG, Z., CHEN, T., LI, H., ZHENG, Y. (2020). Automatic counting methods in aquaculture: A review. *Journal of World Aquaculture Society*, 1-15.
- LI, D., HAO, Y., DUAN, Y. (2020). Nonintrusive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review. *Reviews in Aquaculture* 12, 1390-1411.
- LIU, H., HUSSAIN, F., TAN, C.L., DASH, M. (2002). Discretization: an enabling technique. *Data Mining and Knowledge Discovery* 6(4), 393-423.
- LIU, S., XU, L., LI, D., LI, Q., JIANG, Y., TAI, H., ZENG, L. (2013). Prediction of dissolved oxygen content in river crab culture based on least squares support vector regression optimized by improved particle swarm optimization. *Computers and Electronics in Agriculture* 95, 82-91.
- LIU, Z., LI, X., FAN, L., LU, H., LIU, L., LIU, Y. (2014). Measuring feeding activity of fish in RAS using computer vision. *Aquacultural Engineering* 60, 20-27.
- LOO, J.L. (2013). The use of vision in a sustainable aquaculture feeding system. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology* 6, 3658-3669.
- LÓPEZ, S., MÁRQUEZ, A.A., MÁRQUEZ, F.A., PEREGRÍN, A. (2019). Evolutionary design of linguistic fuzzy regression systems with adaptive defuzzification in Big Data environments. *Cognitive Computation* 11(3), 388-399.
- LÓPEZ-DOMÍNGUEZ, S., PEREGRÍN-RUBIO, A., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PULIDO-CALVO, I., GARROCHO-CRUZ, A., GÓMEZ-BRAVO, F. (2021). Informe sobre el desarrollo de sensores en sistemas fijos (boyas) y ROVs para su uso en estuarios y explotaciones piscícolas. Informe técnico de la Acción 2.3A2 del Proyecto KTTSeaDrones cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>).
- MACARTHUR, G. (1988). Evaluation and development of a dynamic robot tracking device. M.Sc. Thesis, Granfield University.
- MAILAVARAM, A., RANI, B.P. (2019). Big Data: Scalability Storage. *Innovations in Computer Science and Engineering*: 473-481.
- MALLET, D., PELLETIER, D. (2014). Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: a review of sixty years of publication (1952-2012). *Fisheries Research* 154, 44-62.
- MAMDANI, E.H. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. *IEEE Transactions on Computers* 26(12), 1182-1191.

- MÁRQUEZ, A.A., MÁRQUEZ, F.A., PEREGRÍN, A. (2012). An efficient multi-objective evolutionary adaptive conjunction for high dimensional problems in linguistic fuzzy modelling. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Brisbane, QLD*, 1-8.
- MÁRQUEZ, A.A., MÁRQUEZ, F.A., PEREGRÍN, A. (2017). A scalable evolutionary linguistic fuzzy system with adaptive defuzzification in big data. *Proceeding of FUZZ-IEEE'17 IEEE International Conference on Fuzzy System, Naples (Italia)*, 1-6.
- MÁRQUEZ, A.A., MÁRQUEZ, F.A., ROLDÁN, A., PEREGRÍN, A. (2013). An efficient adaptive fuzzy inference system for complex and high dimensional regression problems in linguistic fuzzy modelling. *Knowledge-Based Systems* 54, 42–52.
- MÁRQUEZ, F.A., PEREGRÍN, A., HERRERA, F. (2007). Cooperative evolutionary learning of linguistic fuzzy rules and parametric aggregation connectors for Mamdani fuzzy system. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 15(6), 1168–1178.
- MARTINS, C.I.M., EDING, E.H., VERDEGEM, M.C.J., HEINSBROEK, L.T.N., SCHNEIDER, O., BLANCHETON, J., ROQUE D'ORBCASTELD, E., VERRETH, J.A.J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 43, 83–93.
- MCLEAN, D.L., PARTRIDGE, J.C., BOND, T., BIRT, M.J., BORNT, K.R., LANGLOIS, T.J. (2017). Using industry ROV videos to assess fish associations with subsea pipelines. *Continental Shelf Research* 141, 76–97.
- MCLEOD, D., JACOBSON, J., HARDY, M., EMBRY, C. (2013). Autonomous inspection using an underwater 3D LiDAR. *OCEANS-San Diego IEEE*: 1-8.
- MIRIZZI, N., NEGAHDARIPOUR, S., GUARAGNELLA, C. (2018). Underwater forward-scan sonar video coding by background modeling and synthesis for real-time transmission. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*.
- MORENO, C.A., MOLINET, C., DÍAZ, M., DÍAZ, P.A., CÁCERES, M.A., AÑAZCO, B., GUZMÁN, M., NIKLITSCHKE, E.J. (2018). Coupling biophysical processes that sustain a deep subpopulation of *Loxechinus albus* and its associated epibenthic community over a bathymetric feature. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 212, 23-33.
- MOSER, M.L., AUSTER, P.J., BICHY, J.B. (1998). Effects of mat morphology on large Sargassum-associated fishes: observations from a remotely operated vehicle (ROV) and free-floating videocamcorders. *Environmental Biology of Fishes* 51, 391–398.

- MOULICK, S., PETER, N., MAL, B.C. (2011). Development of a spreadsheet model for evaluation of nitrogen dynamics in intensive shrimp culture pond. *CSVТУ Research Journal* 04 (01), 1–5.
- MOURSUND, R.A., CARLSON, T.J., PETERS, R.D. (2003). A fisheries application of a dual-frequency identification sonar acoustic camera. *ICES Journal of Marine Science* 60, 678–683.
- MYERS, E.M.V., HARVEY, E.S., SAUNDERS, B.J., TRAVERS, M.J. (2015). Fine-scale patterns in the day, night and crepuscular composition of a temperate reef fish assemblage. *Marine Ecology* 37, 688–678.
- NAIBERG A, PETRELL R, SAVAGE C, NEUFELD T. (1993). Non-invasive fish size assessment method for tanks and sea cages using stereo-video. *Techniques for modern aquaculture*, 372– 381.
- NOMOTO, M., HATTORI, M. (1986). A deep row dolphin 3k: desing and performance analisys. *Oceanic Engineering*, IEEE Journal 11(3), 373–391.
- OBORNE, H.D., EADIE, H.S., FUNNEL, C., KUO, C., LINFOOT, B.T. (1990). Engineering for offshore fishfarming. Procceding of the Conference organized by the Institute of Civil Engineering, Glasgow (Thomas Telford, London).
- OSEN, O.L., LEINAN, P.M., BLOM, M., BAKKEN, C., HEGGEN, M., ZHANG, H. (2018). A novel sea fram inspection platform for Norwegian aquaculture application. OCEAN 2018 MTS/IEEE Conference, Charleston.
- OSEN, O.L., SANDVIK, R.I., TRYGSTAD, J.B., ROGNE, V., ZHANG, H. (2017). A novel low cost ROV for aquaculture application. OCEANS 2017 Conference, Anchorage, 18–21.
- OUYANG, B., DALGLEISH, F., NEGAHDARIPOUR, S., VUORENKOSKI, A. (2012). Experimental study of underwater stereo via pattern projection. OCEANS 2012 MTS/IEEE, 1–7.
- OYA, Y., KAWASUE, K. (2008). Three dimenstional measurement of fish movement using stereo vision. *Artificial Life and Robotics* 13(1), 69–72.
- PACUNSKI, R.E., PAULSSON, W.A., GREENE, H.G., GUNDERSON, D. (2008). Conducting visual surveys with a small ROV in shallow water. En: *Marine Habitat Mapping Technology for Alaska*, eds J.R. Reynolds and H. G. Greene (Fairbanks, AK), 109–128.
- PAPADAKIS, V.M., PAPADAKIS, I.E., LAMPRIANIDOU, F., GLAROPOULOS, A., KENTOURI, M. (2012). A computer-vision system and methodology for the analysis of fish behavior. *Aquacultural Engineering* 46, 53–59.
- PAPANDROULAKIS, N., DIMITRIS, P., PASCAL, D. (2002). An automated feeding system for intensive hatcheries. *Aquacultural Engineering* 26, 13–26.

- PARSONAGE, K.D., PETRELL, R.J. (2003). Accuracy of a machine-vision pellet detection system. *Aquacultural Engineering* 29, 109–123.
- PAULL, L., SAEEDI, S., SETO, M., LI, H. (2014). AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 39(1), 131–149.
- PELLETIER, D., LELEU, K., MALLET, D., MOU-THAM, G., HERVÉ, G., BOUREAU, M., GUILPART, N. (2012). Remote high-definition rotating video enables fast spatial survey of marine underwater macrofauna and habitats. *PLoS ONE* 7, e30536.
- PERALTA, D., RÍO, S., RAMÍREZ-GALLEGO, S., TRIGUERO, I., BENITEZ, J.M., HERRERA, F. (2015). Evolutionary feature selection for Big Data classification: A MapReduce approach. *Mathematical Problems in Engineering*, ID 246139.
- PETILLOT, Y., ANTONELLI, G., CASALINO, G., FERREIRA, F. (2019). Underwater robots: from remotely operated vehicles to intervention autonomous underwater vehicles. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 26(2), 94–101.
- PETRELL, R.J., ANG, K.P. (2001). Effects of pellet contrast and light intensity on salmonid feeding behaviours. *Aquacultural Engineering* 25, 175–186.
- PETRES, C., PAILHAS, Y., EVANS, J., PETILLOT, Y., LANE, D. (2005). Underwater path planning using fast marching algorithms. *Oceans European Conference* 2, 814–819.
- PINKIEWICZ, T.H., PURSER, G.J., WILLIAMS, R.N. (2011). A computer vision system to analyse the swimming behaviour of farmed fish in commercial aquaculture facilities: a case study using cage-held Atlantic salmon. *Aquacultural Engineering* 45, 20–27.
- PITA, P., FERNÁNDEZ-MÁRQUEZ, D., FREIRE, J. (2014). Short-term performance of three underwater sampling techniques for assessing differences in the absolute abundances and in the inventories of the coastal fish communities of the Northeast Atlantic Ocean. *Marine and Freshwater Research* 65, 105–113.
- POLONSCHII, C., BRATU, D., GHEORGHIU, E. (2013). Appraisal of fish behaviour based on time series of fish positions issued by a 3D array of ultrasound transducers. *Aquacultural Engineering* 55, 37–45.
- PRADELLA, N., FOWLER, A.M., BOOTH, D.J., MACREADIE, P.I. (2014). Fish assemblages associated with oil industry structures on the continental shelf of north-western Australia. *Journal of Fish Biology* 84, 247–255.
- PULIDO-CALVO, I., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., CORBACHO, J.M. (2008). Pipes size selection of water distribution systems of fishfarms. *Aquacultural Engineering* 39, 43–52.

- PULIDO-CALVO, I., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C. (2011). Seleccction and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environmental Research Journal* 5(1), 49-72.
- PULIDO-CALVO, I., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., ASENSIO-FERNÁNDEZ, R. (2006). Optimal desing of pumping stations of inland intensive fishfarms. *Aquacultural Engineering* 35, 283-291.
- PULIDO-CALVO, I., GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., DÍAZ-RUBIO, E., DE LA ROSA, I. (2014). Assisted management of water exchange in traditional semi-intensive aquaculture ponds. *Computers and Electronics in Agriculture* 101, 128-134.
- QUATTRINI, A.M., DEMOPOULOS, A.W.J., SINGER, R., ROA-VARON, A., CHAYTOR, J.D. (2017). Demersal fish assemblages on seamounts and other rugged features in the northeastern Caribbean. *Deep Sea Research Part I* 123, 90-104.
- RAMÍREZ-GALLEGO, S., GARCÍA, S., MOURIÑO-TALÍN, H., MARTÍNEZ-REGO, D., BOLÓN-CANEDO, V., ALONSO-BETANZOS, A., BENÍTEZ, J.M., HERRERA, F. (2016). Data discretization: taxonomy and Big Data challenge. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 6(1), 5-21.
- RAO, T.R., MITRA, P., BHATT, R., GOSWAMI, A. (2019). The big data systems, components, tools, and technologies: a survey. *Knowledge and Information Systems* 60(3), 1165-1245.
- RAMSEY, F.L., SCOTT, J.M. (1979). Estimating population densities from variable circular plot surveys. En: Sampling biological populations, Eds. Cormack, R.M., Patil, G.P., Rodson, D.S., International Cooperative Publising House, Fairland, Maryland.
- REID, D.G., SIMMONDS, E.J. (1993). Image analysis techinques for the study of fish school structure form acoustic survey data. *Canadian Journal of fisheries and Aquatic Sciences* 50(5), 886-893.
- REYNOLDS, R.T., SCOTT, J.M., NUSSBAUM, R.A. (1980). A variable circular-plot method for estimating bird numbers. *Condor* 82, 309-313.
- RIDAO, P., CARRERAS, M., HERNANDEZ, E., PALOMERAS, N. (2007). Underwater telerobotics for collaborative research. En: Advances in telerobotics, Springer 501 pp.
- ROBBINS, C.L. 1981. Effect of time of day on bird activity. *Studies in Avian Biology* 6, 275-286.
- ROSE, C.S., STONER, A.W., MATTESON, K. (2005). Use of high-frequency imaging sonar to observe fish behaviour near baited fishing gears. *Fisheries Research* 76, 291-304.

- ROSE, G.A. (1992). A review of problems and new directions in the application of fisheries acoustic on the Canadian East-coast. *Fisheries Research* 14 (2-3), 105-128.
- RUBIO, V.C., VIVAS, M., SÁNCHEZ-MUT, A., SÁNCHEZ-VÁZQUEZ, F.J., COVÉS, D., DUTTO, G., MADRID, J.A. (2004). Self-feeding of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.) under laboratory and farming conditions using a string sensor. *Aquaculture* 233, 393–403.
- RUFF, B.P., FROST, A.R., MARCHANT, J.A. (1995). Fish sizing and monitoring using a stereo image analysis system applied to fish farming. *Aquacultural Engineering* 14, 155-173.
- RUSSELL, B., TORRALBA, A., FREEMAN, W.T. (2013). MIT, Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory.
- SADOUL, B., EVOUNA-MENGUES, P., FRIGGENS, N.C., PRUNET, P., COLSON, V. (2014). A new method for measuring group behaviours of fish shoals from recorded videos taken in near aquaculture conditions. *Aquaculture* 430, 179–187.
- SCHNEIDER, S., TAYLOR, G.W., LINQUIST, S., KREMER, S.C. (2019). Past, present and future approaches using computer vision for animal re-identification from camera trap data. *Methods in Ecology and Evolution* 10(4), 461-470.
- SERPA, D., FERREIRA, P.P., FERREIRA, H., DA FONSECA, L.C., DINIS, M.T., DUARTE, P. (2013). Modelling the growth of white seabream (*Diplodus sargus*) and gilthead seabream (*Sparus aurata*) in semi-intensive earth production ponds using the Dynamic Energy Budget approach. *Journal of Sea Research* 76, 135–145.
- SHERMAN, C.S., CHIN, A., HEUPEL, M.R., SIMPFENDORFER, C.A. (2018). Are we underestimating elasmobranch abundances on baited remote underwater video systems (BRUVS) using traditional metrics? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 503, 80-85.
- SKALKI, J.R., ROBSON, D.S. (1992). Techniques for wildlife investigations. Design and analysis of capture data. Academic Press, INC., San Diego, California.
- SMITH, D.V., TABRETT, S. (2013). The use of passive acoustics to measure feed consumption by *Penaeus monodon* (giant tiger prawn) in cultured systems. *Aquacultural Engineering* 57, 38–47.
- SÖFFKER, M., SLOMAN, K.A., HALL-SPENCER, J.M. (2011). In situ observations of fish associated with coral reefs off Ireland. *Deep Sea Research Part I* 58, 818–825.

- SOTO, D., AGUILAR-MANJARREZ, J., BRUGÈRE, C., ANGEL, D., BAILEY, C., BLACK, K., EDWARDS, P., COSTA-PIERCE, B., CHOPIN, T., DEUDERO, S., FREEMAN, S., HAMBREY, J., HISHAMUNDA, N., KNOWLER, D., SILVERT, W., MARBA, N., MATHE, S., NORAMBUENA, R., SIMARD, F., TETT, P., TROELL, M., WAINBERG, A. (2008). Applying an ecosystem-based approach to aquaculture: Principles, scales and some management measures. En: Building an ecosystem approach to aquaculture, Ed: Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., Hishamunda, N., FAO Fisheries and Aquaculture Proceeding 14, 15–35.
- SOTO-ZARAZÚA, G.M., RICO-GARCÍA, E., OCAMPO, R., GUEVARA-GONZÁLEZ, R.G., HERRERA-RUIZ, G. (2010). Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture International* 18, 379–391.
- STOKESBURY, K.D.E., HARRIS, B., MARINO, P., NOGUEIRA, M.C.J.I. (2004). Estimation of sea scallop abundance using a video survey in off-shore US waters. *Journal of Shellfish Research* 23, 33–40.
- SURYANARAYA, I., BRAIBANTI, A., RAO, R.S., RAMAM, V.A., SUDARSAN, D., RAO, G.N. (2008). Neural networks in fisheries research. *Fisheries Research* 92(2-3), 115-139.
- SUTHERLAND, W.J. (2006). Ecological census techniques. A Handbook (second edition). Cambridge University Press, Cambridge.
- SUZUKI, Y., MARUYAMA, T., NUMATA, H., SATO, H., ASAKAWA, M. (2003). Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: towards zero emission. *Aquacultural Engineering* 29, 165–182.
- TANG, S., THORARENSEM, H., BRAUNER, C.J., WOOD, C.M., FARRELL, A.P. (2009a). Modelling the accumulation of CO<sub>2</sub> during high density, recirculating transport of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, from observations aboard a sea-going commercial live-haul vessel. *Aquaculture* 296, 102–109.
- TANG, S., BRAUNER, C.J., FARRELL, A.P. (2009b). Using bulk oxygen uptake to assess the welfare of adult Atlantic Salmon, *Salmo salar* during commercial live-haul transport. *Aquaculture* 29, 318–323.
- TANNER, J.E., WILLIAMS, K. (2015). The influence of finfish aquaculture on benthic fish and crustacean assemblages in Fitzgerald Bay, South Australia. *PeerJ* 3(1), e1238.
- THRUN, S., BURGARD, W., FOX, D. (2005). Probabilistic robotics. MIT press.



- TIFFAN, K.F., RONDORF, D.W., SKALICKY, J.J. (2004). Imaging fall Chinook Salmon Redds in the Columbia river with a dual-frequency identification sonar. *North American Journal of Fisheries Management* 24, 1421-1426.
- TING-WAN, W., JIAN-HUA, H. (2008). Application of digital image processing methods for fish age estimation. *Applications of Digital Image Processing* XXXI 7073, 70732F.
- TORISAWA, S., KADOTA, M. (2011). A digital stereo-video camera system for three-dimensional monitoring of free-swimming Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, cultured in a net cage. *Aquatic Living Resources* 24, 107-112.
- TRIGUERO, I., RÍO, S., LÓPEZ, V., BACARDIT, J., BENÍTEZ, J.M., HERRERA, F. (2015). ROSEFW-RF: The winner algorithm for the ECBDL'14 Big Data competition: An extremely imbalanced Big Data bioinformatics problem. *Knowledge-Based Systems* 87, 69-79.
- TYNE, J.A., LONERAGAN, N.R., KRÜTZEN, M., ALLEN, S.J., BEJDER, L. (2010). An integrated data management and video system for sampling aquatic benthos. *Marine and Freshwater Research* 61, 1023-1028.
- UNSWORTH, R.K.F., PETERS, J.R., MCCLOSKEY, R.M., HINDER, S.L. (2014). Optimising stereo baited underwater video for sampling fish and invertebrate in temperate coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 150 (B), 281-287.
- VAN DAM, A.A., PAULY, D. (1995). Simulation of the effects of oxygen on fish feeding and growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Research* 26, 427-440.
- VAN RIJN, J. (2013). Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 53, 49-56.
- VAN RIJN, J., FONAREV, N., BERKOWITZ, B. (1995). Anaerobic treatment of fish culture effluents: digestion of fish feed and release of volatile fatty acids. *Aquaculture* 133, 9-20.
- VELÁZQUEZ, M., MARTÍNEZ, F.J. (2005). Design and testing of a faeces collecting device for fish digestibility studies using demand or automatic feeding. *Aquacultural Engineering* 33, 126-134.
- WATSON, D.L., HARVEY, E.S., ANDERSON, M.J., KENDRICK, G.A. (2005). A comparison of temperate reef fish assemblages recorded by three underwater stereo video techniques. *Marine Biology* 148, 415-425.
- WATT, K.E.F. (1966). Ecology in the future. En: *Systems analysis in ecology*, Academic Press INC., 274 pp.

- WHITE, J., SIMPFENDORFER, C.A., TOBIN, A.J., HEUPEL, M.R. (2013). Application of baited remote underwater video surveys to quantify al distribution of elasmobranchs at an ecosystems scale. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 448, 281-288.
- WHITMARSH, S.K., FAIRWEATHER, P.G., HUVENEERS, C. (2016). What is big BRUVver up to? Methods and uses of baited underwater video. *Review in Fish Biology and Fisheries* 27(1), 53-73.
- WHORFF, J.S., GRIFFING, L. (1992). A video recording and analysis system used to sample intertidal communities. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 160 (1), 1-12.
- WILLIAMS, D.P., DUGELAY, S. (2016). Multi-view SAS image classification using deep learning. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, 1-9.
- WILLIAMS, S.B., DISSANAYAKE, G., DURRANT-WHYTE, H.F. (2001). Towards terrain-aided navigation for underwater robotics. *Advanced Robot* 15, 533-549
- WILLIS, T.J., BABCOCK, R.C. (2000). A baited underwater video system for the determination of relative density of carnivorous reef fish. *Marine Freshwater Research* 51, 755-763.
- WU, T.H., HUANG, Y.I., CHEN, J.M. (2015). Development of an adaptive neural-based fuzzy inference system for feeding decision-making assessment in silver perch (*Bidyanus bidyanus*) culture. *Aquacultural Engineering* 66, 41-51.
- XU, J., LIU, Y., CUI, S., MIAO, X. (2006). Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquacultural Engineering* 35, 207-217.
- YOERGER, D., NEWMAN, J., SLOTINE, J. (1986). Supervisory control system for the Jason ROV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 11(3), 393-400.
- ZARCO-PERELLO, S., ENRÍQUEZ, S. (2019). Remote underwater video reveals higher fish diversity and abundance in seagrass meadows, and habitat differences in trophic interactions. *Scientific Reports* 9, 6596.

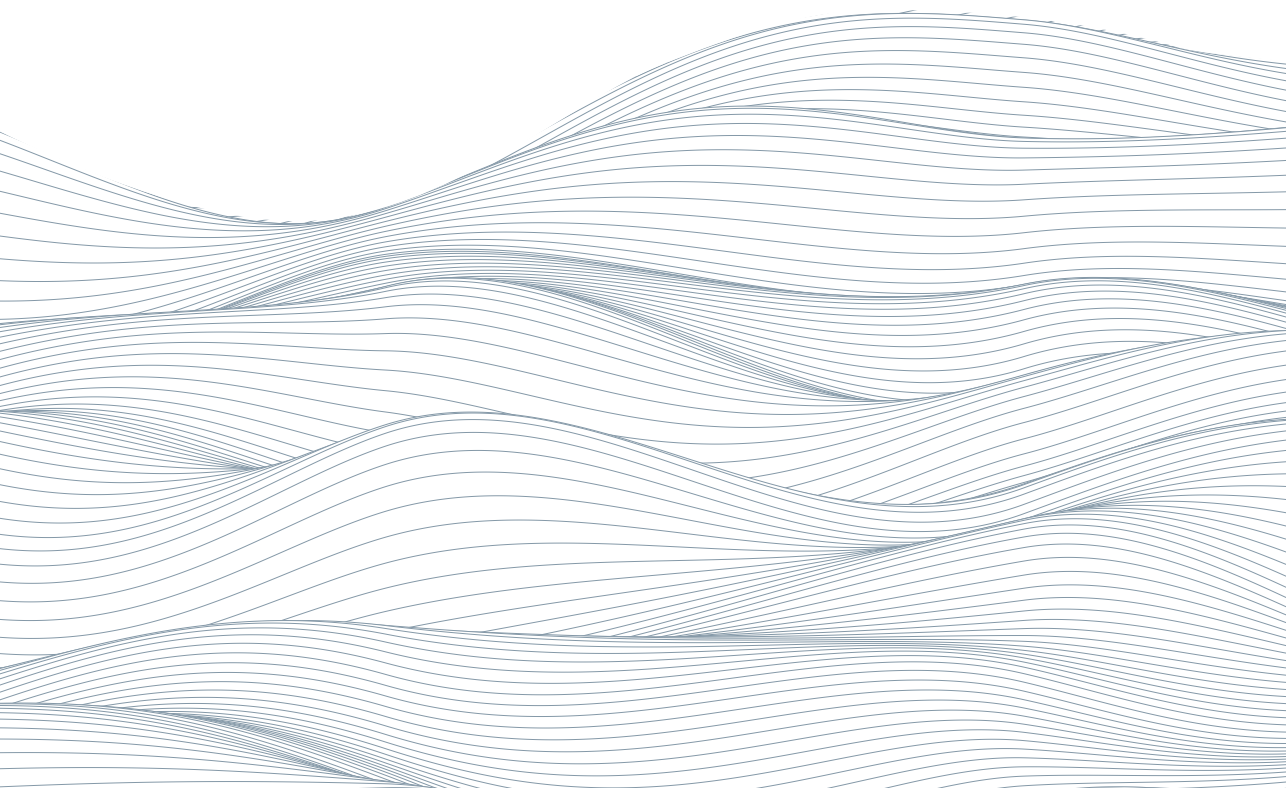
# 04.

## Análisis hidrodinámico de vehículos submarinos operados remotamente (ROVs)

J.J. Toscano Angulo<sup>1</sup> | I. Pulido Calvo<sup>2</sup> | J.C. Gutiérrez Estrada<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, e-mail: [jtosciano2@us.es](mailto:jtosciano2@us.es)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva, e-mail: [ipulido@uhu.es](mailto:ipulido@uhu.es); [juanc@uhu.es](mailto:juanc@uhu.es)



## Sumario:

1. Introducción
2. Modelación hidrodinámica
  - 2.1. Fuerzas y coeficientes hidrodinámicos
  - 2.2. Dinámica de Fluidos Computacional CFD
  - 2.3. Etapas de funcionamiento de software CFD
3. Aplicación de la modelación hidrodinámica CFD a un ROV de pequeña escala
  - 3.1. Pre-procesado
  - 3.2. Simulación
  - 3.3 . Post-procesado
4. Validación experimental con un modelo físico a escala
5. Resultados y discusión
  - 5.1. Fuerzas y coeficientes hidrodinámicos
  - 5.2. Análisis cualitativos y cuantitativos de las simulaciones hidrodinámicas
  - 5.3. Líneas de corriente del flujo
  - 5.4. Comparación cualitativa de las simulaciones CFD con pruebas experimentales
6. Conclusiones
7. Bibliografía

## Resumen

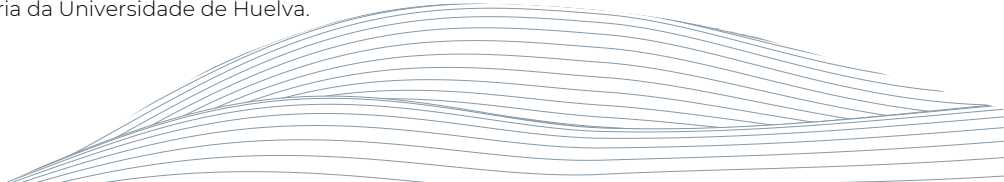
En este capítulo se describe una metodología para la caracterización dinámica del fluido agua alrededor de un vehículo submarino controlado de forma remota (ROV). El análisis de las propiedades hidrodinámicas debido a las interacciones de estos vehículos con el medio acuático es fundamental para el control y regulación de las maniobras de orientación y guiado así como para la determinación de los requerimientos de potencia y para la evaluación del consumo de batería/combustible. La metodología propuesta en este trabajo cuenta con una primera etapa que implica modelación CFD (Computational Fluid Dynamics) para la simulación de las interacciones del agua alrededor del ROV, según su forma y su velocidad, utilizando las aplicaciones de ordenador de código abierto OpenFOAM y ParaView. En una segunda etapa se diseña y construye un prototipo a escala del ROV que permita la validación experimental en el laboratorio de los resultados obtenidos en las simulaciones por ordenador y, consecuentemente, determine el grado de fiabilidad de estas estimaciones.

Este capítulo se constituye en un compendio de la memoria del Trabajo Fin de Máster titulado '*Simulación hidrodinámica y validación experimental de un vehículo submarino operado remotamente*', del Máster Oficial en Ingeniería Industrial, realizado por Juan José Toscano Angulo bajo la dirección de Inmaculada Pulido Calvo y Juan Carlos Gutiérrez Estrada, profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva.

## Resumo

Este capítulo descreve uma metodologia para a caracterização dinâmica do fluido água em torno de um veículo subaquático operado à distância (ROV). A análise das propriedades hidrodinâmicas devido às interações destes veículos com o ambiente aquático é fundamental para o controlo e regulação das manobras de orientação e orientação, bem como para a determinação dos requisitos de potência e para a avaliação do consumo da bateria/combustível. A metodologia proposta neste trabalho tem uma primeira etapa que envolve a modelação de CFD (Computational Fluid Dynamics) para a simulação das interações da água em torno do ROV, de acordo com a sua forma e velocidade, utilizando as aplicações informáticas de fonte aberta OpenFOAM e ParaView. Numa segunda fase, um protótipo à escala do ROV é concebido e construído para permitir a validação experimental no laboratório dos resultados obtidos nas simulações em computador e, consequentemente, para determinar o grau de fiabilidade destas estimativas.

Este capítulo é um resumo do relatório da Tese de Mestrado intitulado '*Simulación hidrodinámica y validación experimental de un vehículo submarino operado remotamente*', do Mestrado Oficial em Engenharia Industrial, realizado por Juan José Toscano Angulo com a supervisão da Inmaculada Pulido Calvo e Juan Carlos Gutiérrez Estrada, docentes da Escola Técnica Superior de Engenharia da Universidade de Huelva.



## 1. Introducción:

### Análisis hidrodinámico de vehículos submarinos operados remotamente (ROVs)

El presente capítulo es una exposición resumida de la metodología y resultados obtenidos en el Trabajo Fin de Máster titulado '*Simulación hidrodinámica y validación experimental de un vehículo submarino operado remotamente*', del Máster Oficial en Ingeniería Industrial, realizado por Juan José Toscano Angulo bajo la dirección de Inmaculada Pulido Calvo y Juan Carlos Gutiérrez Estrada, profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva. El desarrollo de este trabajo se incluye como tarea de una de las acciones programadas y ejecutadas en la actividad A2.3 del Proyecto KTTSeaDrones '*Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras*' (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. La memoria completa de este Trabajo Fin de Máster se puede consultar en la dirección web: <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/documentos>.

El diseño y desarrollo de vehículos submarinos no tripulados así como el control y la regulación de su orientación y profundidad se deben basar, entre otros aspectos, en principios fundamentales de la Dinámica de Fluidos para así poder analizar y evaluar su funcionamiento, maniobrabilidad y guiado frente a las interacciones con el medio subacuático en el que se encuentran (Fossen, 2011; Moreno et al., 2014; Gutiérrez-Estrada et al., 2019; Gabl et al., 2020). Actualmente estos estudios se suelen realizar mediante el planteamiento de modelos numéricos que estiman de forma aproximada el comportamiento hidrodinámico de estos vehículos submarinos operados remotamente, denominados ROVs (ROV = Remote Operated Vehicles), sometidos a diferentes condiciones de contorno (Katsui et al., 2012; Ramírez-Macías et al., 2016; Li et al., 2020; Vélez-Bermejo, 2020; Toscano-Angulo, 2021).

Estos métodos numéricos se conocen como modelos de Dinámica de Fluidos Computacional o modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) y se están utilizando de forma generalizada en diversos campos de las ciencias y las tecnologías para la simulación de flujos internos y externos y su interacción con distintos elementos ya que se consiguen resultados satisfactorios con una significativa reducción de costes de experimentación en periodos cortos de tiempo (Fernández-Tena y Casan-Clará, 2015; Torres-Parish, 2017). De este modo, con estos modelos CFD se pueden obtener conclusiones relevantes en el diseño, desarrollo y control de los vehículos ROVs, con un nivel excelente de detalle, sin necesidad de recurrir desde las primeras etapas del modelaje a la calibración experimental.

Existen varias herramientas informáticas que permiten la implementación, procesamiento y ejecución de estos modelos CFD. Destacan por sus numerosas aplicaciones en los campos de ciencias e ingenierías: Ansys Fluent (<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>), COMSOL Multiphysics (<https://www.comsol.com/>) y OpenFOAM (<https://www.openfoam.com/>) (Boe et al., 2013; Simao et al., 2016; Torres-Parish, 2017; Satria et al., 2019; Li et al., 2020; Bravo-Córdoba et al., 2021; Crha et al., 2021). Estos programas de ordenador se basan en el procesamiento de cálculos discretos en determinados y definidos elementos finitos para la simulación y caracterización de las propiedades y parámetros significativos de un fluido en movimiento y así conseguir una solución aproximada a los problemas planteados. La bondad de los resultados obtenidos depende del número de elementos utilizados.

En este capítulo se describe un procedimiento metodológico para la modelación de las interacciones y dinámica del fluido agua alrededor de vehículos submarinos no tripulados utilizando el software de código abierto OpenFOAM. Se complementa el estudio con las etapas a seguir para el diseño y construcción de prototipos a escala de ROVs que permitan la validación experimental de los resultados obtenidos con las simulaciones CFD.

Esta metodología está constituida por las siguientes fases de trabajo: (a) Modelado mecánico en 3D del ROV con el software SolidWorks (<https://www.solidworks.com/es>); (b) Configuración del caso de estudio en OpenFOAM y cálculo de las simulaciones de la dinámica del agua alrededor del ROV; (c) Post-procesado de los resultados de las simulaciones con el software de código abierto ParaView (<https://www.paraview.org/>) para tener visualizaciones que permitan analizar los datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas; (d) Validación experimental con un modelo físico a es-

cala del ROV en el laboratorio; y (d) Comparación de resultados y evaluación de la fiabilidad de la metodología de simulación seguida.

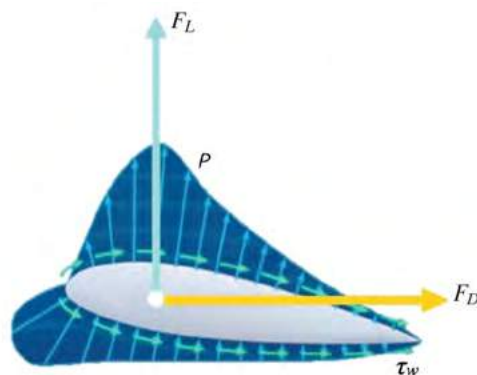
## 2. Modelación hidrodinámica

### 2.1. Fuerzas y coeficientes hidrodinámicos

La fuerza total hidrodinámica sobre cuerpos sumergidos como los ROVs puede definirse como la fuerza resultante de la fricción que se produce entre el cuerpo y el fluido debida a su viscosidad (Fossen, 2011; Moreno et al., 2014). Analíticamente esta fuerza  $F$  se puede calcular como la integral a lo largo de toda la superficie  $A$  del cuerpo de la presión superficial  $P$  menos la fricción superficial  $\tau_w$ , tal y como se indica en la ecuación (1):

$$F = \int_A (P - \tau_w) dA \quad (1)$$

La presión superficial  $P$  genera una fuerza de presión perpendicular  $PF$  a la superficie debida a las diferencias de presión y la fricción superficial  $\tau_w$  genera una fuerza de fricción tangente  $FF$  a la superficie debido al deslizamiento del fluido a través del cuerpo (Figura 1).



**Figura 1.** Ejemplo de distribución de las fuerzas debidas a la presión  $P$  y a la fricción  $\tau_w$  en un perfil de ala. Componentes  $F_L$  y  $F_D$  de la fuerza hidrodinámica  $F$  (The Efficient Engineer; <https://efficientengineer.com/>)

Si se descompone la fuerza total  $F$  en sus componentes  $X$  e  $Y$ , la proyección horizontal  $F_D$  es la fuerza de arrastre *Drag* que se genera opuesta al movimiento relativo de un cuerpo a través de un fluido. Por otro lado, la proyección vertical  $F_L$  es la fuerza de sustentación *Lift* que se genera perpendicular a este movimiento relativo. Ambas componentes se pueden definir

como el producto de  $\frac{1}{2}$  de la densidad  $\rho$  del fluido, un coeficiente adimensional  $C$ , un área  $A$  y la velocidad  $U$  del flujo al cuadrado.

De este modo, la fuerza de arraste  $F_D$  se determina mediante la ecuación (2) donde  $A_D$  es el área ortogonal a la dirección del flujo y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre que expresa la resistencia que opone un cuerpo a desplazarse por el medio fluido:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D U^2 \quad (2)$$

Por otro lado, la fuerza de sustentación  $F_L$  se calcula con la ecuación (3), siendo  $A_L$  el área longitudinal a la dirección del flujo y  $C_L$  el coeficiente de sustentación cuyo valor permite cuantificar la sustentación del cuerpo en el medio fluido:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L U^2 \quad (3)$$

## 2.2. Dinámica de Fluidos Computacional CFD

Los estudios hidrodinámicos permiten evaluar variables como las fuerzas debidas a la presión y fricción superficial a la que se somete el cuerpo sumergido en un fluido así como la trayectoria, velocidad y presión del flujo en su interacción con éste. Así estos parámetros pueden servir como apoyo para controlar y regular la orientación y profundidad en la maniobrabilidad de vehículos sumergidos no tripulados, para evaluar la potencia que deben tener los motores a instalar y el consumo de energía de los propulsores.

Se pueden plantear dos procedimientos para el desarrollo de estos estudios de dinámica de fluidos en los ROVs. El primero es el método tradicional de experimentación en instalaciones generalmente diseñadas para este tipo de pruebas (como canales de flujo o tanques hidrodinámicos) que suelen implicar grandes esfuerzos de tiempo y dinero para poder ejecutar todos los ensayos necesarios para obtener resultados comparables y satisfactorios. Además en algunas ocasiones se requiere de la fabricación de un modelo físico a escala del vehículo y, por supuesto, la necesidad de instalaciones hidráulicas con altos costes de inversión que garanticen el éxito de las pruebas. El segundo método es la modelación mediante ordenador de los análisis hidrodinámicos (simulación de Dinámica de Fluidos Computacional = Computational Fluid Dynamics = CFD) que permite la consecución de resultados aproximados con una buena fiabilidad en periodos tempora-



les reducidos y con una reducción significativa de los costes de I+D (Anderson, 1995; Garrido-Pellicer, 2015).

Existen tres categorías de modelos para la simulación CFD de flujos turbulentos dependiendo de cómo resuelvan las ecuaciones de Navier-Stokes –definen y caracterizan el comportamiento dinámico de flujos–: DNS, LES y RANS. En este trabajo se propone utilizar modelos de turbulencia RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) donde las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven promediando en el tiempo y así el flujo medio no varía (Winckler-Grez, 2021).

Las leyes de promedio de Reynolds se aplican a las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuación 4) a través de los modelos de turbulencia RANS (ecuación 5) para así obtener los valores promediados de las variables presión ( $P$ ) y velocidad  $[U(u,v,w)]$  que intervienen en la dinámica de un flujo de densidad  $\rho$  en estudio. Las ecuaciones RANS tienen un término adicional  $-\overline{u'_i u'_j}$  que se puede obtener mediante la Aproximación de Boussinesq (ecuación 6), introduciendo las variables de viscosidad turbulenta  $\nu_t$  y energía cinética turbulenta  $k$  que se determinan a partir de la elección del tipo de modelo de turbulencia RANS (Toscano-Angulo, 2021).

Ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\frac{D}{Dt} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} + (u \cdot \nabla) \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{-\nabla P}{\rho} + g + \nu \nabla^2 \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Ecuaciones RANS:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \rho \bar{g}_i + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (5)$$

Aproximación de Boussinesq:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

De los tipos de modelos de turbulencia que existen se ha optado por el modelo de turbulencia  $k$ -omegaSST ( $k$ - $\omega$ SST) ya que destaca por su fiabilidad de cálculo y equilibrio obteniendo un rendimiento similar al de  $k$ -omega ( $k$ - $\omega$ ) y con un comportamiento de corriente libre similar al de  $k$ -épsilon ( $k$ - $\epsilon$ ) (Menter, 1993; Wilcox, 2006; Toscano-Angulo, 2021). Éste cuenta con dos ecuaciones: la primera, para obtener la energía cinética turbulenta  $k$  (ecuación 7); y la segunda, para obtener la tasa de disipación específica turbulenta  $\omega$  (ecuación 8). A partir de ambas variables se obtiene la viscosidad turbulenta  $\nu_t$ .

Ecuación de  $k$ : 
$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega k + S_k \quad (7)$$

Ecuación de  $\omega$ : 
$$\frac{D}{Dt}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{v} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C D_{k\omega} + S_k \quad (8)$$

### 2.3. Etapas de funcionamiento de software CFD

El procedimiento seguido en las aplicaciones de ordenador que permiten la implementación, procesamiento y ejecución de modelos numéricos de CFD tiene tres etapas fundamentales: (a) Pre-procesado; (b) Simulación; y (c) Post-procesado.

La etapa de pre-procesado consiste en la definición global del problema CFD a resolver. Esto es: diseño de la geometría CAD del problema; definición del mallado que engloba a dicha geometría (discretización de la región del problema en pequeños volúmenes de control llamados celdas); especificación de las condiciones de frontera (comportamiento físico entre los límites/geometría y el flujo); ajuste de los valores iniciales (por ejemplo, cuanto vale la velocidad del fluido a tiempo 0); y establecimiento del tipo de modelo físico-matemático del sistema de ecuaciones a resolver (por ejemplo, el mencionado anteriormente modelo de turbulencia RANS k-omegaSST).

La etapa de simulación implica la ejecución de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes de forma iterativa en cada celda para cada instante de tiempo y variable, además de guardar los resultados.

Finalmente, la etapa de post-procesado consiste en el filtrado de los resultados mediante módulos de cálculo, análisis y visualización de datos para su interpretación, y realización de capturas de imágenes y animaciones para estudiar y comparar la evolución de los resultados.

## 3. Aplicación de la modelación hidrodinámica CFD a un ROV de pequeña escala

El procedimiento metodológico propuesto en este capítulo para la modelación de las interacciones y dinámica del fluido agua alrededor de un vehículo submarino no tripulado se aplicó al estudio y análisis del ROV tipo

Sibiu Pro (<https://www.nidorobotics.com/sibiu-pro>) (Figura 2). Se describen en los siguientes apartados las etapas de trabajo seguidas.

Este dron submarino con una estructura 'open-frame', tiene un peso en seco de 12,45 kg y unas dimensiones de 520 mm de largo, 390 mm de ancho y 290 mm de alto (Figuras 2 y 3). Sibiu Pro es ideal para operaciones de investigación, inspección y manipulación en aguas poco profundas a moderadas de 100 hasta 300 m. Está compuesto por ocho propulsores que proporcionan suavidad y estabilidad de navegación junto con un chasis resistente y baterías intercambiables rápidamente. Además cuenta con una cámara 1080p optimizada para medios acuáticos con cuatro faros de 1.500 lúmenes (Toscano-Angulo, 2021).



**Figura 2.** Vehículo sumergido operado remotamente (ROV) de pequeño tamaño tipo Sibiu Pro

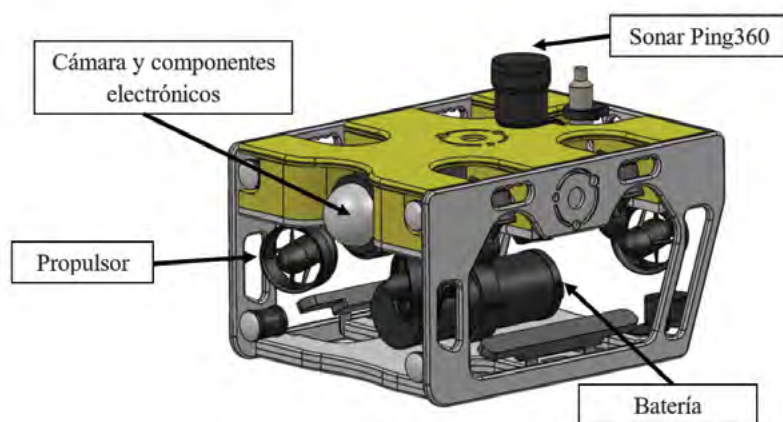
### 3.1. Pre-procesado

Esta etapa se inicia con el modelado de la geometría CAD del vehículo submarino en 3D mediante el software de diseño SolidWorks (<https://www.solidworks.com/es>), a partir de las medidas reales tomadas del ROV Sibiu Pro. En la Figura 3 se muestra el resultado de este modelado mecánico con los principales elementos integrados. El resto del preprocesado y posteriormente la simulación se ha realizado en OpenFOAM (<https://www.openfoam.com/>) que es una potente herramienta de simulación de dinámica de fluidos que está entre los tres softwares CFD más utilizados.

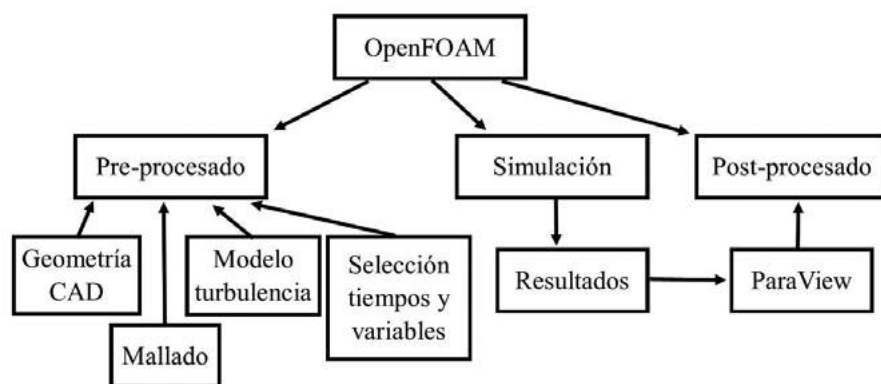
La principal ventaja que tiene el software OpenFOAM es que es de código abierto y completamente gratuito, pudiéndose trabajar con todas sus funcionalidades. Es un programa que no cuenta con interfaz gráfica de usuario (GUI) sino que se trabaja editando archivos de texto en lenguaje C dentro de un conjunto de directorios llamado caso donde se recoge toda la configuración de preprocesado y simulación del problema.

En la Figura 4 se muestra el esquema de trabajo que se debe seguir cuando se realizan simulaciones CFD con OpenFOAM. Es una aplicación diseñada para Linux y, por tanto, para trabajar en Windows una opción sencilla es instalar OpenFOAM en la Terminal de Ubuntu. De esta forma se trabaja editando archivos y ejecutando comandos de OpenFOAM de preprocesado y simulación en Ubuntu. Para el post-procesado de los resultados de las simulaciones se utiliza la aplicación de código abierto ParaView (<https://www.paraview.org/>) que permite crear visualizaciones para el análisis de los datos. En la memoria del Trabajo Fin de Máster de Toscano-Angulo (2021) se han elaborado manuales de usuario de OpenFOAM y de ParaView con un sencillo caso de ejemplo.

Cualquier caso de OpenFOAM cuenta con tres directorios: 'constant', 'system' y '0'. El caso del problema en estudio, que se ha denominado *Sibiu-Pro*, cuenta con la estructura de directorios y archivos que se muestran en la Figura 5.



**Figura 3.** Modelado 3D del ROV Sibiu Pro en SolidWorks



**Figura 4.** Esquema de trabajo del software OpenFOAM para realizar simulaciones CFD

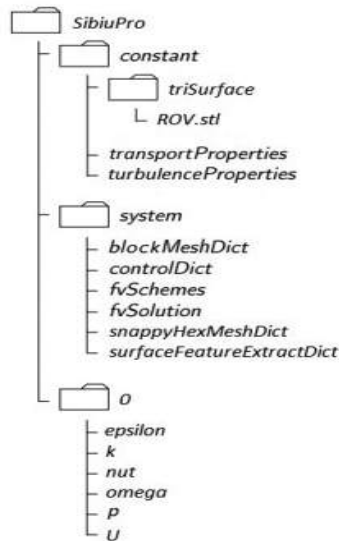
El directorio 'constant' cuenta con el ROV en formato STL exportado de SolidWorks, especificando el fluido como newtoniano (agua de mar) con una viscosidad cinemática  $\nu$  de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  y tipo de modelo de turbulencia RANS  $k$ -omegaSST.

En el directorio 'system' se ha especificado el solucionador simpleFoam diseñado para resolver las ecuaciones RANS para flujo turbulento incompresible en estado estacionario. La simulación se realiza desde tiempo 0 hasta 5 segundos considerando saltos de tiempo cada 0,02 segundos para garantizar la precisión de cálculos. Los resultados se guardan cada 0,04 segundos para agilizar la simulación y disminuir la cantidad de datos archivados. Se ha introducido también una función para que calcule una sexta variable adicional, necesaria en el caso en estudio, que es el esfuerzo cortante de pared. En este directorio también se especifica la configuración del mallado, las condiciones de frontera y la introducción de la geometría y su refinado. La disposición y calidad del mallado del ROV dentro del bloque de celdas se muestra al aplicar los comandos de pre-procesado.

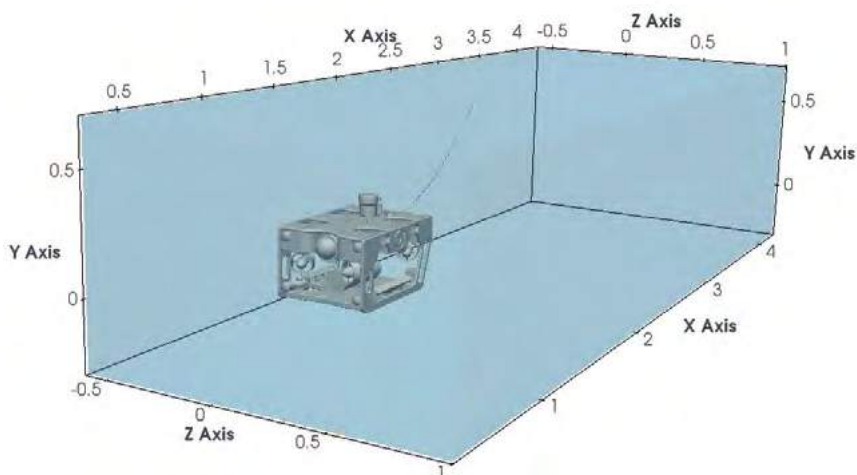
En el directorio '0' se ubican los valores iniciales de cada variable. El parámetro  $\epsilon$  no es necesario en el modelo de turbulencia  $k$ -omegaSST. Las variables  $k$ ,  $\nu_t$  (viscosidad turbulenta),  $\omega$  y  $p$  (presión entre densidad del fluido) se introducen siguiendo las indicaciones del manual de usuario de OpenFOAM. La velocidad  $U$  se define como 1 m/s en sentido  $X$  positivo, simulando así la interacción de avance del ROV sobre el flujo.

Una vez que el caso *SibiuPro* en estudio está completamente configurado, se pueden ejecutar los comandos de preprocesado de OpenFOAM en

la Terminal de Ubuntu accediendo previamente a la ubicación del caso. En una primera etapa se ejecuta el comando 'blockMesh' para crear el bloque mallado definido de  $4 \times 1 \times 1,6 \text{ m}^3$  que conforman 100.000 celdas hexahédricas. Este bloque mallado cuenta con una cara de entrada de flujo *inlet* y una cara de salida *outlet* tal y como se muestra en la Figura 6 con el ROV en formato STL superpuesto.

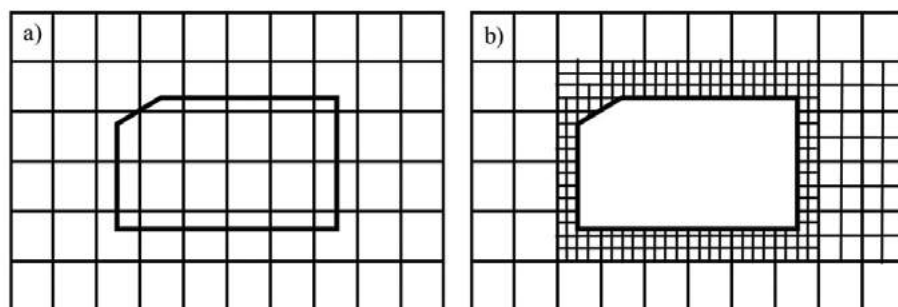


**Figura 5.** Estructura de directorios del caso SibiuPro en estudio



**Figura 6.** Bloque mallado definido en el caso en estudio con el ROV introducido en formato STL (ROV.stl)

Seguidamente se ejecutan el comando 'surfaceFeatureExtract' para extraer la superficie del ROV y el comando 'snappyHexMesh' que se encarga de introducir la superficie del ROV en el bloque mallado (Figura 6). Se realizan múltiples divisiones de celdas en sus proximidades, eliminando las celdas interiores y refinando las exteriores, adaptando la curvatura como se muestra en la Figura 7. El resultado final del pre-procesado en el caso SibiuPro se muestra en la Figura 8. La configuración definida en los archivos convierte las 100.000 celdas del bloque mallado en casi 1,9 millones. Este procedimiento se puede consultar en el enlace del manual de usuario de OpenFOAM: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility>.



**Figura 7.** Bloque mallado a nivel interno: (a) Antes de ejecutar 'snappyHexMesh'; (b) Después de ejecutar 'snappyHexMesh'

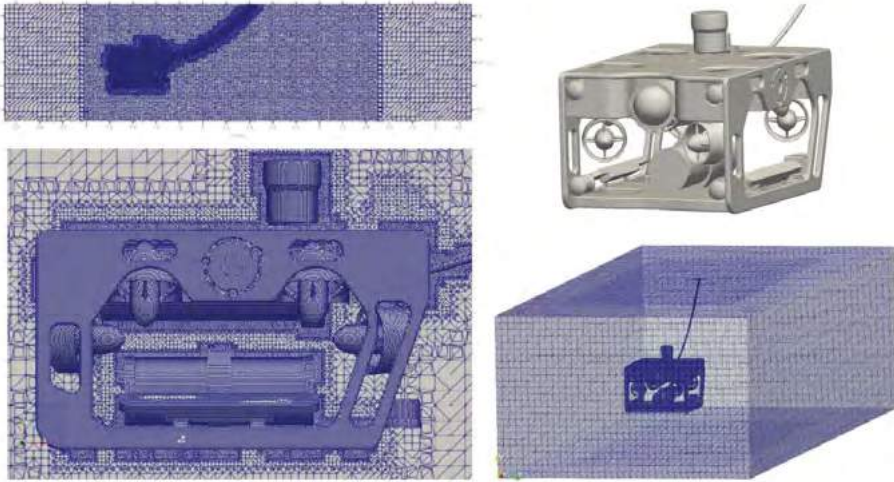
### 3.2. Simulación

Para ejecutar esta etapa de simulación se utiliza el comando del solucionador que es 'simpleFoam'. En el caso SibiuPro en estudio se ejecutó la simulación en un tiempo de tres horas utilizando un procesador de gama media. Se generaron 125 directorios de tiempo: 0,04 s; 0,08 s; ...; y 5 s donde se guardan las cinco variables definidas en el directorio '0', más una sexta adicional que es el esfuerzo cortante de pared con sus casi 1,9 millones de resultados por variable, lo cual supone 27 Gb de datos.

### 3.3. Post-procesado

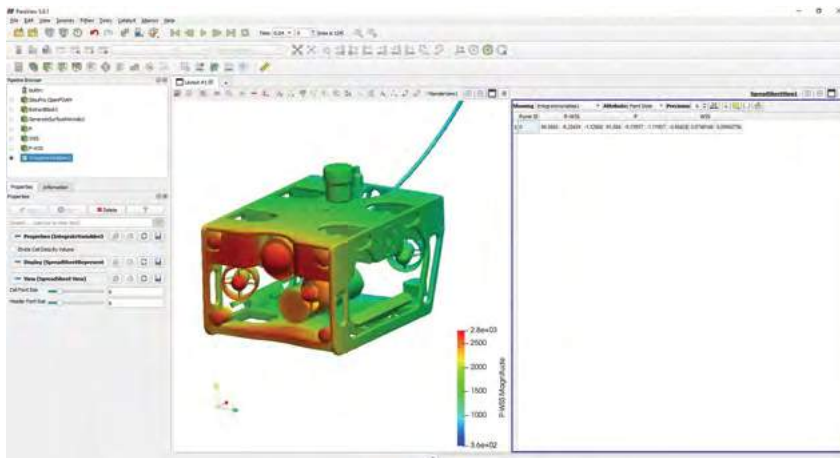
Tal y como se ha comentado anteriormente, esta etapa de post-procesado se realiza en ParaView que es una potente aplicación de visualización y análisis de datos de código abierto que se encuentra empaquetada en el software de OpenFOAM para el post-procesado de las simulaciones CFD realizadas.





**Figura 8.** Resultados del refinado y suavizado utilizando el comando ‘*snappyHex-Mesh*’ en el caso *SibiuPro* (Toscano-Angulo, 2021)

Para cargar los datos simulados en ParaView se ejecuta el comando ‘*paraFoam*’ en Ubuntu. Se aplican distintos filtros de visualización y cálculo para obtener los resultados cualitativos y cuantitativos que se verán en el apartado de resultados con capturas de imágenes y animaciones. En la Figura 9 se indica a modo de ejemplo la ventana de la interfaz de ParaView con resultados cualitativos y cuantitativos del caso *SibiuPro*.



**Figura 9.** Resultados cualitativos y cuantitativos del caso *SibiuPro* en la aplicación ParaView



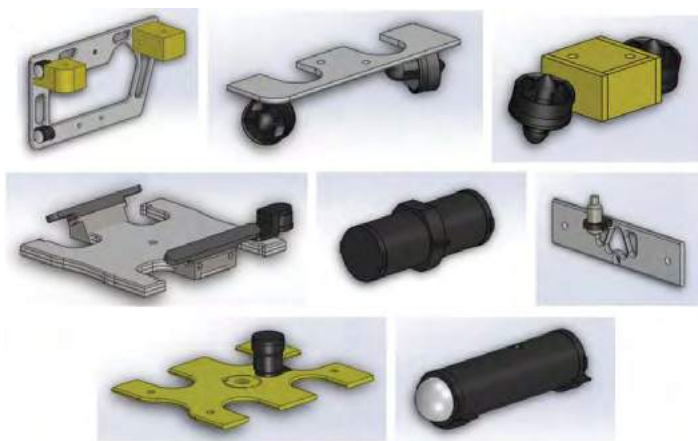
## 4. Validación experimental con un modelo físico a escala

El objetivo del procedimiento experimental consiste en la visualización de las trayectorias de las líneas de flujo durante la interacción con el ROV para su comparación con los resultados obtenidos en las simulaciones CFD. Estas pruebas experimentales se han realizado utilizando un canal de flujo para el estudio de dinámica de fluidos ubicado el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva (Figura 10).

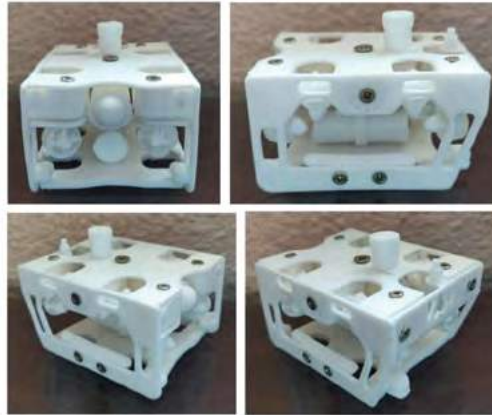


**Figura 10.** Canal hidrodinámico del laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva

Las dimensiones del canal de flujo son de 6050 x 1000 x 1700 mm. El modelo a escala 7/50 del ROV *Sibiu Pro* se ha impreso en 3D en PLA y por partes que se han atornillado mediante tornillos de rosca de madera (Figuras 11 y 12).

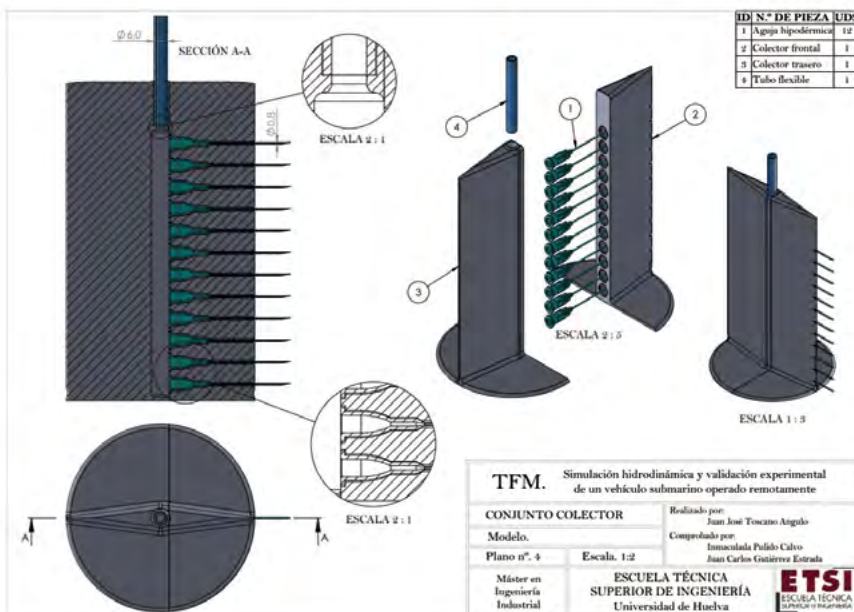


**Figura 11.** Piezas para la impresión en 3D del ROV *Sibiu Pro* (Toscano-Angulo, 2021)



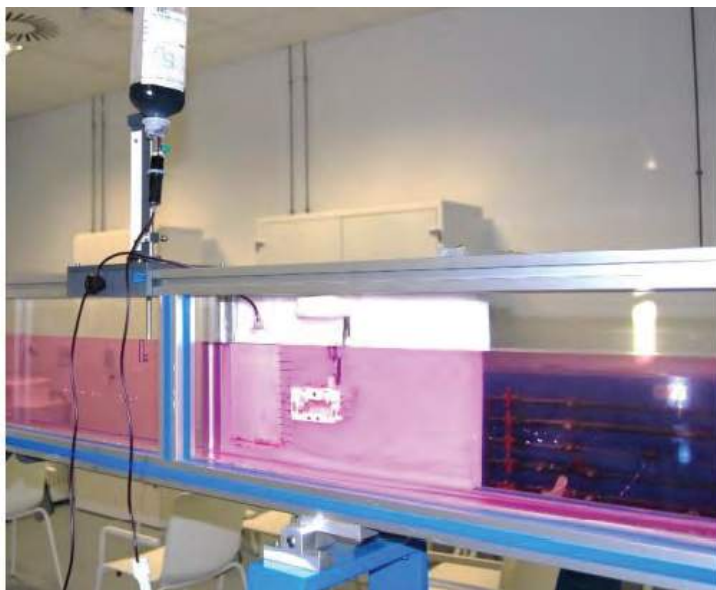
**Figura 12.** ROV *Sibiu Pro* a escala 7/50 impreso en 3D en filamento PLA

Para poder visualizar las trayectorias de las líneas de corriente se ha diseñado en SolidWorks y fabricado mediante impresión 3D en filamento PLA un inyector para poder introducir un colorante en el flujo que se genere en el canal. En este dispositivo de inyección se han introducido doce agujas hipodérmicas en posición horizontal separadas verticalmente cada 10 mm. El cuerpo del inyector está compuesto por dos piezas pegadas cuyo diseño está pensado para que produzca la mínima alteración exterior del flujo (Figura 13).



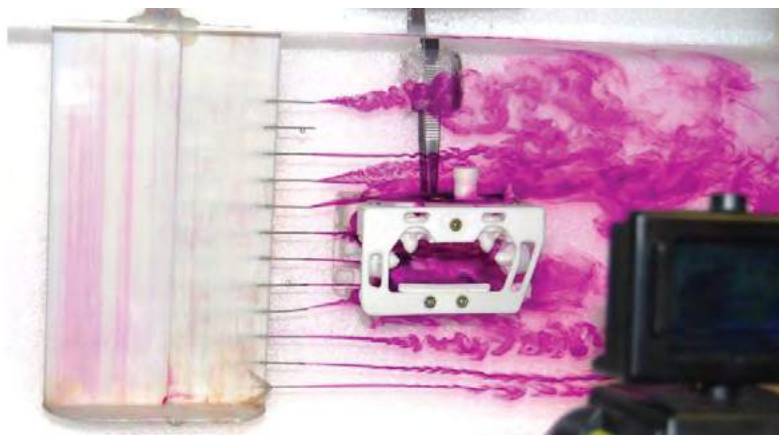
**Figura 13.** Diseño del inyector de colorante para la visualización de las líneas de corriente en el canal de flujo (Toscano-Angulo, 2021)

En las Figuras 14 y 15 se muestran la instalación experimental y uno de los ensayos realizados para la visualización de las líneas de corriente alrededor de Sibiu Pro. Como se observa en la Figura 14, el inyector está unido a un sistema de goteo de suero relleno con fluido colorante (permanganto potásico diluido) cuyo contraste con el agua genera las líneas de flujo.



**Figura 14.** Instalación experimental para la visualización de la interacción de las líneas de flujo con un vehículo submarino a escala

---



**Figura 15.** Prueba experimental de visualización de líneas de corriente alrededor de un modelo a escala del ROV Sibiu Pro

---

## 5. Resultados y discusión

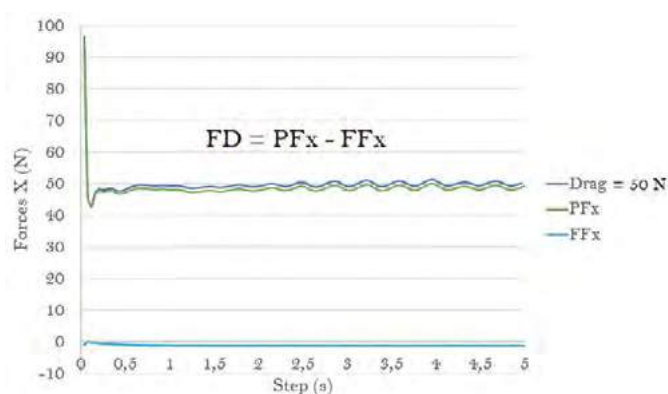
### 5.1. Fuerzas y coeficientes hidrodinámicos

Los resultados obtenidos en la etapa de post-procesado de las simulaciones CFD relativos a las fuerzas de presión  $PF$ , de fricción  $FF$  y total hidrodinámica  $F$  ejercidas sobre el vehículo submarino en estudio se muestran en la Tabla 1. Se indican las componentes XYZ de la fuerza de presión y de la fuerza de fricción así como las componentes de arrastre (Drag), de sustentación (Lift) y la fuerza lateral (Side) de la fuerza total hidrodinámica. El arrastre (Drag) es la diferencia entre las componentes X de la fuerza de presión y fricción, la sustentación (Lift) es la diferencia entre las componentes Y de la fuerza de presión y fricción y la fuerza lateral (Side) es la diferencia entre las componentes Z de la fuerza de presión y fricción. En la Tabla 1 se indican sólo los valores registrados en los 10 primeros y 10 últimos tiempos de simulación de los 125 tiempos totales que se han guardado en OpenFOAM. Los valores de estas fuerzas en todos los tiempos de simulación se pueden consultar en Toscano-Angulo (2021).

**Tabla 1.** Fuerza de presión  $PF$ , Fuerza de fricción  $FF$  y Fuerza total hidrodinámica  $F$  ejercidas sobre el ROV en estudio y obtenidas mediante simulaciones CFD (Toscano-Angulo, 2021)

TIEMPO SIMULACIÓN (s)	FUERZA DE PRESIÓN (N)			FUERZA DE FRICCIÓN (N)			FUERZA HIDRODINÁMICA (N)		
	$PF_x$	$PF_y$	$PF_z$	$FF_x$	$FF_y$	$FF_z$	$F_D$ (Drag)	$F_L$ (Lift)	$F_S$ (Side)
0,04	95,5840	-9,15957	-1,119070	-0,9843	0,07482	0,009610	96,57	-9,23	-1,13
0,08	45,3344	-4,12641	-0,731488	-0,1561	0,01408	0,003157	45,49	-4,14	-0,73
0,12	42,6497	2,37853	1,379390	-0,3090	-0,01709	-0,010840	42,96	2,40	1,39
0,16	46,4886	3,22067	1,817380	-0,4312	-0,04048	-0,019070	46,92	3,26	1,84
0,2	47,6029	1,83276	0,967791	-0,5159	-0,04256	-0,017571	48,12	1,88	0,99
0,24	47,4789	-0,74737	0,061520	-0,5837	-0,03442	-0,007524	48,06	-0,71	0,07
0,28	47,4706	-3,50253	-0,057283	-0,6318	-0,01924	-0,002205	48,10	-3,48	-0,06
0,32	47,7384	-6,62834	0,327015	-0,6868	0,00076	-0,003905	48,43	-6,63	0,33
0,36	47,6146	-8,49215	0,450633	-0,7469	0,00791	-0,004202	48,36	-8,50	0,45
0,4	46,9993	-8,51277	0,355590	-0,8019	0,01179	-0,003485	47,80	-8,52	0,36
4,6	49,0016	-6,35539	2,107390	-1,3183	-0,03952	0,015510	50,32	-6,32	2,09
4,64	49,3942	-6,91457	2,023970	-1,3238	-0,04041	0,016960	50,72	-6,87	2,01
4,68	49,5001	-6,79165	1,858980	-1,3280	-0,03970	0,019580	50,83	-6,75	1,84
4,72	49,2282	-6,10402	1,739350	-1,3283	-0,03764	0,022530	50,56	-6,07	1,72
4,76	48,7164	-5,32292	1,726880	-1,3239	-0,03556	0,024220	50,04	-5,29	1,70
4,8	48,2119	-4,76974	1,779360	-1,3171	-0,03472	0,022970	49,53	-4,74	1,76
4,84	47,9901	-4,57395	1,845360	-1,3115	-0,03488	0,019640	49,30	-4,54	1,83
4,88	48,1015	-4,78840	1,893160	-1,3085	-0,03545	0,016060	49,41	-4,75	1,88
4,92	48,4053	-5,42714	1,945450	-1,3082	-0,03670	0,013980	49,71	-5,39	1,93
4,96	48,8221	-6,32086	2,005330	-1,3123	-0,03825	0,014540	50,13	-6,28	1,99
5	49,2621	-7,06628	1,996030	-1,3207	-0,03945	0,017320	50,58	-7,03	1,98

En la Figura 16 se representan los valores de la fuerza de arrastre  $F_D$  en la simulación CFD realizada de la hidrodinámica del ROV Sibiu Pro en estudio. Se observa que esta fuerza decrece bruscamente desde 96,57 N hasta 42,96 N debido a la transición del régimen del flujo desde transitorio a estacionario adaptándose de esta forma a la geometría del vehículo submarino y estabilizándose seguidamente con pequeñas oscilaciones alrededor de un valor de 50 N.

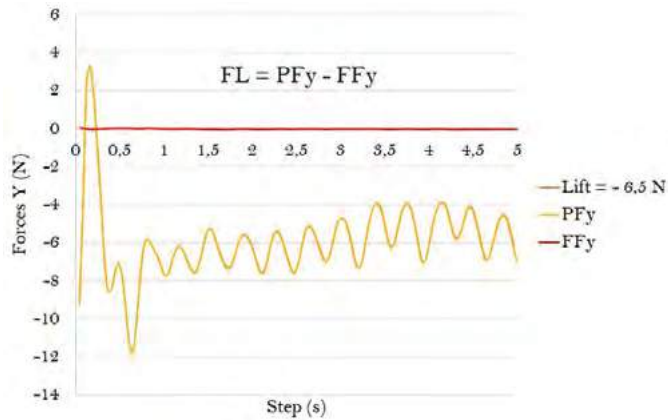


**Figura 16.** Series temporales de la fuerza de presión ( $PF_x$ ), de la fuerza de fricción ( $FF_x$ ) y de la fuerza de arrastre ( $F_D = Drag$ ) en la simulación hidrodinámica del ROV (Toscano-Angulo, 2021)

Para la fuerza de sustentación se observa también una fuerte oscilación al inicio de la simulación llegando a estabilizarse alrededor de un valor de -6.5 N (Figura 17). El valor negativo de esta fuerza indica que el sentido es hacia abajo para las condiciones impuestas.

En las Figuras 16 y 17 se muestra que existe una influencia significativa de la fuerza de presión sobre la fuerza de fricción, siendo esta última casi despreciable, lo cual indica una mínima adherencia del fluido sobre la superficie del ROV. Este fenómeno se puede deber al diseño de la geometría del ROV que genera una separación del flujo de la superficie del vehículo sumergido y, por tanto, se traduce en la dominancia de la fuerza de presión.

En la comparativa de las fuerzas hidrodinámicas se aprecia como la fuerza de arrastre  $F_D$  (valor medio de 50 N) domina sobre las fuerzas de sustentación  $F_L$  (valor medio de 6,5 N) y lateral  $F_s$  (valor medio de 2 N) lo cual es frecuente en los vehículos submarinos (García-García, 2019), pero en el caso en estudio esta prevalencia es aún más significativa lo que puede ser debido al diseño del ROV con los elementos integrados que tiene.



**Figura 17.** Series temporales de la fuerza de presión ( $PFy$ ), de la fuerza de fricción ( $FFy$ ) y de la fuerza de sustentación ( $F_L$ =Lift) en la simulación hidrodinámica del ROV (Toscano-Angulo, 2021)

A partir de las componentes de las fuerzas hidrodinámicas  $F_D$  y  $F_L$  se pueden obtener los coeficientes hidrodinámicos de arrastre ( $C_D$ ) y de sustentación ( $C_L$ ) a partir de las ecuaciones (2) y (3) considerando una velocidad de avance del ROV de 1 m/s. El área transversal para el arraste  $A_D$  y el área longitudinal  $A_L$  para la sustentación se calculan con la aplicación SolidWorks:

$$C_D = \frac{2 |F_D|}{\rho A_D U^2} = \frac{2 \cdot |50 \text{ N}|}{1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,05479 \text{ m}^2 \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 1,825 \quad (9)$$

$$C_L = \frac{2 |F_L|}{\rho A_L U^2} = \frac{2 \cdot |-6,5 \text{ N}|}{1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,14467 \text{ m}^2 \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 0,09 \quad (10)$$

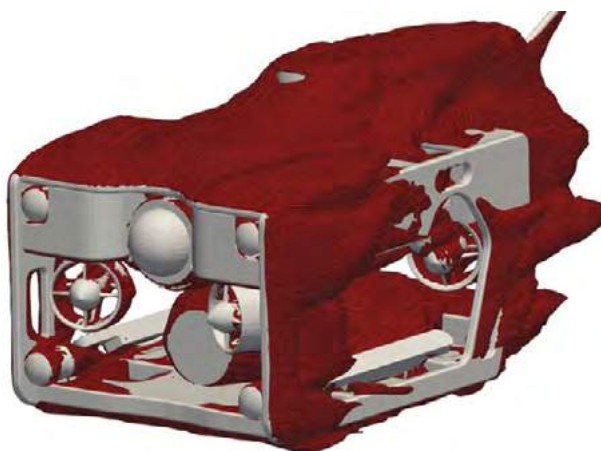
Se obtiene un coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de 1,825 que es superior a los valores medios resultantes en otras simulaciones hidrodinámicas realizadas con modelos CFD en otros vehículos submarinos (Prestero, 2001; García-Pellicer, 2015). Este valor puede estar indicando la necesidad de estudiar el suavizado de las geometrías de algunos de los componentes integrados en la carcasa del ROV que favorezcan la hidrodinámica. Por otra parte, el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) de 0,09 tiene valores similares a los obtenidos en otras simulaciones, sugiriendo un mínimo desvío vertical que en todo caso será hacia abajo por el sentido negativo de la sustentación. Estos valores deben estar validados con análisis experimentales que contrasten y confirmen los resultados obtenidos (Prestero, 2001; García-Pellicer, 2015).



## 5.2. Análisis cualitativos y cuantitativos de las simulaciones hidrodinámicas

En este apartado se evalúan y discuten los resultados obtenidos en la etapa de post-procesado de la interacción que el fluido ejerce sobre el ROV Sibiu Pro en su movimiento de avance a una velocidad constante de 1 m/s.

Las nubes de presión (*pressure clouds*) alrededor del ROV permiten la visualización de las zonas en las que se genera el arrastre. Se puede apreciar en la Figura 18 cómo la geometría del ROV genera nubes de presión significativas debido a las caras planas sobre las que el fluido incide perpendicularmente durante el movimiento de avance. Son especialmente relevantes las nubes de presión que generan los flotadores delanteros, el cilindro de electrónica, la batería y el sonar 360 (Figura 3). También se generan nubes en la parte trasera del vehículo debido a la forma rectangular del chasis posterior que no favorece la reagrupación del flujo superior con el flujo que bordea exteriormente al ROV. Es en esta zona donde ocurre el desprendimiento de la capa límite y, por tanto, la formación de vórtices (Toscano-Angulo, 2021).

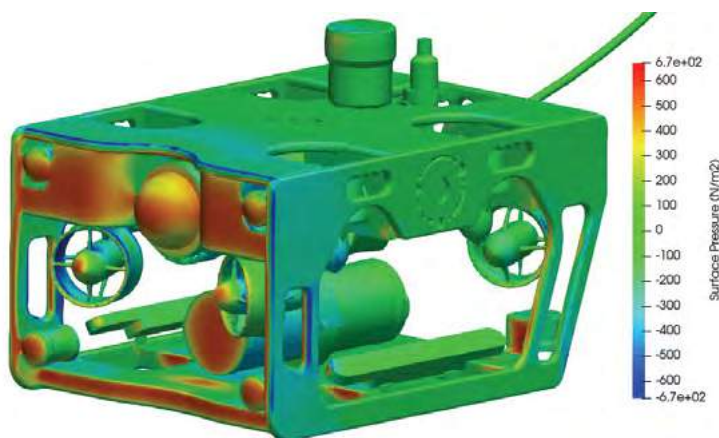


**Figura 18.** Simulación de nubes de presión alrededor del ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)

Por otra parte, la presión superficial (*surface pressure*) es la presión que el fluido ejerce sobre el cuerpo perpendicular a la superficie, y que empuja o tira del mismo dependiendo de su sentido. En el caso en estudio sus valores se muestran en la Figura 19 siendo más altos en las caras planas donde el flujo incide perpendicularmente. En los flotadores delanteros, en la punta del vidrio de protección de la cámara y sobre la batería se genera una presión de estancamiento de las partículas de hasta 640 Pa. Existen zonas

puntuales de presiones negativas de hasta  $-1.200$  Pa donde ocurre la separación de flujo y se acelera. Estas zonas de depresión son las transiciones redondeadas de las caras frontales y laterales del chasis y la tapa superior, además de las superficies interiores de los rotores o propulsores delanteros. La presión disminuye en estos puntos y, por tanto, la velocidad aumenta por la separación de flujo conservándose así la energía mecánica.

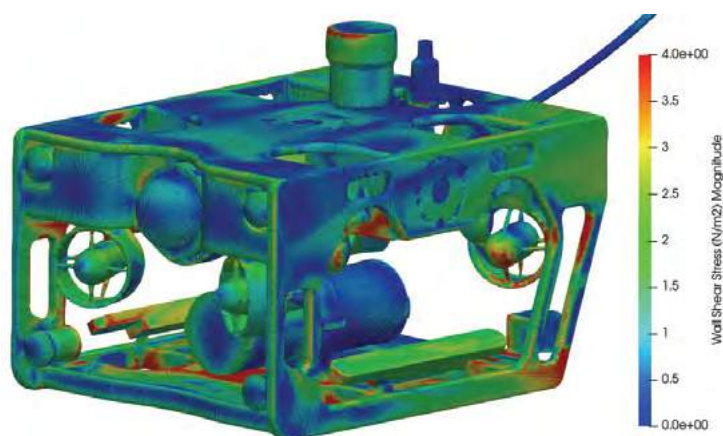
Como se ha indicado con anterioridad, los resultados obtenidos parecen sugerir el suavizado en algunas zonas de la geometría del ROV y de sus componentes integrados para así reducir los picos de presión y depresión y así reducir la fuerza de arrastre. Estos resultados deben validarse experimentalmente de forma cuantitativa para llegar a conclusiones sobre la influencia de la geometría del ROV en el análisis hidrodinámico.



**Figura 19.** Simulación de los valores de presión superficial sobre el ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)

La fricción superficial (wall shear stress) es la tensión que el fluido ejerce sobre el cuerpo paralela a la superficie en el sentido de las líneas de corriente superficiales. En la Figura 20 se muestran los valores de la fricción superficial sobre el ROV. Sus valores son despreciables en comparación con la presión superficial ( $4$  Pa de máxima) debido a la separación de flujo que se produce impidiendo así la adherencia del mismo a la superficie del ROV. Las superficies en azul se corresponden con zonas donde el fluido no experimenta adherencia con la superficie del vehículo submarino, ya sea por la separación de flujo previa o por la presión de estancamiento que frena completamente al flujo.





**Figura 20.** Simulación de los valores de fricción superficial sobre el ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)

### 5.3. Líneas de corriente del flujo

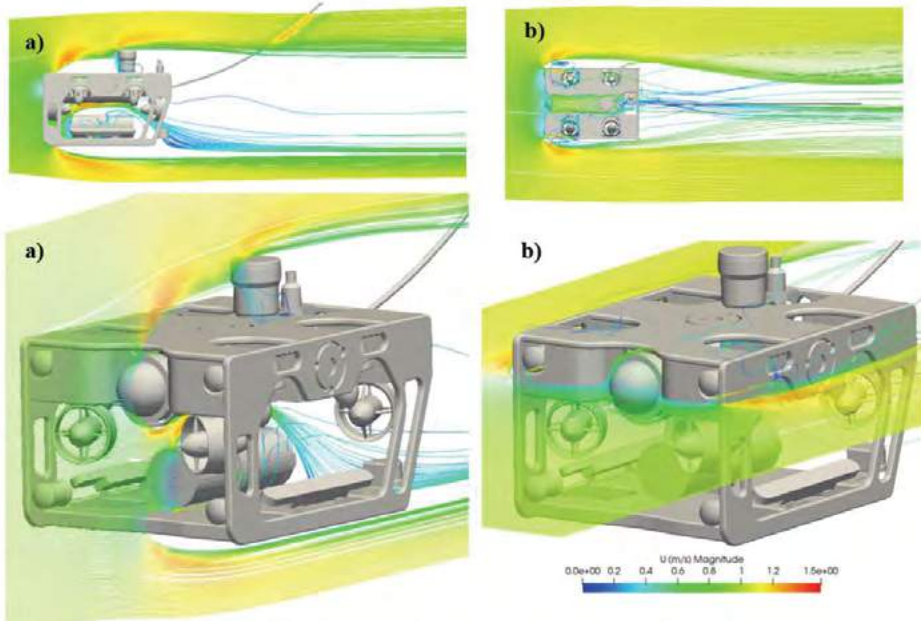
El apartado 5.2 se complementa con un análisis y caracterización del régimen flujo en su interacción con el vehículo submarino en estudio. Se utilizan las líneas de flujo o de corriente que son un recurso común para conocer las trayectorias que siguen las partículas fluidas cuando interactúan con cuerpos sumergidos.

En la Figura 21 se puede observar como las líneas de corriente verticales centradas se dividen en tres trayectorias distintas: superior, inferior y central. En las trayectorias superior e inferior se observan separaciones significativas del flujo de la superficie del ROV debido a las caras planas de la tapa superior y del chasis inferior, respectivamente, incrementando las velocidades del fluido hasta 1,6 m/s. Sin embargo, las partículas fluidas que siguen la trayectoria central tienden a agruparse.

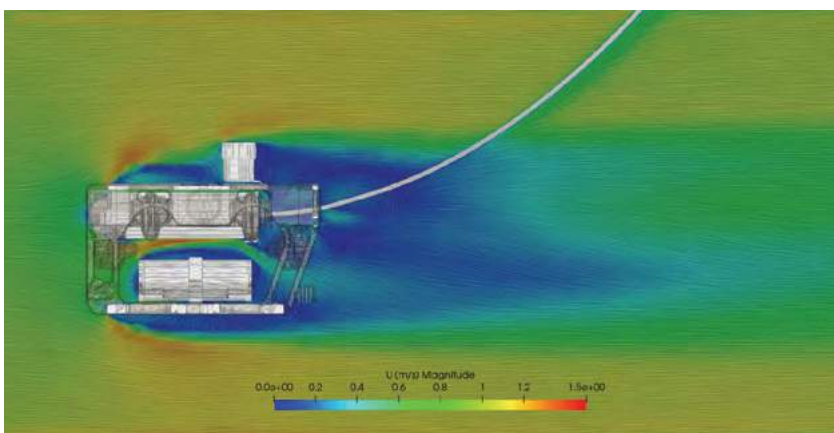
Las líneas de corriente horizontales centradas (Figura 21) también se dividen en tres trayectorias distintas: izquierda, derecha y central. Para los flujos laterales ocurre algo similar a los flujos superior e inferior vistos anteriormente, acelerando el flujo hasta 1,4 m/s. Mientras tanto el flujo central se divide en dos inferiores tras frenarse en los flotadores y uno superior tras frenarse sobre el cilindro de electrónica (Figura 3).

La evaluación del régimen de flujo mediante las líneas de corriente puede complementarse analizando el perfil de velocidades del flujo, tal como se muestra en la Figura 22. En este se puede ver el rango de veloci-

dades que se tiene en la interacción fluido-ROV y donde pueden apreciarse con claridad los vórtices que se han formado como consecuencia de la separación del flujo de la superficie del vehículo submarino.

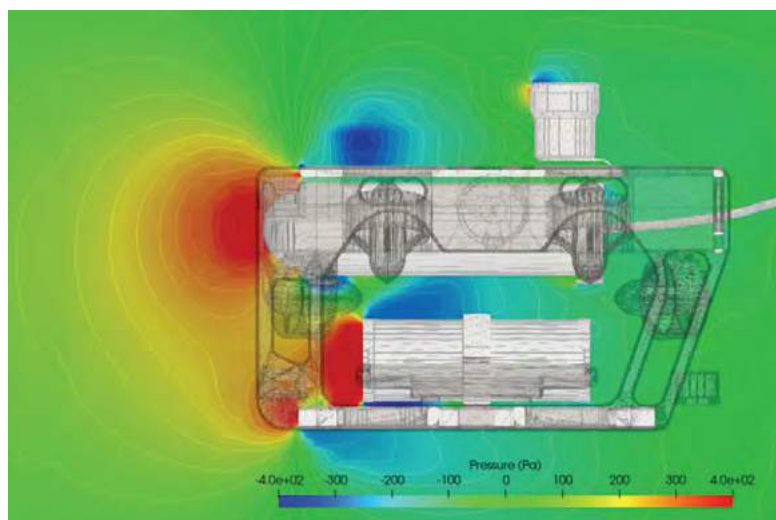


**Figura 21.** Líneas de corriente verticales (a) y horizontales (b) centradas de interacción con el ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)



**Figura 22.** Perfil de velocidades del flujo en la interacción con el ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)

En la Figura 23 se muestra el perfil de presiones del flujo sobre el ROV con la representación de isobaras que se incrementan cuando se aproximan a las caras planas perpendiculares al flujo; así ocurre en la batería con hasta 560 Pa. Sobre el cilindro, donde está integrados los componentes electrónicos, la presión es algo menor debido a su forma semiesférica que reduce el estancamiento (Figura 3). Las zonas en azul oscuro indican presiones negativas de hasta -800 Pa donde se genera el desprendimiento de vórtices visto previamente.



**Figura 23.** Perfil de presiones del flujo en la interacción con el ROV Sibiu Pro (Toscano-Angulo, 2021)

#### *5.4. Comparación cualitativa de las simulaciones CFD con pruebas experimentales*

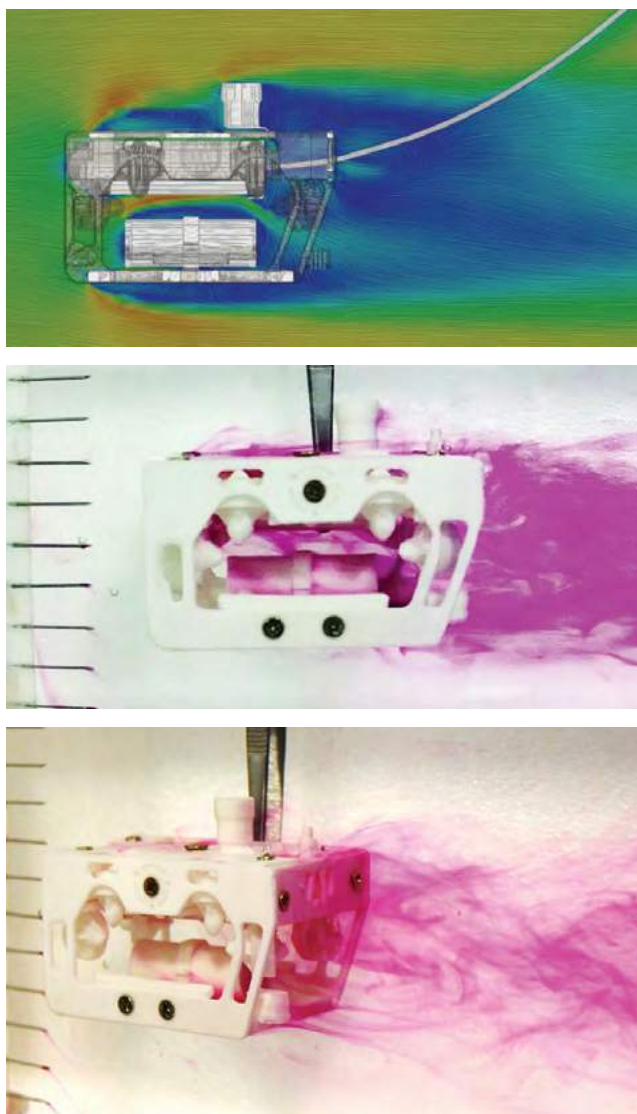
En este apartado se compara de manera cualitativa en la interacción flujo-ROV las trayectorias de las líneas de corriente simuladas con los modelos CFD y las obtenidas con ensayos experimentales utilizando un modelo a escala del ROV sumergido en un canal hidrodinámico en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva (Figuras 10, 14 y 15).

En la Figura 24 se puede apreciar la similitud de las separaciones del flujo en las simulaciones CFD y las pruebas experimentales. Se tienen tres trayectorias del flujo (superior, inferior y central), tal y como se ha comentado en apartados anteriores, diferenciadas como consecuencia de la incidencia de las partículas fluidas sobre las caras frontales planas del ROV Sibiu Pro.



**Figura 24.** Comparación de las trayectorias de las líneas de corriente simuladas con los modelos CFD y las obtenidas con ensayos experimentales en la interacción flujo-ROV.

Las estelas simuladas del flujo se corresponden con la mezcla y difuminado de las líneas del colorante que se forman en la parte trasera del ROV a escala, donde las partículas fluidas quedan frenadas y retenidas en los vórtices. Asimismo



**Figura 25.** Comparación de las estelas de flujo simuladas con los modelos CFD y las obtenidas con ensayos experimentales en la interacción flujo-ROV.

se puede comprobar como el colorante queda adherido superficialmente al ROV debido a la fricción superficial que éste genera sobre el flujo (Figura 25).

Una selección de resultados simulados y descritos en los apartados 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran en un vídeo en el siguiente enlace de YouTube proporcionado mediante el código QR de la Figura 26:





**Figura 26.** Código QR que enlaza a YouTube para la visualización de un resumen de los resultados obtenidos

---

## 6. Conclusiones

El uso de modelos CFD para la evaluación de la interacción del flujo con vehículos submarinos es una herramienta que facilita la obtención de directrices que pueden ser relevantes para el diseño, desarrollo, modificación, control y maniobra de los ROVs pudiendo así reducir el número de pruebas experimentales y, por tanto, implicando una reducción de los costes asociados a la puesta a punto de estos equipos.

Este trabajo de análisis hidrodinámico de un ROV comercial se constituye como una actuación fundamental para el planteamiento de modificaciones en la geometría del vehículo consecuencia de la integración de nuevos componentes como, por ejemplo, una sonda multiparamétrica para la medición de parámetros físico-químicos del agua, y así determinar las implicaciones de estos cambios sobre el control y regulación de las maniobras de orientación y guiado así como para la determinación de los requerimientos de potencia y para la evaluación del consumo de batería/combustible.

Por ésto, proyectos como KTTSeaDrones '*Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras*' (POCTEP 0622\_KTTSEA-DRONES\_5\_E), cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020, son actuaciones prioritarias para el fomento del desarrollo de productos y tecnologías que favorecen la consecución de un crecimiento económico inteligente, sostenible y competitivo.

## 7. Bibliografía

ANDERSON, J.D.JR. (1995). Computational Fluid Dynamics: The basics with applications. McGraw-Hill, Inc., New York, USA.

- BOE, C., RODRÍGUEZ, J., PLAZAOLA, C., BANFIELD, I., FONG, A., CABALLERO, R., VEGA, A. (2013). A hydrodynamic assessment of a remotely operated underwater vehicle based on Computational Fluid Dynamic-Part 1-Numerical simulation. *CMES* 90(2), 165-177.
- BRAVO-CÓRDOBA, F.J., FUENTES-PÉREZ, J.F., VALBUENA-CASTRO, J., MARTÍNEZ DE AZAGRA-PAREDES, A., SANZ-RONDA, F.J. (2021). Turning pools in stepped fishways: Biological assessment via fish response and CFD models. *Water* 13, 1186.
- CRHA, J., BASAŘOVÁ, P., RUZICKA, M.C., KAŠPAR, O., ZEDNIKOVA, M. (2021). Comparison of two solvers for simulation of single bubble rising dynamics: COMSOL vs. Fluent. *Minerals* 11, 452.
- FERNÁNDEZ-TENA, A., CASAN-CLARÁ, P. (2015). Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional a la neumología. *Archivos de Bronconeumología* 51(6), 293-298.
- FOSSEN, T.I. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, West Sussex, Reino Unido.
- GABL, R., DAVEY, T., CAO, Y., LI, Q., LI, B., WALKER, K.L., GIORGIO-SERCHI, F., ARACRI, S., KIPRAKIS, A., STOKES, A.A., INGRAM, D.M. (2020). Experimental force data of a restrained ROV under waves and current. *Data* 5(3), 57.
- GARCÍA-GARCÍA, J. (2019). Cálculo de los coeficientes hidrodinámicos de varios vehículos submarinos mediante ANSYS. Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- GARRIDO-PELLICER, A. (2015). Estimación de los coeficientes hidrodinámicos de vehículos autónomos submarinos mediante CFD. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- GUTIÉRREZ-ESTRADA, J.C., PEREGRÍN-RUBIO, A., GÓMEZ-BRAVO, F., PULIDO-CALVO, I., GONZÁLEZ-CABRERA, M. (2019). Informe introductorio sobre desarrollo y evaluación de sistemas fijos (boyas), pequeños vehículos marinos (ROVs) y análisis de datos e imágenes en zonas estuáricas y explotaciones acuícolas. Informe técnico de la Acción 1.3 del Proyecto KTT-SeaDrones cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020 (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>).
- KATSUI, T., KAJIKAWA, S., INOUE, T. (2012). Numerical investigation of flow around a ROV with crawler based. ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 23-30.
- LI, Q., CAO, Y., LI, B., INGRAM, D. M., KIPRAKIS, A. (2020). Numerical modelling and experimental testing of the hydrodynamic characteristics for an

- open-frame remotely operated vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 688.
- MENTER, F.R. (1993). Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, Orlando, FL, USA.
- MORENO, H., SALTARÉN, R., PUGLISI, L., CARRERA, I., CÁRDENAS, P., ÁLVAREZ, C. (2014). Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 11, 3-19.
- PRESTERO, T. (2001). Verification of six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Graduate Theses, Massachusetts Institute of Technology, MIT Libraries.
- RAMÍREZ-MACÍAS, J.A., BRONGERS, P., RÚA, S., VÁSQUEZ, R.E. (2016). Hydrodynamic modelling for the remotely operated vehicle Visor3 using CFD. *IFAC-PapersOnLine* 49-23, 187-192.
- SATRIA, D., WIRYADINATA, R., ESISWITOYO, D.P.A., ADJI, M.I., ROSYADI, I., LISTIJORINI, E., SUNARDI. (2019). Hydrodynamic analysis of Remotely Operated Vehicle (ROV) observation class using CFD. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 645, 012014.
- SIMAO, M., MORA-RODRÍGUEZ, J., RAMOS, H.M. (2016). Computational dynamic models and experiments in the fluid-structure interaction of pipe systems. *Canadian Journal of Civil Engineering* 43(1), 60-72.
- TORRES-PARISH, R. (2017). Comparación de resultados de análisis en CFD entre el Módulo FloEFD de CATIA V5 y Fluent. Proyecto Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- TOSCANO-ANGULO, J.J. (2021). Simulación hidrodinámica y validación experimental de un vehículo submarino operado remotamente. Trabajo Fin de Máster, Máster Oficial en Ingeniería Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Huelva, España.
- VÉLEZ-BERMEJO, C. (2020). Modelación hidrodinámica de un vehículo submarino operado remotamente (ROV) usando CFD. Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería Mecánica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Huelva, España.
- WILCOX, D.C. (2006). Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc., (3ª edición), California, USA.
- WINCLER-GREZ, P. (2021). Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile.



# 05.

## Sistema fixo de monitorização de recursos marinhos

J. Parente Silva<sup>1,2\*</sup> | R. Veiga<sup>1,2</sup> | F. Zabel<sup>4</sup> | A. Silva<sup>1,2</sup> | J. Semião<sup>1,3\*</sup>

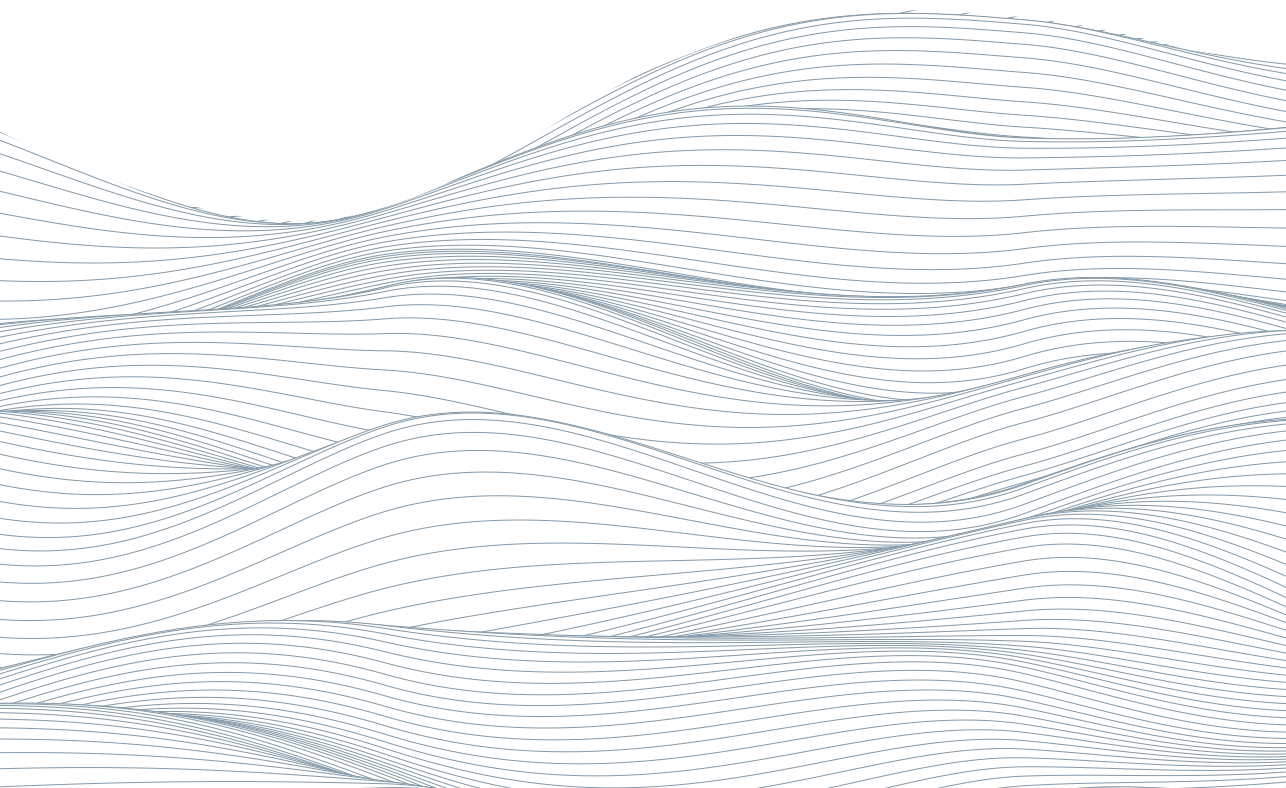
<sup>1</sup>Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, 8005-139 Faro, Portugal

<sup>2</sup>LaRSyS, Laboratório de Sistemas de Engenharia e Robótica, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>INESC-ID, Rua Alves Redol 9, 1000-029 Lisboa, Portugal

<sup>4</sup>MarSensing Lda., Centro Empresarial, B1, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal

\*E-mail: [jpparente@ualg.pt](mailto:jpparente@ualg.pt), [jsemiao@ualg.pt](mailto:jsemiao@ualg.pt)



## **Sumário:**

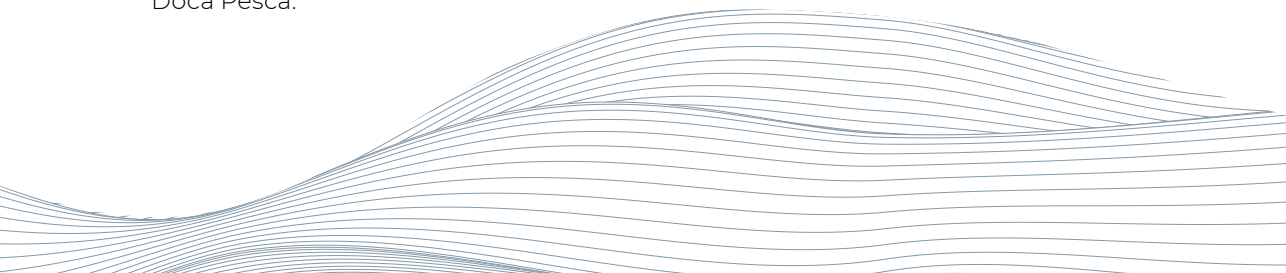
1. Introdução
2. Sistema
3. Estação de Terra
4. Estação de monitorização subaquática
5. Instalação
6. Conclusão
7. Bibliografia

## **Resumo**

Este capítulo é um resumo do trabalho que tem vindo a ser realizado na Universidade do Algarve sobre o desenvolvimento de um sistema fixo de monitorização dos recursos marinhos em tempo real, o qual se denominou de MARREAL. Apresenta-se na introdução um enquadramento do projeto, para estabelecer os principais objetivos com a construção do sistema, apresentando-se as principais tecnologias de monitorização de recursos, nomeadamente sistemas com bóias, tecnologias com acústica submarina, redes de sensores e sistema IoT utilizados para monitorização marinha, e sistemas com sonares e câmaras, para aumentar a eficiência da monitorização. Depois, apresenta-se todo o sistema desenvolvido, com as várias tecnologias previamente estudadas e consideradas como as principais para serem implementadas num sistema de monitorização de recursos marinhos adequado às necessidades atuais, assim como a apresentação da instalação do mesmo ao largo de Sagres, na Doca Pesca.

## **Resumen**

Este capítulo se constituye como una exposición resumida del trabajo que se ha llevado a cabo en la Universidad del Algarve sobre el desarrollo de un sistema fijo de seguimiento de los recursos marinos en tiempo real, al que se ha denominado MARREAL. En la introducción se presenta un marco para el proyecto, para establecer los objetivos principales con la construcción del sistema, presentando las principales tecnologías para monitorear recursos, a saber, sistemas con boyas, tecnologías con acústica subacuática, redes de sensores y sistema IoT utilizado para monitoreo marino, y sistemas de cámara y sonar, para aumentar la eficiencia del monitoreo. A continuación, se presenta todo el sistema desarrollado, con las distintas tecnologías previamente estudiadas y consideradas como las principales a implementar en un sistema de seguimiento de los recursos marinos adecuado a las necesidades actuales, así como la presentación de la instalación del mismo frente a Sagres, en Doca Pesca.



## 1. Introdução

### Sistema fixo de monitorização de recursos marinhos

Vivemos atualmente na era da implementação da Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0 (Bassi, 2017). A Primeira Revolução Industrial é geralmente considerada com o aparecimento da máquina a vapor, que se traduziu com o início da indústria; a Segunda Revolução Industrial é geralmente vista como a aplicação de eletricidade para criar produção em massa, especialmente na então nova indústria automóvel; a Terceira Revolução Industrial está geralmente associada ao uso extensivo de eletrónica e tecnologia da informação para automatizar a produção. Por fim, a quarta revolução industrial, ou o conceito de Indústria 4.0, não se baseia numa revolução técnica associada a uma descoberta científica (Rüttimann, 2016). No entanto, as mudanças são grandes e evidentes, estando associadas a uma indústria mais inteligente. Este novo conceito de indústria inteligente recorre a pressupostos diferentes e variados, nomeadamente a utilização da internet, das tecnologias de informação, flexibilidade de produção, virtualização de processos, otimização de processos, eficiência, etc. Conceitos novos como IoT (Internet of Things, ou Internet das Coisas) e IIOT (Industrial Internet of Things, ou Internet das Coisas Industrial), associados às tecnologias de informação, comunicação e eletrónica, estão a revolucionar a forma como se produz e até como se interage com os clientes, promovendo muitas trocas de informação e de dados entre todos os intervenientes, quer sejam máquinas ou pessoas, e fazendo com que as máquinas tenham “inteligência” para tomar algumas decisões sozinhas, pela análise da informação disponível (que é cada vez maior).

Até a pesca, uma atividade bem antiga de um sector primário, está a ser revolucionada pela utilização de tecnologia, alterando-se a forma como se pesca e como se gerem os recursos marinhos. Para as empresas da área, como em qualquer atividade comercial, o lucro e a rentabilidade são duas das principais prioridades. Não é nova a utilização de tecnologia para aumentar a rentabilidade na pesca. Por exemplo, como o atum é um alimento muito popular em todo o mundo e tem um preço e uma rentabilidade elevada, a

utilização de helicópteros para ajudar na sua pesca é um negócio rentável para os atuneiros comerciais, que utilizam helicópteros tripulados para encontrar peixes rapidamente e reduzir o uso de combustível (<https://justhelicopters.com/Articles-and-News/Community-Articles/Article/104699/Lets-Go-Fishing-Tuna-Boat-Ops>). Os helicópteros são extremamente úteis para detetar o atum, pois estes peixes, por serem grandes e por se reunirem em grandes cardumes para caçar presas menores, são facilmente vistos pelo ar. O piloto e um observador aproveitam a velocidade e altitude do helicóptero para localizar sinais de cardumes de atum, usando vários métodos para encontrar pistas sobre a localização dos cardumes de atum. É de notar que 90% da captura mundial de atum é capturada por 2% da frota pesqueira do mundo, utilizando helicópteros (Collins et al., 2017).

Contudo, os helicópteros são caros, perigosos e são acessíveis apenas aos maiores navios e empresas de pesca no mar. Neste domínio, a utilização de drones com câmaras e a transmissão de informação para o barco, assim como redes de sensores e a IoT, podem ser uma oportunidade para reduzir custos e tornar a pesca mais rentável, eficiente e acessível. Na realidade, estas soluções também já estão a ser estudadas, como é referido em Collins et al. (2017).

Porém, a pesca agressiva tem feito diminuir a quantidade de stock de muitas espécies, sendo que os governos têm tentado regular o sector pela introdução de legislação restritiva sobre a forma de pescar e sobre as quotas de pesca. Por exemplo, a Indian Ocean Tuna Commission (IOTC) estabeleceu na resolução 16/08 (*"On the prohibition of the use of aircrafts and unmanned aerial vehicles as fishing aids"*) que não devem ser utilizados helicópteros ou drones na captura de atum no índico. Outro exemplo é a redução constante das quotas da pesca de sardinha na península ibérica, para tentar reestabelecer o stock de sardinha na costa ibérica. Aliás, a nível da península Ibérica, várias são as espécies de peixes cujas quotas têm diminuído por imposição da união europeia.

Assim, a revolução tecnológica no sector da pesca que virá com a quarta revolução industrial não deverá focar-se num aumento da quantidade de peixe a pescar, mas sim na promoção de uma pesca mais sustentável, na melhoria da eficiência na pesca e na acessibilidade das atividades do sector a um maior número de empresas (e não apenas às grandes empresas do sector). De entre estes tópicos, o grande foco que pretendemos ter com este capítulo é na promoção de uma pesca sustentável, pelo desenvolvimento de ferramentas que ajudem a promover um maior controlo e monitorização dos stocks de peixe na costa. Por outro lado, estas tecnologias poderão

também ser utilizadas em pisciculturas, para reduzir custos de produção e melhorar a qualidade do produto.

Neste capítulo pretende-se abordar as tecnologias envolvidas em sistemas fixos para monitorização de recursos marinhos, e apresentar o sistema de monitorização dos recursos marinhos desenvolvido utilizando algumas dessas tecnologias.

Relativamente às tecnologias envolvidas para monitorização dos recursos marinhos, muita investigação já tem sido feita sobre boias, sistemas com acústica submarina, sonares e sensores diversos que permitam recolher dados sobre os peixes e o seu habitat.

A utilização de boias para monitorização oceanográfica, uma abordagem típica da oceanografia física, tornou-se um objetivo importante nas últimas décadas. Quando comparada com os barcos oceanográficos, que oferecem alta resolução espacial na amostragem, esta metodologia oferece a possibilidade de adquirir séries temporais de alta resolução em um único local. Embora os ancoradouros subaquáticos tradicionais tenham o mesmo objetivo, os sistemas autónomos de boias de superfície com fontes de energia renováveis têm duas vantagens principais: a) a possibilidade de usar telemetria (e, portanto, monitorização de dados em tempo real) a um custo relativamente baixo; e b) a possibilidade de obtenção de medições em série por longos períodos de tempo.

Os sistemas de aquisição em tempo real permitem que variáveis importantes sejam monitorizadas nos locais onde a boia está atracada e, portanto, permitem a deteção em tempo real de falhas e eventos nos dados, assim como uma resposta imediata. Esta aplicação é altamente útil em áreas de recolha de mariscos ou culturas marinhas para detetar eventos em variáveis-chave como a salinidade e a temperatura. Um protocolo de ação de emergência pode também ser acionado em resposta a esses eventos, a fim de minimizar o seu impacto. Esses sistemas também são muito úteis em áreas de intenso tráfego marítimo, pois fornecem medições em tempo real das correntes e da direção do vento, facilitando uma resposta rápida e eficaz em casos de derramamento, por exemplo. As Rias (Ria Formosa, Galiza, etc.) são um exemplo claro dessas duas situações, pois as culturas marinhas coexistem com as principais atividades portuárias, sendo muito importantes para a economia local. Além disso, a aquisição de dados por longos períodos temporais permite caracterizar a climatologia oceanográfica na área. Este, que é um aspecto importante em si, também é uma ferramenta fundamental para determinar o status ambiental das áreas costeiras. Por último, mas não menos importante, essas estruturas

forneçam observações para o desenvolvimento e aprimoramento de modelos preditivos para a área.

Já foram publicados um grande número de estudos baseados em dados de bóias (por exemplo, Ishizaka et al., 1993; Sengupta et al., 2002; Ruti et al., 2008; Hosoda et al., 2010) e uma grande quantidade de trabalho já foi realizado no desenvolvimento desses sistemas. Inclusivamente, há até alguns trabalhos que descrevem o projeto completo de estação de monitorização para aquisição de dados oceanográficos em tempo real, incluindo a eletrônica e o software, apresentando exemplos de diferentes condições de ancoragem, como em González et al. (2012).

Muita da tecnologia existente já é disponibilizada pelos principais construtores de boias. Um exemplo é a empresa OSIL (*Ocean Scientific International Ltd*) (<https://osil.com/product-category/data-buoy-systems/data-buoys/>), que são especialistas em monitorização ambiental global e produzem soluções de monitorização para aplicações aquáticas. Os dados em tempo real destes sistemas de monitorização podem ser transmitidos via GSM, rádio UHF e satélite para uma estação base e podem ser exibidos on-line usando o serviço OSIL de dados para web, ou podem ainda ser integrados aos sistemas de computadores do próprio cliente, oferecendo aos usuários uma variedade de opções, incluindo alertas de e-mail e texto, alarmes sonoros ou indicadores visuais, como luzes piscando. Os sistemas também podem ser equipados com sensores adicionais, dependendo dos requisitos do cliente.

Assim, no estado atual da evolução técnica no desenvolvimento de boias, o problema já não está na impossibilidade de medir ou monitorizar algum parâmetro, mas na escolha certa da tecnologia para determinada aplicação, e na interpretação e utilização da informação e dos dados disponíveis. Por exemplo, a utilização de câmaras em conjunto com sonares nestes sistemas de boias fixas, poderá trazer muitos benefícios para uma monitorização prolongada no tempo, como apresentado em Wolff and Badri-Hoeher (2014). E se as imagens captadas pelo sonar e câmara forem tratadas com algoritmos de visão computacional que permitam identificar automaticamente os peixes, introduziremos alguma inteligência à tecnologia já disponível que facilitará muito a monitorização dos recursos marinhos.

As abordagens acústicas passivas (monitorizando os peixes produtores de som com hidrofones) mostram que existem grandes possibilidades para a recolha de dados de maneira não invasiva e contínua. Vários trabalhos já existentes como em Luczkovich et al. (2008), mostram estudos anteriores

e contribuem com novas descobertas baseadas no conceito de acústica passiva, em que os sons produzidos pelos peixes são utilizados para identificar as espécies presentes e quantificar sua abundância relativa. Sabe-se que os peixes produzem sons de baixa frequência, especialmente os membros das famílias Sciaenidae, Gadidae, Ictaluridae, Cyprinidae, Batrachoididae, Haemulidae, Lutjanidae e Serranidae (Luczkovich et al., 2008).

Os métodos acústicos passivos incluem o uso de hidrofones de baixa frequência, gravadores digitais, sonobóias de gravação autónoma e registradores de dados e conjuntos de hidrofones rebocados para gravar sons de peixes. Os sons dos peixes que foram gravados até agora foram descritos em monografias, trabalhos científicos e bibliotecas digitais on-line; na maioria dos casos, as gravações são específicas para algumas espécies e podem ser utilizadas para identificar peixes. O trabalho de Investigação nesta área está progredindo no sentido de se poder utilizar esta abordagem de acústica passiva, juntamente com os métodos tradicionais de amostragem da pesca, para identificar o uso de habitat, áreas de desova e abundância relativa de peixes.

Tradicionalmente, os stocks de peixes nos oceanos são observados por amostragem aleatória com redes em navios de investigação (Kerr et al., 2013). Isso requer muito trabalho manual e tempo no navio, pois todos os peixes são separados por espécie e contados manualmente. Além disso, os cardumes frequentemente evitam o caminho dos barcos, como é referido em Misund and Aglen (1992), que influencia claramente as estatísticas dos peixes capturados. Outra grande desvantagem dos navios de investigação é que apenas uma escala de tempo muito limitada pode ser observada. Além disso, esse método é invasivo, porque os peixes precisam ser removidos de seu habitat natural. Spampinato et al. (2010) resolveram este problema com um sistema automático de classificação de peixes utilizando câmaras para rastrear e classificar peixes. Em Chu (2011) é fornecida uma visão geral sobre a utilização de sistemas de sonar na pesca e sua evolução nas últimas décadas.

Porém, em outros trabalhos mais recentes (Wolff and Badri-Hoeher, 2014), são apresentadas soluções híbridas que utilizam sistemas com câmara e sonar de imagem, para detecção e classificação de peixes. O foco está no componente acústico do sistema, que utiliza um sonar de feixe múltiplo (Urlick, 1983) com uma frequência central de 900 kHz para detecção de peixes. Outro exemplo semelhante é apresentado em Pham et al. (2012) e utilizado para experiências ex-situ para identificar peixes. Os autores mostram que em frequências de cerca de 1 MHz, as áreas de superfície dos peixes são melhores refletores do que a bexiga de natação, que é o refletor

mais importante de peixes até aos 200 kHz. Portanto, também peixes sem bexiga de natação podem ser detectados com estes sistemas de sonar de alta frequência. Para além disso, nestes sistemas o sonar é montado numa sonda fixa e recolhe dados por longos períodos de tempo para o estudo do comportamento dos peixes. Também se destina a acionar as câmaras para análises mais detalhadas, quando peixes são detectados na faixa de visibilidade das câmaras.

A utilização de sistemas como os apresentados atrás, que incluem sonares e câmaras, se forem utilizados em conjunto com sistemas de redes de sensores com o recurso a boias, pode constituir um importante desenvolvimento e aplicação para promover uma monitorização mais eficiente dos stocks de peixes e promover uma pesca sustentável.

## 2. Sistema

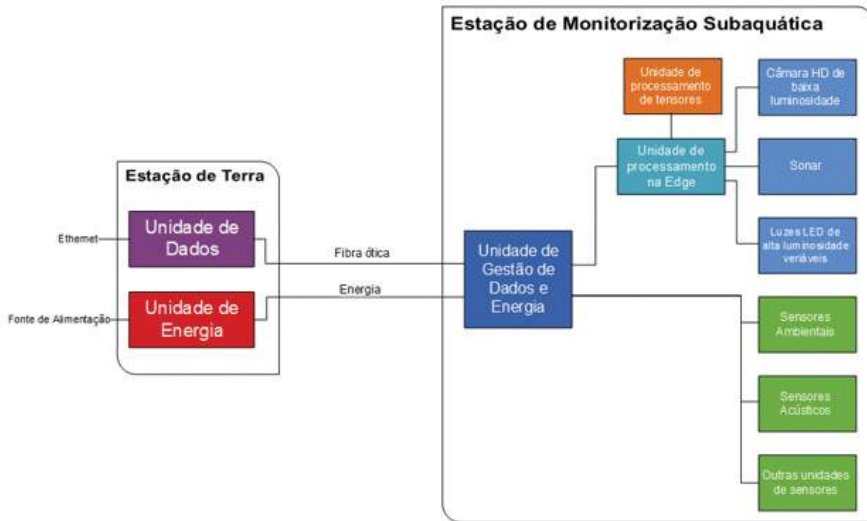
A implementação de um sistema fixo de monitorização dos recursos marinhos em tempo real tem como grande desafio juntar num único sistema várias tecnologias já existentes para que haja um maior aproveitamento de cada uma delas na observação dos oceanos para a sua sustentabilidade, nomeadamente no que toca aos recursos marinhos e pescas. Este sistema irá permitir fazer a monitorização dos recursos marinhos existentes na área (oceano ou piscicultura), para tal, para além das atividades de observação, pretende-se quantificar a presença ou não de peixes, bem como qualificar os peixes em termos de espécie e tamanho. Isto irá trazer uma enorme melhoria em termos de sustentabilidade das espécies e dos recursos marinhos, pelas possibilidades que oferece a nível de monitorização em tempo real do efeito de proteção de uma Área Marinha Protegida, da investigação científica a nível do estudo comportamental das espécies marinhas e da influência do ruído acústico e pela possibilidade de disponibilização de dados, da educação ambiental e do aumento da literacia oceânica com potenciais programas de ligação às escolas e de âmbito global e da informação a nível de recrutamento e composição dos recursos pesqueiros, potenciando uma maior eficiência da pesca e uma melhor gestão dos recursos existentes. Este trabalho não pretende ser só uma mais-valia para a investigação científica e a preservação das pescas, mas também uma forma de permitir ao público em geral, nomeadamente os jovens em idade escolar, interagir e aprender sobre o meio marinho.

O sistema fixo de monitorização dos recursos marinhos implementado irá estar diretamente ligado a terra por forma a haver uma monitorização do ambiente aquático em tempo real, o que irá permitir avaliar os recursos



marinhos durante largos períodos, recorrendo a diferentes meios de observação.

A figura 1 mostra a arquitetura do sistema, sendo este constituído por uma estação de terra ligada por cabo a uma estação remota de monitorização subaquática. A estação de terra terá uma unidade de fornecimento de energia responsável pelo fornecimento de energia à estação subaquática, e uma unidade de dados responsável pela assimilação, tratamento e fornecimento de dados em tempo real via ethernet. A estação de monitorização subaquática terá uma unidade de gestão e monitorização de energia e de gestão de dados, e diversas unidades de sensores. As duas estações irão estar ligadas através de um cabo com aproximadamente 1 km de comprimento, que é composto por cabos elétricos para fornecimento de energia, fibra ótica para transporte de dados, e malha entrançada de proteção mecânica.



**Figura 1.** Arquitetura do sistema

### 3. Estação de Terra

A estação de terra irá ser formada por uma unidade de energia responsável pelo fornecimento de energia à estação de monitorização subaquática, tendo para isso uma fonte de alimentação programável (*TDK-Lambda GEN 300-5*) de 1500W (300V/5A), ver figura 2. Para além dessa unidade, a estação de terra irá ter uma outra unidade de dados responsável pela conversão de Ethernet/fibra ótica, usando para isso o conversor da figura 3, bem como o tratamento de todas as informações recebidas em tempo real da estação subaquática e o fornecimento dessa informação aos utilizados via Ethernet.



**Figura 2.** Fonte de alimentação (TDK-LAMBDA GEN 300-5)

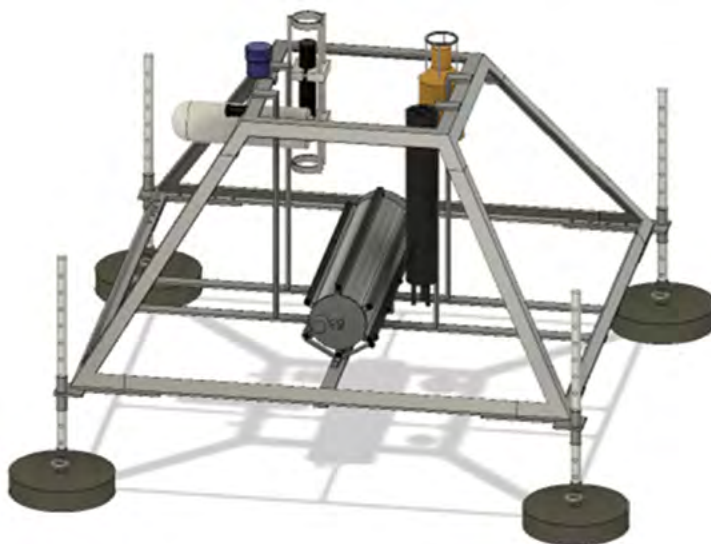


**Figura 3.** Conversor de fibra/ethernet 10/100BASE-TX – 100BASE-FX.

## 4. Estação de monitorização subaquática

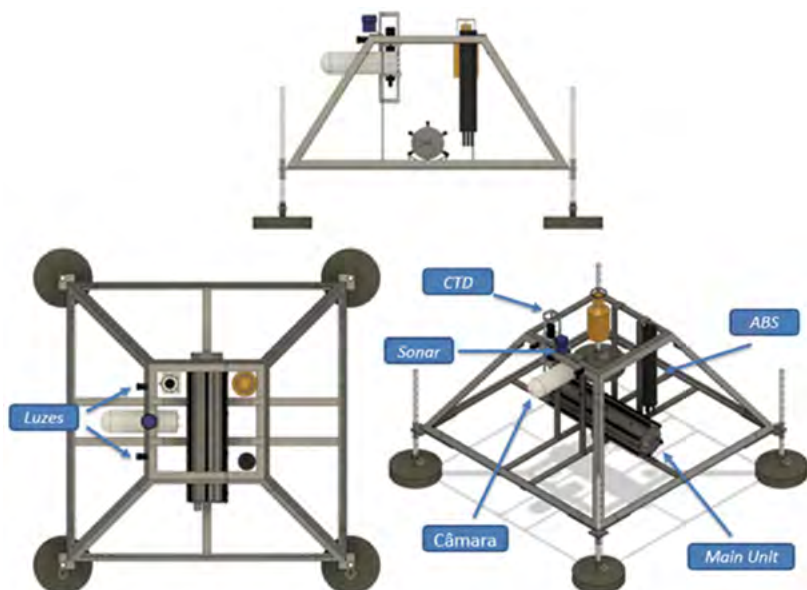
A estrutura da estação de monitorização subaquática foi desenvolvida usando barras de aço inoxidável 316, por forma a ser resistente à corrosão provocada pela água salgada dado que é uma estrutura para ser utilizada submersa durante um longo período de tempo. As dimensões da estrutura são de 140cm de lado na base e cerca de 50cm de lado no topo. Em relação à altura da estrutura é de aproximadamente 65cm, sendo a altura da estrutura ao fundo do mar ajustável através dos quatro pés. Um dos objetivos da possibilidade do ajuste desta altura é para ser possível adaptar-se a vários tipos de fundos do mar e turbidez da água, por forma a otimizar a gravação das imagens da câmara, uma vez que no caso de situações de fundo de areia com turbidez da água, a câmara estar muito próxima do

fundo pode originar uma má qualidade de imagem. Nas faces laterais da estrutura vão ser colocadas umas placas acrílicas por forma a proteger os equipamentos e as suas ligações elétricas de possíveis danos causados por objetos em suspensão na água transportados pela corrente ou até mesmo por algum outro organismo vivo.

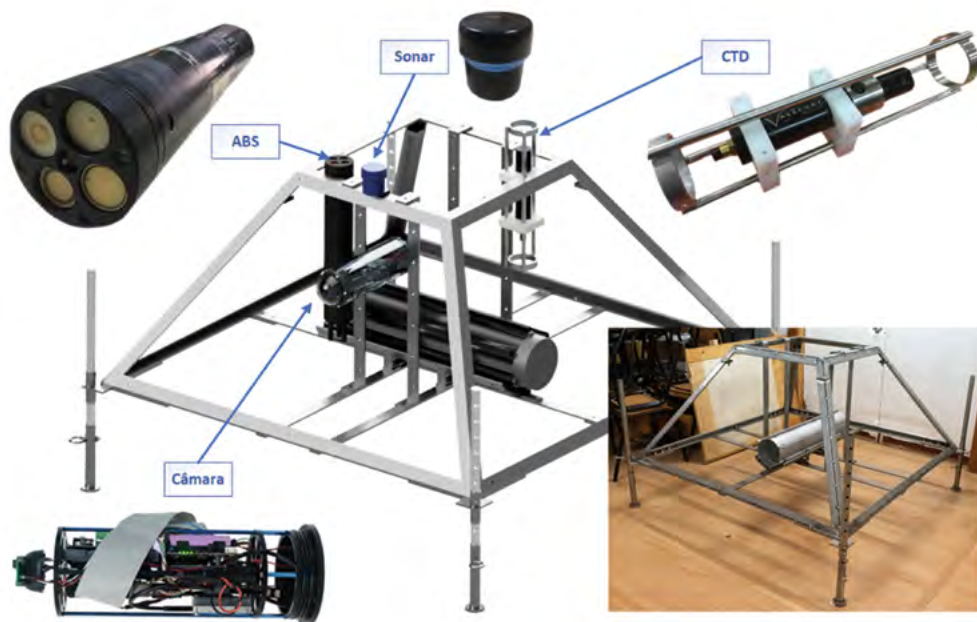


**Figura 4.** Estrutura da estação subaquática

Nas figuras 4, 5 e 6 é possível verificar-se a estrutura da estação subaquática com os vários equipamentos identificados; e nas figuras 7 e 8 podem-se verificar em fotos reais da estrutura os detalhes dos equipamentos instalados na estrutura. Os equipamentos estão fixados na estrutura através de peças produzidas em delrin por uma CNC (figuras 7 e 8). É de notar que os sensores acústicos, nomeadamente o array de hidrofones, não vai estar colocado na diretamente na estrutura da estação, vai estar fundeado mais ao largo da estrutura, tendo apenas o cabo de ligação ligado diretamente ao contentor principal da estrutura (*main unit*). Tal como se mostra nas figuras 5, 6, 7 e 8, o módulo da câmara vai estar colocada numa das faces laterais da estação, na mesma lateral que as luzes de iluminação com a finalidade de iluminar a área coberta pela câmara, bem como o sonar que estará colocado no topo dessa mesma lateral. Em relação aos restantes sensores ambientais estarão colocados nos cantos opostos da estrutura, com os sensores preferencialmente apontados para cima, e a unidade principal, responsável por toda a gestão de dados e energia do sistema, irá estar colocada no interior da estrutura na parte inferior.



**Figura 5.** Estrutura da estação subaquática com os vários equipamentos e sensores



**Figura 6.** Estrutura da estação subaquática com indicação dos equipamentos



**Figura 7.** Foto da estrutura da estação subaquática com os vários equipamentos

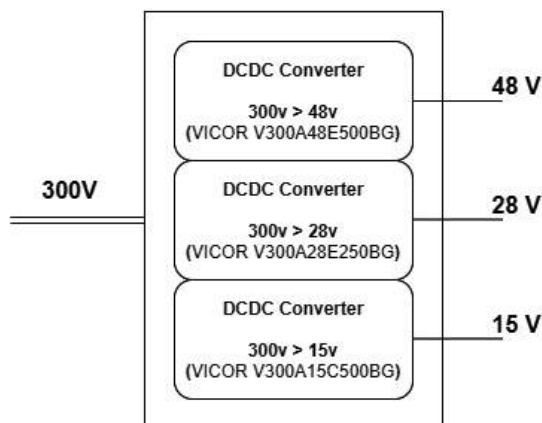


**Figura 8.** Foto da estrutura da estação subaquática com detalho dos equipamentos (face lateral da área da câmara/sonar)



## CONTENTOR PRINCIPAL

Tal como dito anteriormente, a estação subaquática será composta por uma unidade responsável pela gestão de dados e de energia do sistema. Esta unidade foi construída e implementada num contentor cilíndrico com cerca de 75 cm de comprimento e 16 cm de diâmetro, sendo aqui neste contentor que irá estar ligado o cabo de fibra ótica e de energia diretamente da estação de terra. Esta unidade principal está dividida em duas unidades, uma unidade de energia responsável pela distribuição por todos os sensores e equipamentos da energia proveniente da estação de terra, e por uma unidade de gestão e comunicação dos dados responsável pela transferência dos dados dos vários sensores até à estação de terra através de uma ligação de ethernet.

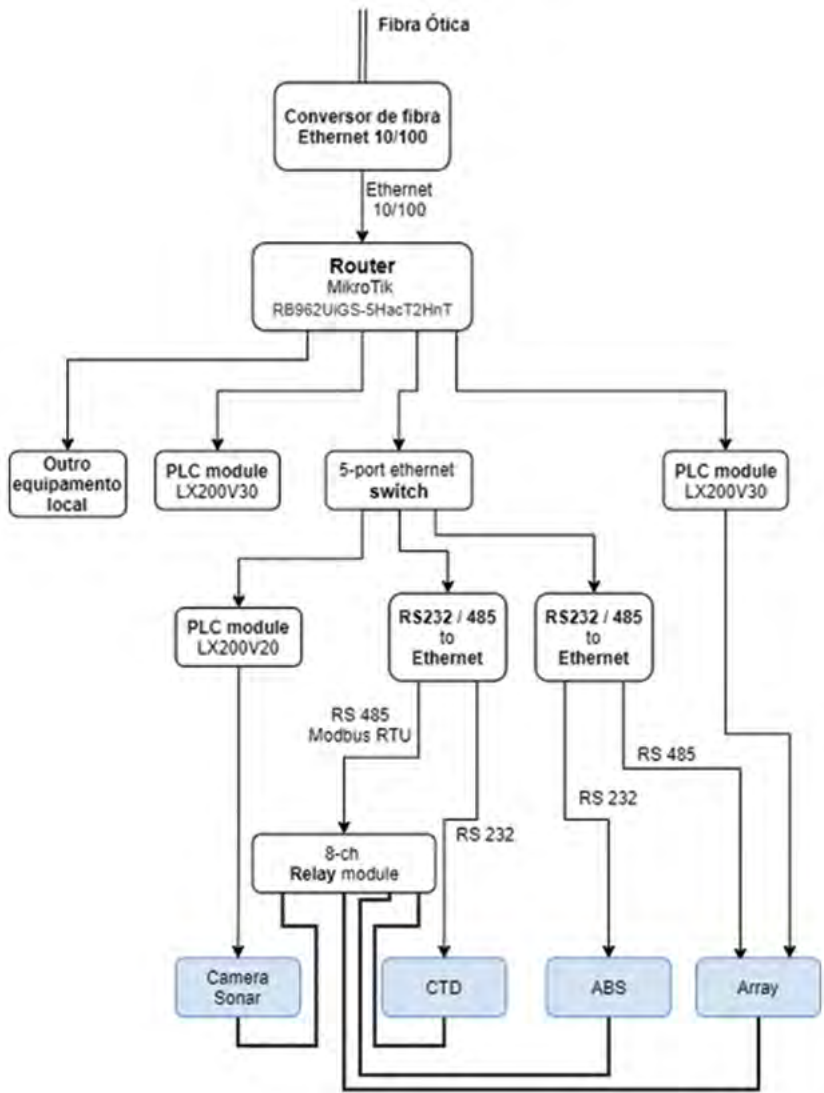


**Figura 9.** Unidade de energia

A unidade de energia é alimentada pelos 300 V provenientes da fonte de alimentação presente na estação de terra, que por sua vez são convertidos em 48 Vdc, 28 Vdc e 15 Vdc, sendo usados conversores DCDC de alta potência, tal como é mostrada na figura 4. Os circuitos de conversão e proteção foram colocados na tampa do contentor cilíndrico por forma a ser obtida uma dissipação de calor mais eficiente.

A unidade de gestão de dados, que é responsável pela comunicação e transferência de dados entre os vários sensores e a estação de terra via ethernet, tem um conversor de fibra / ethernet responsável pela conversão da fibra do cabo de ligação proveniente da estação de terra (10/100BASE-TX - 100BASE-FX). O router do sistema (192.168.120.253) é um *MikroTik*

*RB962UiGS-5HacT2HnT* que vai estar diretamente ligado a um *switch* TP-Link LS1005G com a finalidade de ligação dos vários sensores da estação.



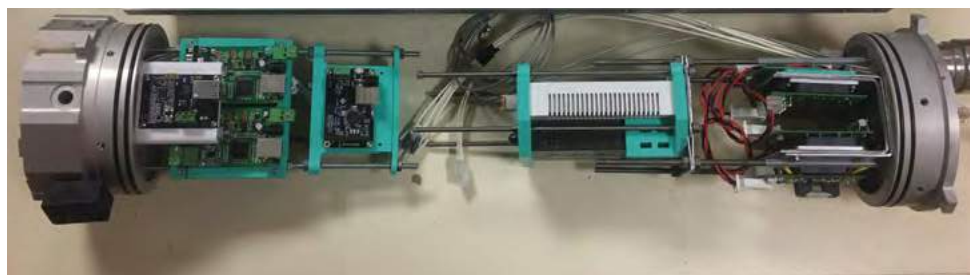
**Figura 10.** Esquema Geral da unidade de gestão de dados

Para a comunicação com os vários sensores foram utilizados conversores industriais de RS232/485 para Ethernet, sendo que um dos conversores também é responsável pela comunicação com um módulo de 8 relés com o intuito de ser feito o controlo dos vários equipamentos remotamente, sendo por isso possível fazer o reset remotamente a qualquer

um dos sensores. Estes conversores permitem a transmissão bidirecional e em simultâneo de dados entre RS232/485 e a porta ethernet RJ45 e podem ser configurados via web (192.168.120.121 e 192.168.120.122). Para uma mais eficiente e rápida comunicação com alguns dos sensores, são usados módulos PLC para aumentar a velocidade de transmissão.



**Figura 11.** Conversor de fibra e o router (esquerda), módulos PLC (centro) e conversores de RS232/485 para ethernet (direita).

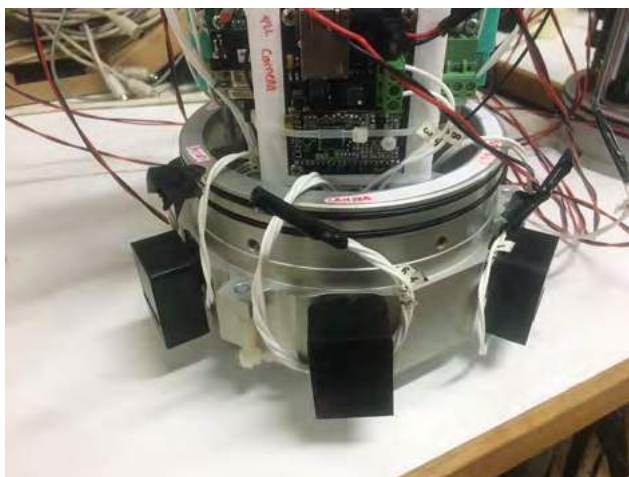


**Figura 12.** Vista geral do contentor principal

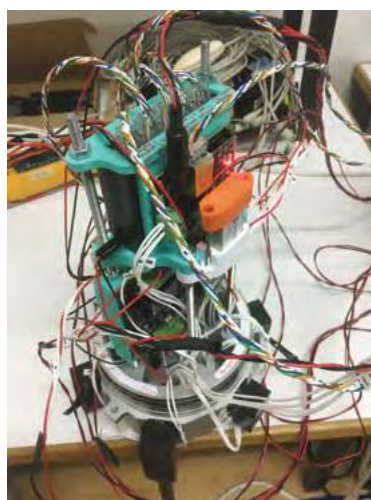
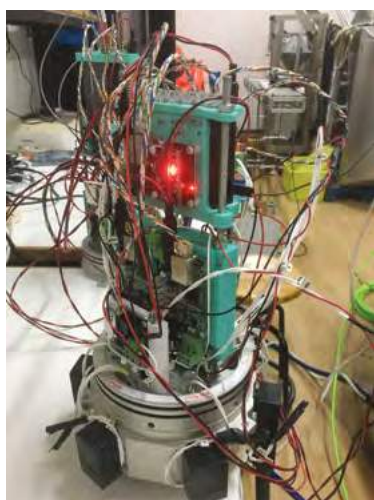
Na figura 12 é possível verificar-se a vista geral do contentor principal, à direita o conector do cabo de ligação de fibra ótica e energia, seguido do módulo de energia com os vários conversores DCDC fixados na tampa do contentor, depois o conversor de fibra e o router, e à esquerda os vários módulos PLC, o módulo de relés e switch de 5 portas fixados diretamente à outra tampa do contentor. Nessa mesma tampa, é onde estão colocados os conectores subaquáticos da SubConn MacArtney, figura 13. Nesses



conectores é onde vão estar ligados os vários sensores da estação de monitorização subaquática, sendo que estão dimensionados conectores de reserva para ser possível no futuro adicionar mais sensores à estação. Na figura 14 é possível verificar todas as ligações do contentor principal no primeiro teste de configuração dos vários equipamentos. Por fim, na figura 15 apresentam-se fotos do conteúdo total do contentor principal, com a indicação dos principais módulos já descritos.



**Figura 13.** Tampa do contentor principal com as fichas subaquáticas



**Figura 14.** Vista geral das ligações do contentor principal durante primeiro teste realizado

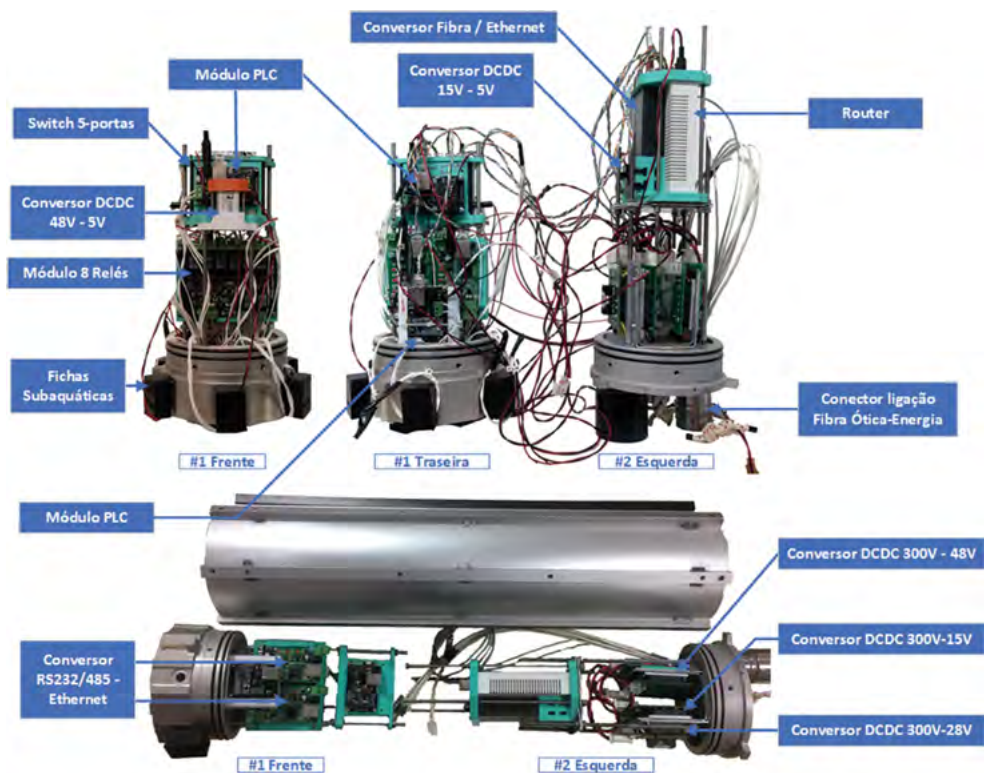


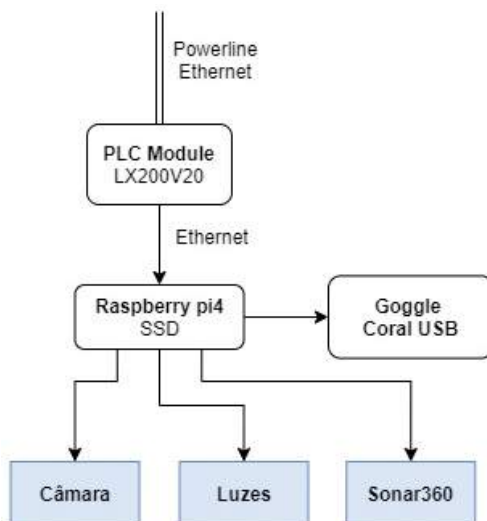
Figura 15. O contêiner principal

## CÂMARA E SONAR

Em termos de processamento local, ou processamento na *Edge*, adaptamos a configuração base do contêiner do veículo controlado remotamente subaquático *BlueROV2*, da *BlueRobotics*. A unidade de processamento e controlo central foi atualizada de uma *Raspberry Pi 3* para uma *Raspberry Pi 4*, sendo o principal ponto pertinente da atualização a existência de portas *USB3.0*.

Visto que a instalação da estação de monitorização subaquática será fixa, com um objetivo de funcionamento de longa-duração sem previsão de necessidade de substituição e, se necessário, baixa manutenção, foi necessário garantir que o funcionamento do processamento local se mantivesse constante e viável. Um dos principais limites na utilização de unidades de processamento e controlo como as *Raspberry Pi*, é a utilização de cartões *MicroSD* para funcionamento do sistema operativo, programas, e por vezes, armazenamento. Considerando que a principal funcionalidade

de um cartão *MicroSD* é o armazenamento em escrita e leitura de dados estáticos (fotos, vídeos, etc...) o uso do mesmo para aplicações a longo-prazo torna-se imprudente. Desta forma, ao atualizarmos para uma versão mais recente da *Raspberry Pi*, conseguimos usufruir da possibilidade de utilizar um disco de estado sólido (*SSD*) para funcionamento do sistema operativo, programas, e armazenamento de *buffer*.

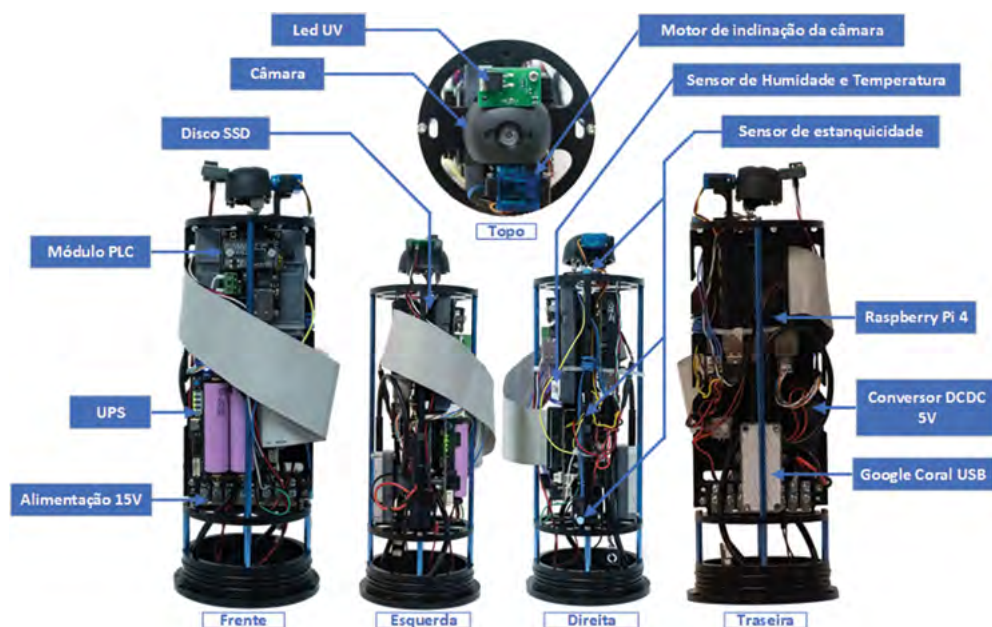


**Figura 16.** Esquema de ligação do módulo da câmara e sonar

No entanto, a transição para uma nova versão da *Raspberry Pi* deve-se também à necessidade da largura de banda das portas USB3.0 para um funcionamento em pleno de ambas as unidades de processamentos de tensores (*TPU*) presentes no *Google Coral USB*. Este módulo é essencial ao processamento na *Edge* do modelo de deteção de espécies marítimas da fauna local. O processamento adicional também facilita a utilização dos algoritmos de processamento e preparação dos dados provenientes dos diferentes sensores: câmara, luzes e sonar.



**Figura 17.** Foto do contentor da câmara da bluerobotics e as respetivas luzes de iluminação



**Figura 18.** Esquema da montagem do contentor da câmara com os vários sensores e módulos

A unidade da câmara, em conjunto com o motor que permite as operações de inclinação da câmara, mantêm-se as mesmas. A câmara disponibilizada pela *BlueRobotics* é baseada num sensor *Sony IMX322* que permite um bom funcionamento a baixa luminosidade. As luzes são controladas diretamente pela *Raspberry Pi* através de modulações de comprimento de fase (*PWM*), sendo as mesmas controladas internamente na *Edge* por algoritmos que medem as condições local em tempo-real. O sonar (Figura 19) é controlado também diretamente pela *Raspberry Pi*, funcionando em conjunto com a unidade da câmara. Dado que o sonar consegue alcançar maiores distâncias e permitir uma medição mais fiável do comprimento de espécies marítimas isoladas, quando correlacionado com as informações obtidas da câmara, é possível concluirmos com uma elevada precisão a caracterização biométrica de qualquer peixe que se apresente dentro da zona de operação.



**Figura 19.** Sonar Ping360

## SENSORES AMBIENTAIS

Por forma a aferir a qualidade ambiental do meio subaquático irão ser utilizados sensores ambientais para a medição de variáveis-chave importantes para ser feita a correlação com os outros dados provenientes dos restantes sensores.

O ABS (*Acoustic Backscatter System*) *AQUASCAT 1000s* é um equipamento constituído por 4 transdutores de altas frequências (0,5,1,2,4 MHz) que mede o nível da reflexão do sinal, isto é, são emitidos sinais de alta frequência e os transdutores recebem os sinais refletidos de volta, de acordo com os níveis dos sinais recebidos é possível estimar o nível de reflexão através do nível de atenuação dos mesmos. Este pode ser utilizado por exemplo para registar a presença de sedimentos na coluna de água, sendo também possível registar a altura de água se for colocado com os transdutores apontados para o topo, pois vai haver uma reflexão na superfície da água.



**Figura 20.** Acoustic backscatter system (aquatec aquascats 1000s)

O *CTD Valeport miniCTD DR* é uma sonda multiparamétrica que mede parâmetros como a condutividade, temperatura e pressão, sendo possível



a partir desses valores determinar outros valores como os da salinidade e da profundidade. Os peixes são animais de sangue frio que regulam a sua temperatura corporal diretamente através do meio envolvente, por consequência, a temperatura é um dos vários parâmetros importantes que precisam ser monitorizados em tempo real.



**Figura 21.** Sonda multiparamétrica (Valeport miniCTD DR)

## SENSORES ACÚSTICOS

Os sensores acústicos são compostos por uma unidade que incluirá um conjunto de quatro hidrofones e um sensor de velocidade de partículas. A disposição dos sensores vai ser semelhante ao exemplo apresentado na figura 22, isto é, o array formado pelos 4 hidrofones terá uma forma de um “X”, sendo os hidrofones colocados nas extremidades e no centro o sensor de velocidade de partículas (*vector sensor*). Os hidrofones são equipamentos que medem a pressão acústica, enquanto um *vector sensor* para além de medir a pressão acústica, mede também a velocidade das partículas, ou seja, com um sensor de velocidade de partículas é possível aferir a direcção dos sinais recebidos.

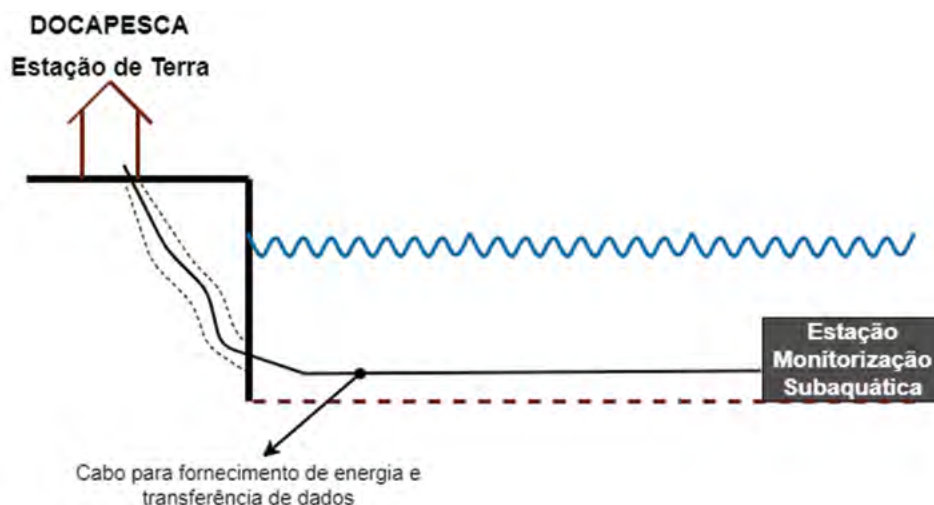
Este sistema acústico estará ligado diretamente à unidade principal da estação subaquática para se fazer o *streaming* dos dados acústicos em tempo real e terá uma banda acústica de até 50kHz para que com este conjunto de sensores se possa amostrar o ambiente acústico marinho em termos do ruído antropogénico (embarcações, construção, etc) e do ruído natural que poderá ter origem biológica (cetáceos, peixes, etc), físicas (ondas, atmosfera, etc) e geofísicas (terramotos, etc).



**Figura 22.** Array com 4 hidrofones e 1 vector sensor

## 5. Instalação

O sistema de monitorização de recursos marinhos vai ser instalado ao largo de Sagres, na Doca Pesca de Sagres, sendo que a zona de observação do ambiente marinho será perto das ilhotas do Martinhal. A estação de terra vai estar instalada nas instalações secas da Doca Pesca de Sagres e o cabo de energia e fibra ótica, de cerca de 1km de comprimento, vai ser colocado ao longo do quebra-mar até à zona da instalação da estrutura da estação subaquática, tal como é representado na figura 23.



**Figura 23.** Esboço da instalação do sistema



**Figura 24.** Fotos de visita às instalações da doca pesca em sagres (ao fundo as ilhotas do martinhal).

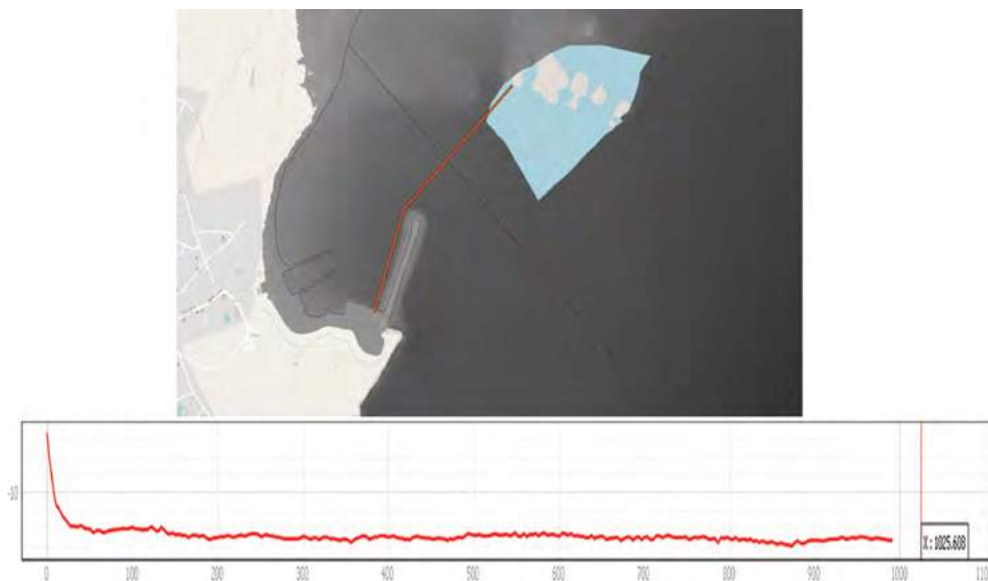


**Figura 25.** Mapa da localização da zona da instalação do sistema em Sagres.



A localização exata e a direção da estrutura da estação de monitorização subaquática é representada na figura 25, onde é possível verificar-se que a ideia é colocar a face lateral da estrutura com a câmara, sonar e luzes apontadas diretamente para a zona rochosa das ilhotas do Martinhal, uma vez que é uma zona onde a quantidade de peixes é maior. Nessa mesma figura é ainda possível verificar-se assinalado por um “X” vermelho, o local aproximado onde vai ser colocado os sensores acústicos, *array* de 4 hidrofones e 1 *vector sensor*, ligeiramente mais afastado cerca de 100m da zona da estação subaquática.

A localização para a colocação da estrutura subaquática dista de aproximadamente 1000m das instalações da Doca Pesca de Sagres e tem uma profundidade de cerca de 17m, como se pode verificar na figura 26. A batimetria do fundo varia de forma harmoniosa entre as duas estações o que é uma vantagem para a passagem do cabo electro/ótico mostrado na figura 27.



**Figura 26.** Esboço da colocação do cabo da estação de terra à estação subaquática



**Figura 27.** Cabo de ligação de fibra ótica e energia

## 6. Conclusão

Neste trabalho capítulo foi apresentado o hardware do sistema MARREAL, um sistema fixo de monitorização dos recursos marinhos em tempo real, desenvolvido na Universidade do Algarve no âmbito do projecto KTTSeaDrones. Sendo um sistema para monitorização, inclui diversas tecnologias que permitem reunir, num único sistema, as ferramentas necessárias para analisar e monitorizar parâmetros ambientais, acústicos e visuais. A existência de um Sonar permite detetar a presença de peixes nas proximidades; essa deteção permitirá ativar a iluminação e a câmara para filmar na proximidade, que por sua vez permite iniciar o sistema de inteligência artificial para deteção automática de peixes (número de peixes e espécie). Os sensores ambientais permitem detetar valores como condutividade, temperatura e pressão, sendo possível estimar a salinidade e profundidade. Os sensores acústicos permitem detetar a direção dos sinais recebidos que provocaram o ruído acústico. Em suma, o sistema que estará ligado a terra por cabo, permitirá monitorizar o ambiente marinho do local de instalação (neste caso, Sagres – Portugal) em tempo real e com visualização de toda a informação online.

Para futuro, pretende-se utilizar a informação recolhida pelo sistema MARREAL para: (1) melhorar o conhecimento sobre as espécies de peixes que habitam a costa do Algarve, para analisar e estudar a sustentabilidade da sua pesca; (2) permitir a visualização do fundo do mar e dos seus recursos em tempo real, com fins educacionais.

## 7. Bibliografia

- BASSI, L. (2017). Industry 4.0: Hope, hype or revolution?. IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), Modena, Italy, 11-13 Sept. 2017.
- CHU, D. (2011). Technology evolution and advances in fisheries acoustics. *Journal of Marine Science and Technology* 19(3), 245–252.
- COLLINS, G., TWINING, D., WELLS, J. (2017). Using vessel-based drones to aid commercial fishing operations. OCEANS 2017 – Aberdeen, 19-22 June 2017.
- CONZÁLEZ, J., HERRERA, J.L., ALBERTO VARELA, R. (2012). A design proposal of real-time monitoring stations: implementation and performance in contrasting environmental conditions. *Scientia Marina* 76(S1), 235-248.
- HOSODA, S., OHIRA, T., SATO, K., SUGA, T. (2010). Improved Description of Global Mixed-Layer Depth Using Argo Profiling Floats. *Journal of Oceanography* 66, 773-787.
- ISHIZAKA, J., ASANUMA, I., EBUCHI, N., FUKUSHIMA, H., KAWAMURA, H., KAWASAKI, K., KISHINO, M., KUBOTA, M., MASUKO, H., MATSUMURA, S., SAITOH, S., SENGU, Y., SHIMANUKI, M., TOMII, N., UTASHIMA, M. (1997). Time Series of Physical and Optical Parameters off Shimane, Japan, during Fall of 1993: First Observation by Moored Optical Buoy System for ADEOS Data Verification. *Journal of Oceanography* 53, 245-258.
- KERR, L.A., CADRIN, S.X., FRIEDLAND, K.D., MARIANI, S., WALDMAN, J.R. (2013). Stock Identification Methods: Applications in Fishery Science, 2nd ed. Academic Press, 2013.
- LUCZKOVICH, J.J., MANN, D.A., ROUNTREE, R.A. (2008). Passive Acoustics as a Tool in Fisheries Science. *Transactions of the American Fisheries Society* 137, 533–541.
- MISUND, O.A., AGLEN, A. (1992). Swimming behaviour of fish schools in the North Sea during acoustic surveying and pelagic trawl sampling. *ICES Journal of Marine Science* 49(3), 325–334.
- PHAM, A.H., LUNDGREN, B., STAGE, B., JENSEN, J. (2012). Ultrasound backscatter from free-swimming fish at 1 MHz for fish identification. In: Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International, Oct 2012, pp. 1477–1480.

- RUTI, P.M., MARULLO, S., D'ORTENZIO, F., TREMANT, M. (2008). Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: Analyses, QuikSCAT and buoy data. *Journal of Marine Systems* 70, 33-48.
- RÜTTIMANN, B.G. (2016). Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? *Journal of Service Science and Management* 9(6), 485-500.
- SENGUPTA, D., KUMAR, R.P., BHAT, G.S. (2002). Spring Warming of the Eastern Arabian Sea and Bay of Bengal from Buoy Data. *Geophysical Research Letters* 29, 24.
- SPAMPINATO, C., GIORDANO, D., DI SALVO, R., CHEN-BURGER, Y.H.J, FISHER, R.B., NADARAJAN, G. (2010). Automatic fish classification for underwater species behavior understanding. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Analysis and Retrieval of Tracked Events and Motion in Imagery Streams*, ser. ARTEMIS '10. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 45–50.
- URICK, R.J. (1983). *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1983.
- WOLFF, L.M., BADRI-HOEHER, S. (2014). Imaging sonar-based fish detection in shallow waters. *IEEE conference Oceans 2014 - St. John's*, 14-19 Sept. 2014.

# 06.

## Sistema automático para a deteção de peixes em mar aberto

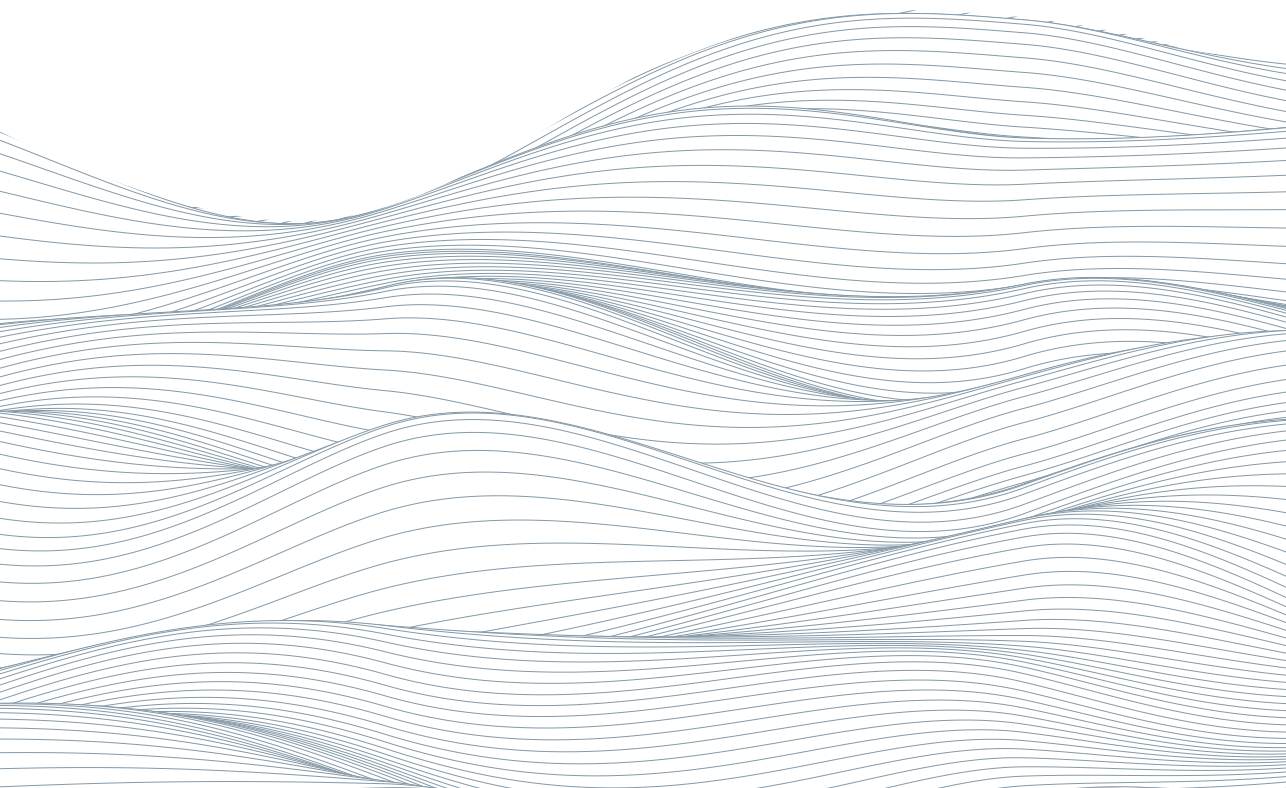
R. Veiga<sup>1,2\*</sup> | J. Parente Silva<sup>1,2</sup> | J.M.F. Rodrigues<sup>1,2</sup> | J. Semião<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, 8005-139 Faro, Portugal

<sup>2</sup>LaRSyS, Laboratório de Sistemas de Engenharia e Robótica, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>INESC-ID, Rua Alves Redol 9, 1000-029 Lisboa, Portugal

\*E-mail: [rjveiga@ualg.pt](mailto:rjveiga@ualg.pt), [jsemiao@ualg.pt](mailto:jsemiao@ualg.pt)



## Sumário:

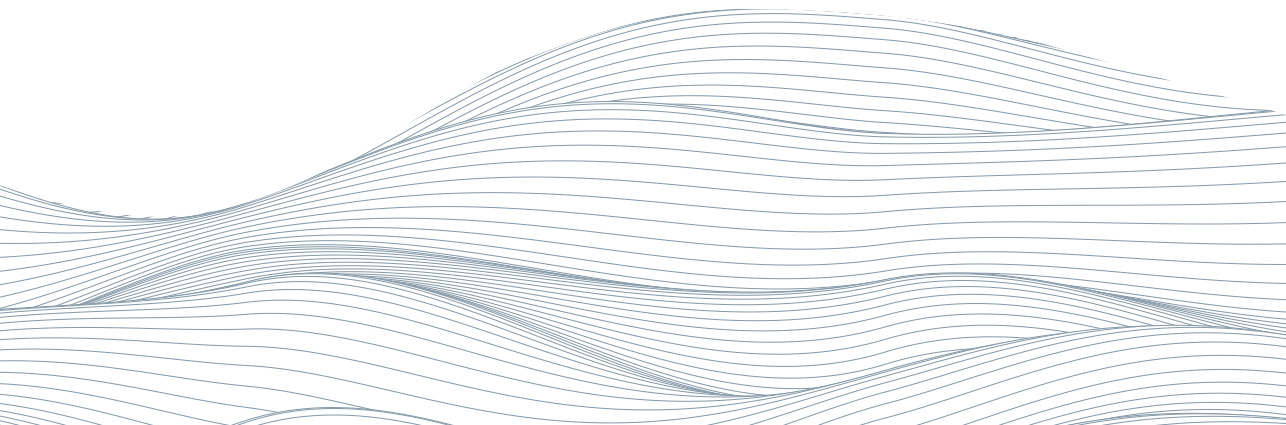
1. Introdução
2. Estado de arte
3. Dados
4. Método
5. Resultados
6. Conclusão
7. Referências

## Resumo

A complexidade da monitorização subaquática, através do uso de redes neuronais, varia conforme a sua localização e as condições envolventes. Isto origina uma necessidade de gerar conjuntos de dados anotados únicos para cada zona, o que se torna numa tarefa recorrente. Este problema foi abordado tendo em consideração a natureza estática das estações de monitorização subaquática, recorrendo às informações temporais dos objetos detetados ao longo de vídeos. O nosso método focou-se na costa de Portugal — Algarve, com a tarefa de deteção a alcançar uma precisão média de 93,11%, nos próprios dados, e 73,61% em imagens novas. Uma abordagem inicial da tarefa de classificação atingiu uma precisão de 91,01%, em relação aos próprios dados e de 83,59%, em imagens novas.

## Resumen

La complejidad del monitoreo submarino, mediante el uso de redes neuronales, varía según su ubicación y las condiciones del entorno. Esto crea la necesidad de generar conjuntos de datos anotados únicos para cada zona, lo que lo convierte en una tarea recurrente. Abordamos este problema, considerando la naturaleza estática de las estaciones de monitoreo submarino, utilizando la información temporal de los objetos detectados a través de los videos. Nuestro método se centró en la costa de Portugal — Algarve, con la tarea de detección para lograr una precisión media del 93,11%, en los propios datos, y del 73,61% en nuevas imágenes. En una primera aproximación a la tarea de clasificación se consiguió una precisión del 91,01%, en relación con los propios datos, y del 83,59%, en nuevas imágenes.



## 1. Introdução

### Sistema automático para a deteção de peixes em mar aberto

A monitorização dos ambientes subaquáticos difere da dos ambientes de superfície, onde o espaço livre permite efetuar análises mais simples, podendo ser através do uso de satélites, ou localmente, através de dispositivos IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas).

Uma das monitorizações mais comuns efetuadas à nossa fauna marinha recorre à análise das espécies provenientes das redes de arrasto. Um outro método, menos invasivo, é a análise visual de uma área por um cientista através do uso de técnicas de mergulho. Com a evolução das câmaras e baterias, este método foi substituído por vídeos obtidos por dispositivos equipados com uma câmara e isca, designado por *Baited Remote Underwater Video* (BRUV). Os vídeos obtidos por este método necessitam de um processo de análise fastidioso, a produzir resultados variáveis diretamente correlacionados, ou ao especialista humano que interpreta os dados, ou pela qualidade dos vídeos obtidos. Existe, assim, uma necessidade de automatização e homogeneização deste processo.

O aparecimento das técnicas de machine learning (aprendizagem máquina) e *deep learning* (DL), em conjunto com *computer vision* (CV — visão computacional), permitiram a auto- matização do processo de monitorização através do uso de técnicas de reconhecimento de objetos, ou seja, deteção e classificação dos objetos em imagens.

No entanto, devido à variedade ambiental subaquática, os modelos treinados num local não conseguem generalizar-se eficazmente a uma nova zona ou fauna marinha. Isto apresenta um problema em termos de escalabilidade, tornando-se necessário a criação recorrente de um novo conjunto de dados personalizado para cada área distinta.

Um pormenor importante sobre as estações de monitorização subaquática é a sua instalação estática, permitindo limitar a variação de condições ambientais esperadas. É possível alcançar um desempenho

eficaz dos modelos treinados em imagens anotadas da ictiofauna, isto é, da fauna marinha local; no entanto, falham em termos de propagação da eficácia dos modelos ao longo das faixas costeiras.

Isto resulta em tarefas recorrentes sempre que é necessário efetuar a instalação de uma nova estação de monitorização subaquática, a associar a qualidade final das previsões à perícia e precisão das anotações.

Este artigo faz parte do projeto KTTSeaDrones, e foca-se no desafio da automação do processo necessário de anotação das imagens para o treino de modelos de deteção de peixes subaquáticos. Semelhante a Knausgård et al. (2021), a etapa de classificação é separada da deteção.

O projeto KTTSeaDrones visa a instalação de uma estação de monitorização subaquática para a geração de relatórios autónomos sobre a quantidade da ictiofauna e a presença de espécies invasoras. Está preparado para obter imagens em diversas condições, sejam ambientais ou de localização, hora do dia, luminosidade ou limitações técnicas.

É possível observar na Figura 1, um diagrama representativo das ligações destas estações subaquáticas. As estações estão equipadas com sensores ambientais, sonar, câmara de alta definição HD (*High Definition*) de baixa luminosidade e um dispositivo de processamento na Edge. Oferecem também a possibilidade de processamento na nuvem (*cloud*), local ou híbrido.

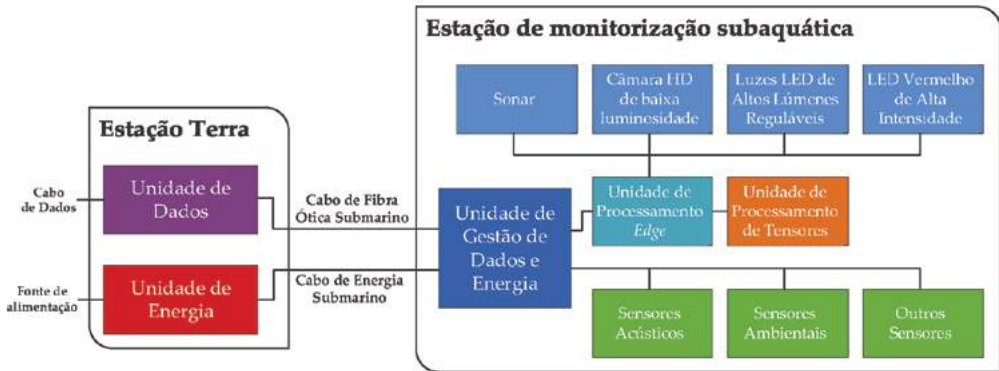
O método apresentado aborda a criação automática de conjuntos de dados personalizados para a deteção de objetos. Foi utilizada uma abordagem invertida, focada primeiro na aplicabilidade estática pretendida para estações de monitorização subaquática, permitindo que as anotações sejam pseudo-anotadas, adaptando-se facilmente a novos ambientes costeiros.

Com base na arquitetura YOLOv4 (Bochkowsky et al., 2020) para a tarefa de deteção de objetos, foi utilizado o conjunto de dados OzFish :<https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8> para a sua inicialização através da técnica de transferência de aprendizagem, seguido de um ciclo de aprendizagem auto-supervisionada para adaptação a filmagens subaquáticas locais.

## 2. Estado de arte

Dada a natureza diversificada dos ambientes subaquáticos, torna-se impraticável a utilização de algoritmos tradicionais de CV (Alsmadi and Almarashdeh, 2020), visto que os mesmos necessitam de condições ambientais estáticas e adequadas, como, por exemplo, uma luminosidade constante.





**Figura 1.** Diagrama representativo da estrutura geral da instalação do projeto, com a estação de monitorização subaquática ligada à estação terra por cabos de fibra ótica e energia.

A evolução das técnicas de DL permitiu solucionar tarefas consideradas previamente inatingíveis, de uma forma eficiente e precisa, como, por exemplo, a tarefa de reconhecimento de objetos.

No entanto, a biodiversidade ambiental subaquática apresenta um obstáculo desafiador, impossibilitando a geração de um conjunto de dados universal para o treino de um modelo de monitorização subaquática. Por consequência, os conjuntos de dados subaquáticos disponíveis (Yang et al., 2021), seja para a classificação ou deteção de objetos, apresentam-se ajustados às zonas de origem, limitando o seu uso para aplicações em diferentes áreas subaquáticas.

Normalmente, a escolha dos dados utilizados nas publicações divide-se em duas categorias, conforme os objetivos: a comparação do método publicado num conjunto de dados público, ou a geração de um novo conjunto de dados personalizado, utilizado para a avaliação de métodos disponíveis a uma nova localização. Estes conjuntos de dados podem estar preparados para tarefas de deteção, classificação, ou ambas — reconhecimento.

Salman et al. (2020) avaliaram os resultados obtidos com o conjunto de dados LifeCLEF15 (Yoly et al., 2015) e o F4K (Fisher et al., 2016). O método publicado consistia na comparação uma técnica de CV tradicional e uma de DL, consistindo na exploração da informação temporal através da combinação de Modelos de Mistura Gaussiana (GMM — *Gaussian Mixture Models*) e fluxo óptico, versus a utilização de uma rede neuronal convolucional (CNN) recorrente (R-CNN). As mesmas obtiveram uma avaliação  $F$ , ou seja, a

média harmónica ponderada entre precisão e exatidão, de 87,44% e 80,02%, respetivamente.

Jalal et al. (2020) avaliaram também o método publicado com o conjunto de dados Life- CLEF15 (Joly et al., 2015) e um novo conjunto de dados exclusivo. A informação temporal também foi utilizada, contudo, com a aplicação de uma rede neuronal YOLO (*You Only Look Once*) paralela, sendo as localizações e classificação obtidas combinadas posteriormente. A métrica de avaliação  $F$  aumentou para 95,47% no LifeCLEF15 (Joly et al., 2015), em relação à deteção, e para 91,64% na classificação. No conjunto de dados exclusivos à zona de interesse, obteve uma precisão de 91,2% para a deteção, e 79,8% para a classificação.

Pedersen et al. (2019) publicaram o conjunto de dados Brackish. Para avaliação do mesmo, comparou o desempenho do YOLOv2 e YOLOv3, utilizando como métrica a média da precisão média (mAP — *mean Average Precision*) sobre diferentes valores de *interseção sobre união* (IoU — *Intersection over Union*). Foram alcançados resultados de 83,72% para  $\text{mAP}_{\text{IoU}=.50}$ , e de 39,83%, para  $\text{mAP}_{\text{IoU}=.50:.95}$ .



**Figura 2.** Linha superior, amostra de imagens de deteção de objetos do conjunto de dados OzFish. Linha inferior, exemplos de anotações erróneas.

Zhang et al. (2021) avaliaram o conjunto de dados Brackish (Pedersen et al., 2019) com a rede YOLOv4 (Bochkovskiy et al., 2020), a versão tiny-YOLOv4 (Jiang et al., 2020), e uma arquitetura YOLOv4 modificada com o MobileNetv2 (Sandler et al., 2018) como o esqueleto (*backbone*) da rede. Como resultados, obtiveram um mAP de 93,56%, 80,16% e 92,65%, respetivamente, conseguindo demonstrar uma redução do número de parâmetros necessários no modelo, a manterem ao mesmo tempo uma elevada taxa de precisão.

Labao and Naval (2019) sugeriram um agregado de redes de deteção de objetos ligadas por redes de memória de longo-curto prazo, através de

estruturas em cascata. A avaliação deste método obteve uma média de 60% nas métricas de precisão e exatidão, num conjunto de dados próprio desafiador, contendo quantidades variáveis de objetos em pequena escala. Ditria et al. (2020) comprovaram a viabilidade das técnicas de DL para a monitorização subaquática face à avaliação humana. Os resultados obtidos com a implementação de uma Mask R-CNN num conjunto de dados próprios foram comparados com análise de especialistas marinhos e cientistas, demonstrando um aumento sobre os mesmos de 7,1% e 13,4%, respetivamente, na deteção da quantidade de objetos em imagens, e de 1,5% e 7,8% em vídeos.

Knausgård et al. (2021) utilizaram o conjunto de dados F4K (Fisher et al., 2016) para inicializar o modelo. As tarefas de deteção e classificação foram divididas, sendo a arquitetura YOLOv3 responsável pela fase de deteção de objetos, e uma rede *Squeeze-and-Excitation* pela classificação. Foi obtida uma mAP de 86,96% para a tarefa de deteção de objetos, enquanto na tarefa de classificação alcançaram uma precisão de 99,27% no conjunto de dados F4K (Fisher et al., 2016), e 83,68%, num conjunto de dados próprios.

Stavelin et al. (2020) aplicaram o YOLOv3 num conjunto de dados anotados limitado, a guardar as deteções acima de 25% de confiança para



**Figura 3.** Linha superior, amostra de imagens dos vídeos do CCMAR não anotadas. Linha do meio, anotações do biólogo marinho em alguns vídeos do CCMAR. Linha inferior, imagens da amostra negativa, obtidas durante a etapa de classificação de vídeos.

correção manual e a retrainar a rede com as mesmas. Com este método conseguiram atingir uma mAP de 88,09%.

Ditria et al. (2020) criaram combinações de cinco conjuntos de dados próprios diversificados, com vistas à demonstração das capacidades de generalização de modelos Mask R-CNN. O conjunto de dados criados são coleções de imagens de recifes e ervas marinhas em diferentes localizações e condições ambientais.

### 3. Dados

Sendo a instalação de uma estação subaquática estática para a monitorização da fauna local o objetivo final deste projeto, foi necessário obter filmagens subaquáticas locais. As mesmas foram então utilizadas para a geração automática de um conjunto de dados ajustado à nossa costa.

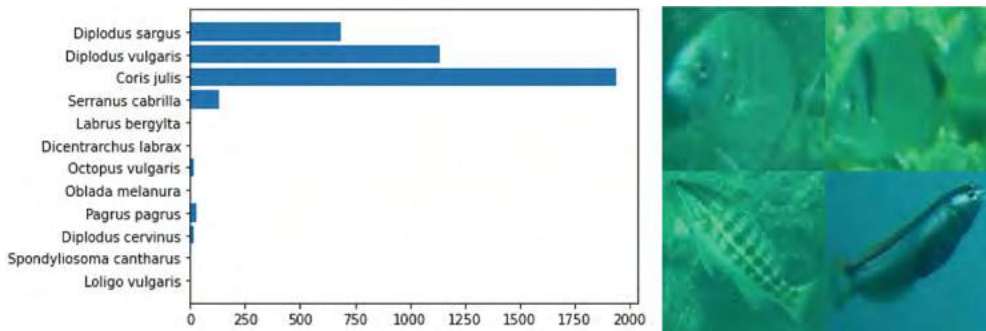
Essas filmagens subaquáticas do fundo do mar de Portugal — Algarve, foram graciosamente cedidas pelo Centro de Ciências do Mar (CCMAR), consistindo em 21 vídeos não editados, contendo diversas condições ambientais. É possível observar uma amostra no topo da Figura 3. As gravações têm uma duração média de 33 minutos, para um total de 695 minutos. É importante salientar que as mesmas contêm partes iniciais a bordo das embarcações de pesquisa, e que os finais são aleatórios, ora subaquáticos, durante a transição, ou de volta a bordo.

Em adição aos vídeos, também foi fornecido um conjunto de 383 imagens anotadas por um biólogo marinho. Estas mesmas serviram para avaliar a precisão do modelo face a imagens novas, distintas das usadas durante o processo de treino. Destas imagens já anotadas, obteve-se 3 919 anotações de 12 espécies distintas para o treino do classificador, como é possível observar na amostra da Figura 4 à direita. Contudo, a distribuição das anotações não é homogénea, como é possível observar no histograma à esquerda na Figura 4, dado que três das espécies destacam-se por serem as mais comuns nas áreas de origem dos vídeos.

Neste projeto, para o processo de inicialização do modelo escolheu-se o conjunto de dados público OzFish (<https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8>), contendo 1 753 imagens anotadas para a deteção da fauna marinha australiana, obtidas através do método BRUV. Algumas imagens, com as devidas anotações, estão apresentadas no topo da Figura 2. Embora estes dados englobem espécies antípodas à nossa instalação local, o uso de um conjunto de dados contrastante é uma parte fundamental do método apresentado, visando demonstrar a versatilidade e aplicabilidade do conhecimento interno

adquirido, durante o processo de geração automática de um conjunto de dados adaptado à ictiofauna.

Uma observação relevante sobre o conjunto de dados OzFish (<https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8>), é a utilização de *outsourcing* para o processo de anotação dos dados, visto que a utilização de múltiplos anotadores diminui a consistência das anotações, introduzindo ruído nas mesmas, isto é, anotações erradas ou imperfeitas. Um exemplo de ruído nas caixas delimitadoras é a existência de 935 anotações com uma área inferior a 1% da área média, incluindo uma anotação com uma área de somente 9 pixels. Na linha inferior da Figura 2 é possível observar um exemplo de algumas anotações conflituosas. No entanto, embora parte dos dados não seja confiável, não podemos descartar as informações relevantes contidas no resto do conjunto.



**Figura 4.** À esquerda, histograma da quantidade de anotações por espécie. À direita, amostra de imagens utilizadas para a tarefa de classificação.

## 4. Método

A estrutura do nosso método para o reconhecimento da ictiofauna é semelhante ao método apresentado por Knausgård et al. (2021), dividindo-se em duas fases: a detecção e a classificação. A fase de classificação é efetuada posteriormente à detecção, podendo ser efetuada através da classificação das caixas delimitadoras obtidas, ou substituindo diretamente a cabeça de classificação do modelo de detecção YOLO.

O esquema do método apresentado pode ser seguido na Figura 5. O método tem dois pontos de partida: o conjunto de dados OzFish: <https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8> (a), e as filmagens do CCMAR (c).

Dado a natureza não editada dos vídeos do CCMAR (c), foi necessário automatizar a classificação dos vídeos (d) em três fases (e): sobre a água,

transição e subaquática. A fase sobre a água refere-se a qualquer parte do vídeo não submersa, a fase de transição foca-se nos períodos em que a câmara é afundada na água ou puxada de volta a bordo, e a fase subaquática tem como alvo os setores do vídeo onde a câmara está estável no fundo do mar.

A automatização da classificação dos vídeos (d) foi obtida utilizando métodos tradicionais de CV. A fase de sobre a água foi isolada utilizando a análise de movimento com a informação do histograma dos canais das cores, sendo a análise da ausência do canal vermelho essencial para isolar-se propriamente esta fase. A fase de transição foi observada através de técnicas de subtração do plano de fundo, recorrendo a misturas Gaussianas. A separação entre a fase de transição e a subaquática, é obtido pela análise do histograma dos canais de cores, sendo que o momento de impacto no solo aquático gera uma anomalia nos valores obtidos.

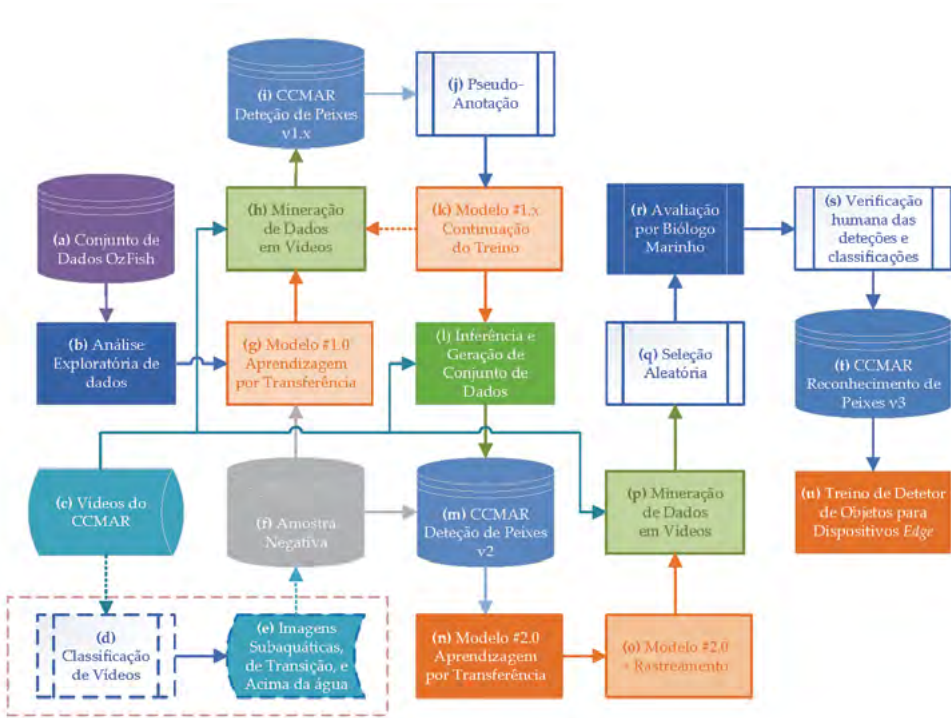
No conjunto de dados OzFish (<https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8>) (a), apesar de haver inconsistências nos dados, como é possível observar na Figura 2, decidiu-se não filtrar as anotações, automatizando o processo de filtragem e minimização dos efeitos do ruído nos dados para o ciclo de aprendizagem auto-supervisionada (h-k). Contudo, a análise exploratória dos dados (b) continua a ser um processo importante na compreensão abstrata dos dados, permitindo a análise da qualidade e da viabilidade das anotações.

O modelo base para a deteção de objetos foi treinado através da técnica de transferência de aprendizagem (g), com os pesos inicializados de um modelo treinado no conjunto de dados COCO (Lin et al., 2014) (Common Objects in COntext). A técnica de transferência de aprendizagem permite a adaptação de um modelo computacionalmente exigente a novos dados, exigindo menos recursos, mas continuando a manter a precisão e o desempenho semelhantes aos do modelo original.

Embora o uso de uma rede de deteção de múltiplas classes para a deteção de uma única classe pareça contraproducente, é necessário considerar que a classe alvo — peixes — contém múltiplas espécies com peculiaridades distintas entre elas, embora partilhem uma silhueta semelhante. O isolamento das etapas de deteção e classificação potencia o reconhecimento de novas espécies, locais ou invasoras, à ictiofauna.

A utilização da arquitetura YOLOv4 (Bochkowsky et al., 2020) permitiu uma abordagem mais robusta tendo em conta os objetivos propostos, sendo a principal vantagem o equilíbrio entre a elevada taxa de deteção





**Figura 5.** Pipeline geral do método proposto.

e precisão e um custo computacional moderado. Além disso, o uso da imagem completa durante as fases de treino ou inferência mantém as informações contextualizadas, a contribuir para a redução da ocorrência de falso-positivos. No entanto, devido à remoção da etapa de propostas de região, alguns objetos, especialmente os objetos menores, podem deixar de ser localizados.

A configuração padrão para o treino da rede YOLOv4 (Bochkowskiy et al., 2020) foi alterada para detetar apenas uma única classe — peixe, com a resolução das imagens de entrada fixadas a 608x608 pixels. As 1 753 imagens do conjunto de dados OzFish foram divididas em subconjuntos de treino, validação e teste, seguindo uma proporção de 80%, 15% e 5%, respetivamente. Uma amostra negativa (f), contendo imagens das fases de sobre a água e transição dos vídeos do CCMAR, foi proporcionalmente adicionada ao conjunto de dados de treino.

Os hiper-parâmetros alterados foram os seguintes: o número de âncoras manteve-se, mas os seus valores foram recalculados, com a finalidade de melhorar a detecção de objetos pequenos, sendo os pares de

valores iniciais de largura e altura substituídos por: 16x25, 37x50, 73x72, 61x137, 125x119, 123x265, 209x184, 276x331, 483x518; o lote de imagens foi definido para 128, com 16 subdivisões; o número máximo de iterações foi definido para dez mil, com passos de oito mil e nove mil; e a taxa de aprendizagem foi ajustada para 0,005.

Aplicou-se também técnicas de amplificação dos dados, tais como: o mosaico, que gera colagens de 4 imagens durante o treino; e a desfocagem, que ajudou a reduzir a taxa de erros do tipo I e II, resultantes das anotações errôneas ou ausentes.

Após o treino do modelo base foi iniciado o ciclo de aprendizagem auto-supervisionada (h-k). Este ciclo utiliza o modelo obtido do treino anterior (g), constituído de quatro etapas distintas: a mineração de dados em vídeos subaquáticos do CCMAR (h); a geração e agregação de um conjunto de dados temporário (i); o processo de pseudo-anotação sobre as imagens filtradas (j); e o treino contínuo do modelo de detecção de objetos (k).

A etapa de mineração de dados (h) infere o modelo atual sobre a secções subaquáticas dos vídeos do CCMAR, recorrendo a um método de rastreamento simples, consistido do cálculo da distância euclidiana entre as caixas delimitadoras, visando o preenchimento das anotações ausentes ao longo das sequências. Este processo de rastreamento é efetuado nas duas direções, permitindo uma análise mais completa através do aumento da confiança de verdadeiros positivos, enquanto auxilia no processo de descarte de deteções de falsos positivos.

O resultado da etapa anterior é uma coleção de anotações (i) acompanhadas pelos respetivos níveis de confiança. Considerando que a utilização de todas as anotações para treinar um modelo exacerbariam e propagariam os erros das mesmas, decide-se nesta fase quais são as imagens e as anotações que devem consideradas para o ciclo atual.



**Figura 6.** Exemplo da progressão do modelo durante o ciclo de pseudo-anotação através de aprendizagem auto-supervisionada.



Este processo é realizado através de uma análise exploratória automática dos resultados obtidos: isola-se o agrupamento de detecções; dá-se prioridade às detecções pelo seu nível de confiança; e define-se um limite temporal para a amostra escolhida, de modo a evitar imagens demasiado semelhantes, o que contribui para uma melhor generalização. Um exemplo da evolução das previsões do modelo durante este ciclo pode ser observado na Figura 6.

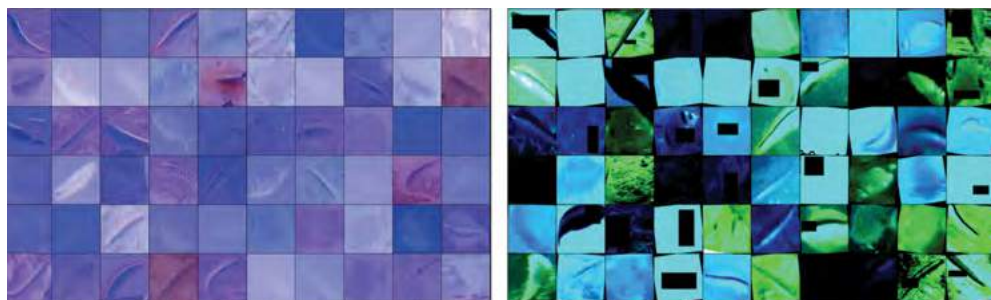
Na etapa seguinte temos o método de pseudo-anotação (j), uma técnica de aprendizagem não supervisionada onde os nossos modelos são treinados num pequeno subconjunto de dados anotados e a inferência é realizada, com os mesmos, sobre os dados não anotados, sendo o produto disso as pseudo-anotações. Esta fase é mais proeminente após um certo número de ciclos, quando os níveis de confiança sobre as caixas delimitadoras encontram-se mais elevados e consolidados.

A configuração do treino para o processo de aprendizagem auto-supervisionada (k), difere da configuração anterior utilizada no treino do modelo base (g), com a resolução das imagens de entrada aumentada para 960x960, e o cálculo a cada ciclo de novas âncoras. O número máximo de iterações também aumenta com a quantidade atual de imagens com anotações de elevada confiança, e a taxa de aprendizagem alterna progressivamente entre 0,005 e 0,001, por uma correlação direta com as taxas de precisão obtidas.

Para evitar os efeitos de anotações incorretas no plano de fundo durante a fase de treino, aplicou-se uma desfocagem progressiva sobre as áreas não detetadas, o que consiste num aumento da área e da intensidade do filtro, diretamente relacionadas à distância das caixas delimitadoras detetadas.

O ciclo de aprendizagem auto-supervisionada (h-k) continua até atingir uma paralisação na aquisição de nova informação, ou seja, quando a confiança das anotações pseudo- anotadas não introduz novas informações significativas, mesmo a reduzir a confiança de 90% para 70%.

Atingido este limite, avança-se para a geração (l) de um conjunto de dados atualizado (m), acompanhado por uma quantidade igual de imagens da amostra negativa (f). Durante esta etapa é possível escolher a quantidade e as localizações das anotações e a categoria de imagens anotadas necessárias para os treinos adicionais, a permitir uma configuração interativa, diretamente relacionada com a aplicação do futuro modelo



**Figura 7.** À esquerda, amostra das caixas delimitadoras utilizadas para o treino do modelo de classificação. À direita, exemplo de imagens obtidas após a aplicação de métodos de aumento do número de imagens, normalmente utilizados para aumentar a generalização dos modelos.

treinado (n), seja para dispositivos *Edge* ou móveis, ou processamento local, ou na nuvem.

A configuração utilizada é semelhante à fase de treino contínuo (k), treinando-se um modelo com o novo conjunto de dados (m). Este modelo (n) foi depois integrado com um rastreador (o), que foi utilizado para a mineração de novos dados dos vídeos do CCMAR (p), ou seja, a extração de novas anotações através da inferência do modelo atual sobre as filmagens.

Uma seleção aleatória (q) das anotações obtidas na etapa anterior foi disponibilizada ao biólogo marinho (r) para efetuar a associação de espécies às caixas delimitadoras, incluindo a verificação e a validação das mesmas (s). Deste processo originou-se o conjunto de dados para reconhecimento de ictiofauna (t), isto é, a deteção e classificação da fauna marinha local. Na Figura 7 é possível observar à esquerda um exemplo das caixas delimitadoras utilizadas para o processo de classificação.

Embora os dados para a tarefa de classificação conttenham 12 espécies distintas, dada a existência de uma grande desproporcionalidade, foram utilizadas somente as 4 principais espécies para o treino do classificador. É importante salientar que, mesmo com esta filtragem, continuou a existir uma desproporcionalidade entre espécies na amostra de treino.

Para a avaliação inicial do conjunto de dados anotados para a classificação dos peixes utilizou-se uma rede ResNet com 101 camadas pré-treinadas. O treino foi realizado usando a técnica de transferência de aprendizagem, onde se congela o modelo, exceto as últimas camadas, e o classificador é treinado por 20 epochs, com um lote de 64 imagens de entrada e uma taxa de aprendizagem de 0,001. Posteriormente, o modelo é

descongelado e volta-se a treinar pela mesma quantidade de epochs, mas com uma taxa de aprendizagem inferior a 0,0001.

Por fim, efetuou-se o treino de um detetor de objetos otimizado para dispositivos Edge (u), com uma arquitetura MobileNetv2 (Sandler et al., 2018). Foram também aplicados métodos de amplificação de imagens, sendo que alguns exemplos podem ser observados na Figura 7 à direita, tendo em vista uma melhor generalização do modelo.

## 5. Resultados

O método proposto foi avaliado em diferentes fases do algoritmo, como demonstrado na Figura 5. Todos os resultados apresentados foram obtidos através da utilização de uma única NVIDIA RTX3090, com 24 GB de VRAM. O método apresentado também foi adaptado e reproduzido numa NVIDIA RTX 2070 Super, com apenas 8 GB de VRAM, obtendo-se resultados semelhantes, comprovando assim a versatilidade deste método.

Para a fase de treino do modelo base (g), foi avaliado o desempenho do conjunto de dados OzFish (<https://apps.aims.gov.au/metadata/view/38c829d4-6b6d-44a1-9476-f9b0955ce0b8>) com e sem a adição da amostra negativa (f). Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 1. A mAP aumentou 4,47%, desde 68,46%, com a adição de uma amostra negativa para uma IoU a 50%, e 9,99%, desde 25,94%, para uma IoU de 75%.

**Tabela 1.** Parâmetros e resultados dos treinos dos modelos, baseados no rede YOLOv4.

Método	Dados	Resolução	#Imagens <sup>1</sup>	#Anotações <sup>1</sup>	mAP <sub>50</sub>	mAP <sub>75</sub>	IoU <sup>2</sup>	Precisão <sup>2</sup>	Exatidão <sup>2</sup>
YOLOv4	OzFish	608	1 753	43 572	68.46%	25.94%	59.28%	79%	65%
YOLOv4	OzFish+AN3	608	3 506	43 572	72.93%	35.93%	66.96%	86%	66%
YOLOv4-tiny	CCMAR	416	35 510	113 886	85.00%	45.33%	68.74%	87%	71%
YOLOv4-tiny-3l	CCMAR	608	35 510	113 886	89.66%	61.02%	73.69%	90%	73%
YOLOv4	CCMAR	608	35 510	113 886	93.11%	74.70%	75.10%	89%	84%

<sup>1</sup># significa número de.

<sup>2</sup>Para um limiar de IoU de 50%.

<sup>3</sup>Imagens da amostra negativa.

A IoU média também aumentou 7,68%, desde 59,28%, e a exatidão, a métrica responsável por medir a quantidade de alvos identificados numa imagem, aumentou apenas 1%, desde 65%, enquanto a precisão, que avalia se a deteção é um verdadeiro positivo, aumentou 7%, desde 79%. Estes

resultados comprovam que a adição de uma amostra negativa melhora a eficácia do modelo.

Antes de prosseguir, avaliou-se as anotações automáticas das caixas delimitadoras, onde foi observada uma tendência recorrente: a área da caixa ficou estendida para além da cauda dos peixes. Este efeito pode ser o resultado da agregação de erros do sistema de rastreamento aplicado durante o ciclo de treino, ou derivado do movimento rápido das caudas dos peixes.

Para a avaliação do conjunto de dados do CCMAR anotado automaticamente (m), treinou-se (n) uma rede YOLOv4 (Bochkovskiy et al., 2020) e duas versões menores: o YOLOv4-tiny, com duas camadas YOLO; e o YOLOv4-tiny-3l, com as três camadas originais do YOLOv3. Em comparação, o modelo YOLOv4 possui 137 camadas convolucionais, enquanto o YOLOv4-tiny possui apenas 29. A resolução da imagem de entrada na rede foi de 416, para a rede menor, e de 608, para a rede original e a YOLOv4-tiny-3l. Foram utilizadas 35 510 imagens, sendo que metade das mesmas pertencem à amostra negativa.

Para estas três redes, obteve-se uma  $mAP_{50}$  de 93,11%, 85,00% e 89,66%, respetivamente, e um aumento significativo na  $mAP_{75}$ , obtendo 74,70%, 45,33% e 61,02%, face aos dados treinados com o OzFish apenas. Em termos da IoU a 50%, obteve-se 75,10%, 68,74% e 73,69%, enquanto a precisão obtida foi de 89%, 87% a 90%, e a exatidão de 84%, 71% e 73%. Estes resultados comprovam a viabilidade do método proposto para o treino de redes neuronais menores, habitualmente direcionadas a dispositivos *Edge*. Alguns dos resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 8.

Os modelos obtidos (n) foram depois avaliados em imagens novas anotadas pelo biólogo marinho, sendo que as mesmas não se encontram nos vídeos do CCMAR utilizados durante este método. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

A rede original YOLOv4 obteve uma  $mAP_{50}$  de 73,61% e uma  $mAP_{75}$  de 43,11%, com uma IoU de 71,82%, uma precisão de 89%, e uma exatidão de 48%.

O modelo com as três camadas YOLOv3 obteve uma  $mAP_{50}$  de 68,54% e uma  $mAP_{75}$  de 35,15%. A IoU e a precisão aumentaram, em comparação com a métrica anterior, obtendo uma IoU de 76,63%, e uma precisão de 96%, contudo, a exatidão diminuiu para 39%.

O modelo com 29 camadas obteve também resultados positivos, alcançando uma  $mAP_{50}$  de 61,25%, uma  $mAP_{75}$  de 27,93%, uma IoU de 72,00%, a precisão de 91%, e a exatidão de 37%.

**Tabela 2.** Resultados obtidos ao testar os modelos com o biólogo marinho anotado em imagens de diferentes locais.

Método	Resolução	$mAP_{50}$	$mAP_{75}$	IoU <sup>1</sup>	Precisão <sup>1</sup>	Exatidão <sup>1</sup>
YOLOv4	608	73.61%	43.11%	71.82%	89%	48%
YOLOv4-tiny-3l	608	68.54%	35.15%	76.73%	96%	39%
YOLOv4-tiny	416	61.25%	27.93%	72.00%	91%	37%

<sup>1</sup> Para um limiar de IoU de 50%.

Na etapa de classificação (u) para o modelo no dispositivo *Edge*, foi obtida uma métrica de precisão de 91,01% face ao conjunto de dados CCMAR gerados automaticamente, e uma métrica de precisão de 83,59% em imagens novas das mesmas espécies.



**Figura 8.** Amostra de deteção instantânea correta sobre quadros obtidos da filmagem do CCMAR. Linha superior, deteções corretas. Linha do meio, deteções parcialmente corretas. Linha inferior, casos de falha.

## 6. Conclusão

O método apresentado permitiu a anotação autónoma de quase 700 minutos de vídeo, recorrendo a técnicas de destilação, sendo que as mesmas aumentaram significativamente a taxa de precisão durante o ciclo de aprendizagem auto-supervisionada, além de ajudarem na filtragem de falsos positivos e falsos negativos.

Os modelos obtidos foram também testados em ambientes com condições subaquáticas variadas, incluindo cenários obscurecidos com areia flutuante, a comprovar a sua versatilidade. É igualmente importante salientar que os resultados obtidos na inferência de imagens novas obtiveram uma mAP de deteção instantânea excecional, incluindo os modelos de tamanho menor, mais orientados a dispositivos Edge.

Como trabalho futuro, pretende-se implementar um método de rastreamento mais avançado, a introduzir uma deteção mais precisa, seja durante o ciclo de aprendizagem auto-supervisionada ou durante o processo de destilação.

Também se pretende disponibilizar o conjunto de dados gerado numa futura publicação. Com os resultados iniciais obtidos na tarefa de classificação pretende-se incorporar a mesma no detetor de objetos, seja através da substituição da secção de classificação da rede, ou ao anexar o classificador diretamente às caixas delimitadoras obtidas pela deteção.

Por fim, pretende-se aplicar o método proposto a diferentes conjuntos de dados e efetuar uma validação cruzada dos resultados alcançados com o estado de arte.

### *Agradecimentos*

Este trabalho foi suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia Portuguesa (FCT), LARSyS - FCT Projeto UIDB/50009/2020, e o projeto KTTSeaDrones, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional FEDER através do Interreg V-A Espanha- Portugal (POCTEP) 2014-2020. Gostávamos também de agradecer ao CCMAR - Centro de Ciências do Mar, pelo suporte, disponibilidade, e acesso aos seus recursos e conhecimentos.

## 7. Referências

- ALSMADI, M.K., ALMARASHDEH, I. (2020). A survey on fish classification techniques. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* 34(5), 1625-1638.
- BOCHKOVSKIY, A., WANG, C.Y., LIAO, H.Y.M. (2020). Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv* 2004.10934.
- DITRIA, E.M., LÓPEZ-MARCANO, S., SIEVERS, M., JINKS, E.L., BROWN, C.J., CONNOLLY, R.M. (2020). Automating the analysis of fish abundance using object detection: optimizing animal ecology with deep learning. *Frontiers in Marine Science* 7, 429.
- DITRIA, E.M., SIEVERS, M., LÓPEZ-MARCANO, S., JINKS, E.L., CONNOLLY, R.M. (2020). Deep learning for automated analysis of fish abundance: the benefits of training across multiple habitats. *Environmental Monitoring and Assessment* 192(11), 1–8.
- FISHER, R.B., CHEN-BURGER, Y.H., GIORDANO, D., HARDMAN, L., LIN, F.P. (2016). Fish4Knowledge: collecting and analyzing massive coral reef fish video data, 104. Springer.
- JALAL, A., SALMAN, A., MIAN, A., SHORTIS, M., SHAFAIT, F. (2020). Fish detection and species classification in underwater environments using deep learning with temporal information. *Ecological Informatics* 57,101088.
- JIANG, Z., ZHAO, L., LI, S., JIA, Y. (2020). Real-time object detection method based on improved yolov4-tiny. *arXiv preprint arXiv* 2011, 04244.
- JOLY, A., GOËAU, H., GLOTIN, H., SPAMPINATO, C., BONNET, P., VELLINGA, W.P., PLANQUÉ, R., RAUBER, A., PALAZZO, S., FISHER, B., MÜLLER, H. (2015). Lifeclef 2015: multimedia life species identification challenges. In *International Conference of the Cross-Language Evaluation Forum for European Languages*, pages 462–483. Springer.
- KNAUSGÅRD, K.M., WIKLUND, A., SØRDALEN, T.K., HALVORSEN, K.T., KLEIVEN, A.R., JIAO, L., GOODWIN, M. (2021). Temperate fish detection and classification: A deep learning based approach. *Applied Intelligence* 52(3), 1–14.
- LABAO, A.B., NAVAL, P.C.J. (2019). Cascaded deep network systems with linked ensemble components for underwater fish detection in the wild. *Ecological Informatics* 52,103–121.
- LIN, T.Y., MAIRE, M., BELONGIE, S., HAYS, J., PERONA, P., RAMANAN, D., DOLLÁR, P., ZITNICK, C.L. (2014). Microsoft coco: Common objects in

- context. In European Conference on Computer Vision, pages 740–755. Springer.
- PEDERSEN, M., HAURUM, J.B., GADE, R., MOESLUND, T.B. (2019). Detection of marine animals in a new underwater dataset with varying visibility. In IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pages 18–26.
- SALMAN, A., SIDDIQUI, S.A., SHAFAIT, F., MIAN, A., SHORTIS, M.R., KHURSHID, K., ULGES, A., SCHWANECKE, U. (2020). Automatic fish detection in underwater videos by a deep neural network-based hybrid motion learning system. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1295–1307.
- SANDLER, M., HOWARD, A., ZHU, M., ZHMOGINOV, A., CHEN, L.C. (2018). Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 4510–4520.
- STAVELIN, H., RASHEED, A., SAN, O., HESTNES, A.J. (2020). Marine life through you only look once's perspective. *arXiv preprint arXiv* 2003, 00836.
- YANG, X., ZHANG, S., LIU, J., GAO, Q., DONG, S., ZHOU, C. (2021). Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 66–90.
- ZHANG, M., XU, S., SONG, W., HE, Q., WEI, Q. (2021). Lightweight underwater object detection based on yolo v4 and multi-scale attentional feature fusion. *Remote Sensing*, 13(22), 4706.



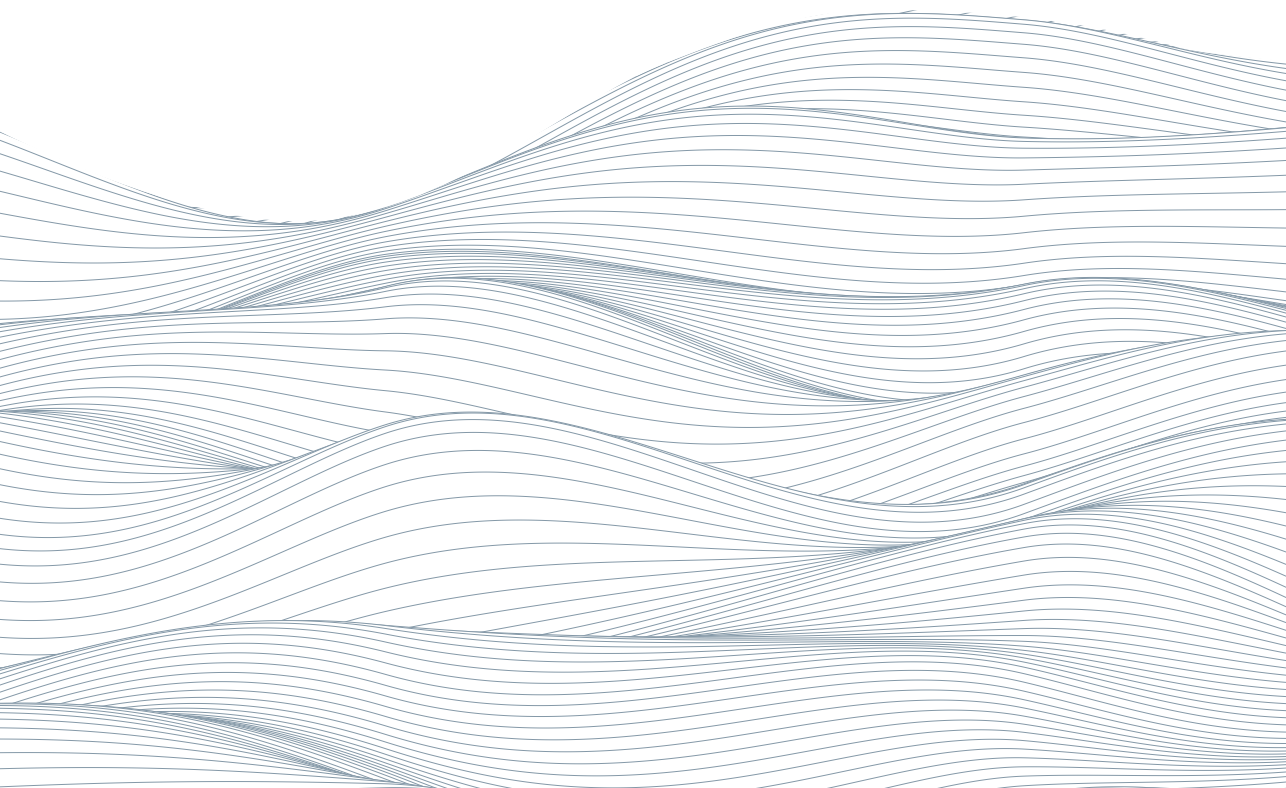
# 07.

## Transferencia de conocimiento: Acciones de comunicación y difusión del Proyecto KTTSeaDrones

I. Martínez Ceadá<sup>1</sup> | M. Escobar Zamora<sup>1</sup> | J.C. Gutiérrez Estrada<sup>2</sup> |  
I. Pulido Calvo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Delegación de Pesca del Ayuntamiento de Isla Cristina, Isla Cristina,  
Huelva, e-mail: [pesca@islacristina.org](mailto:pesca@islacristina.org)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva,  
e-mail: [juanc@uhu.es](mailto:juanc@uhu.es); [ipulido@uhu.es](mailto:ipulido@uhu.es)



## Sumario:

1. Introducción
2. Acciones de divulgación en el año 2019
3. Acciones de divulgación en el año 2020
4. Acciones de divulgación en el año 2021
5. Acciones de divulgación en el año 2022
6. Referencias

## Resumen

La actividad 6 de comunicación del Proyecto KTTSeaDrones '*Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras*' (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E), cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020, ha sido una de las tareas prioritarias durante el periodo de ejecución y cuyas acciones, coordinadas por el Ayuntamiento de Isla Cristina y la Universidad de Huelva, han consistido en la promoción, difusión y transferencia de los conocimientos, ensayos, productos y resultados obtenidos en cada una de las actividades programadas en el Formulario de Candidatura.

Esta actividad ha permitido añadir más valor al conjunto de acciones desarrolladas en el Proyecto y fundamentalmente ha estado dirigida a dar a conocer las soluciones y desarrollos innovadores generados para apoyar a los sectores económicos y sociales vinculados con las ciencias marinas y acuícolas de la región transfronteriza Algarve-Andalucía. En este capítulo se indican de forma resumida las acciones más relevantes de comunicación realizadas durante el periodo de vigencia del Proyecto KTTSeaDrones. Esta información se describe de forma detallada en los entregables de las actividades 5 (gestión y coordinación) y 6 (comunicación) y en el inventario de noticias que han sido publicadas en diversos medios de comunicación y que están disponibles en las secciones de resultados y noticias de la página web del Proyecto (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/>).

## Resumo

A actividade de comunicação 6 do Projecto KTTSeaDrones '*Transferência de conhecimentos e tecnologia sobre veículos aéreos e aquáticos para o desenvolvimento transfronteiriço das ciências marinhas e da pesca*' (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E), co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional FEDER através do Programa Interreg V-A Espanha-Portugal (POCTEP) 2014-2020, tem sido uma das tarefas prioritárias durante o período de implementação e cujas acções, coordenadas pela Câmara Municipal de Isla Cristina e pela Universidade de Huelva, consistiram na promoção, divulgação e transferência de conhecimentos, testes, produtos e resultados obtidos em cada uma das actividades previstas no Formulário de Candidatura.

Esta actividade tem acrescentado mais valor ao conjunto de acções desenvolvidas no Projecto e tem sido fundamentalmente orientada para a divulgação das soluções inovadoras e desenvolvimentos gerados para apoiar os sectores económicos e sociais ligados às ciências marinhas e aquícolas na região transfronteiriça Algarve-Andaluzia. Este capítulo resume as acções de comunicação mais relevantes realizadas durante o período do projecto KTTSeaDrones. Esta informação é descrita em pormenor nos resultados das actividades 5 (gestão e coordenação) e 6 (comunicação) e no inventário de notícias que foram publicadas em vários meios de comunicação social e que estão disponíveis nas secções de resultados e notícias do sítio web do Projecto (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/>).

## 1. Introducción

### Transferencia de conocimiento: Acciones de comunicación y difusión del Proyecto KTTSeaDrones

En este capítulo se recogen de forma resumida las acciones más destacadas de divulgación y difusión coordinadas por el Ayuntamiento de Isla Cristina y la Universidad de Huelva y realizadas en el marco de actuación del Proyecto KTTSeaDrones '*Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras*' (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020.

Este Proyecto, del cual son beneficiarios el Ayuntamiento de Isla Cristina y las Universidades de Huelva, Cádiz y Algarve, tiene como objetivo prioritario potenciar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en los sectores de la pesca, la acuicultura y gestión del litoral teniendo como eje prioritario un crecimiento inteligente a través de una cooperación transfronteriza en la Eurorregión Algarve-Andalucía.

## 2. Acciones de divulgación en el año 2019

En el año 2019 se inician las actividades de divulgación y difusión del Proyecto para dar a conocer la existencia del mismo principalmente a los agentes socio-económicos vinculados con el sector pesquero y acuícola de la zona transfronteriza Algarve-Andalucía. Se publicaron en medios de comunicación diversas noticias relacionadas con la concesión del Proyecto y se organizó el 19 de diciembre de 2019 una Jornada de Presentación que tuvo lugar en el Edificio C.I.T. GARUM de la localidad de Isla Cristina (Huelva). La información detallada del inventario de estas acciones de comunicación se pueden encontrar en el siguiente enlace de la página web del Proyecto: <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/noticias>. En la Figura 1 se muestran titulares de algunas de las noticias publicadas en prensa digital.

En la Jornada de Lanzamiento del Proyecto, los distintos grupos de trabajo de las Universidades de Huelva, Cádiz y Algarve expusieron las líneas de actuación que han marcado la hoja de ruta de ejecución del Proyecto y definieron los objetivos a conseguir. Las presentaciones de los ponentes se pueden descargar desde el enlace <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/documentos>. Se invitó a los principales agentes sociales y económicos relacionados con el Proyecto destacando la asistencia de empresas tecnológicas (Fly&Do; Grupo Álava; Trabajos y Técnicas Submarinas; Gestimar; Casco Antiguo; DroneTools), asociaciones de pescadores y armadores (Federación Andaluza de Cofradía de Pescadores FACOPE; Cofradía de Pescadores de Punta Umbría; Grupo de Acción Local del Sector Pesquero (GALP) Costa Occidental de Huelva; Asociación de Armadores de Lepe; Asociación de Armadores de Isla Cristina ASOISAMAR), administración (Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía; Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía; CEIMAR) e investigadores de las Universidades de Huelva, Cádiz y Algarve. En la Figura 2 se muestran algunas fotografías tomadas durante el desarrollo del evento.



**Figura 1.** Titulares de algunas de las noticias publicadas en medios digitales sobre el inicio del Proyecto KTTSeaDrones



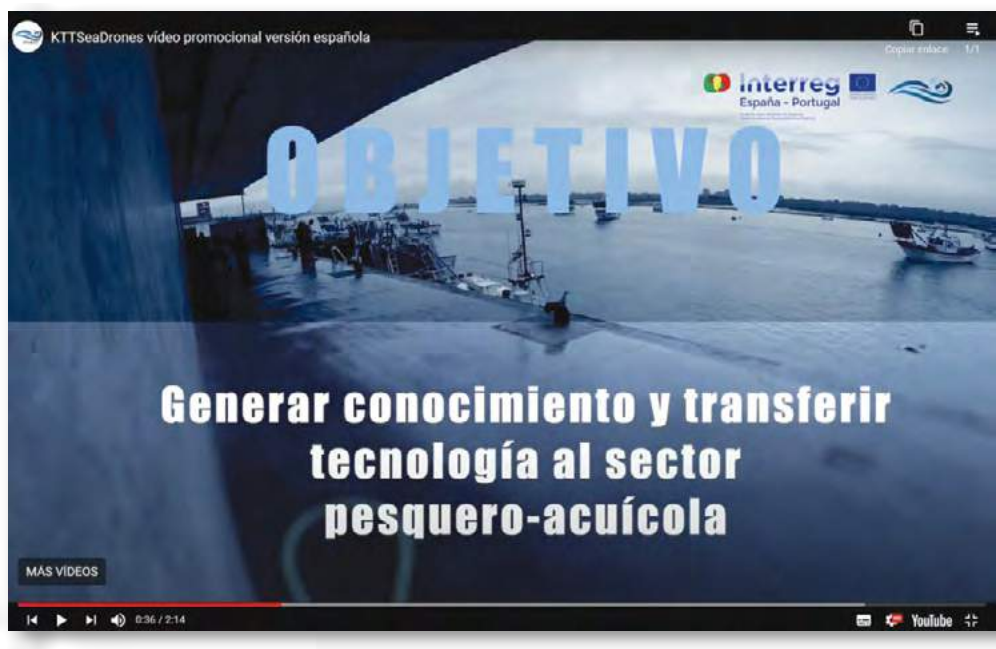
**Figura 2.** Jornada de presentación del Proyecto KTTSeaDrones en el C.I.T. GARUM de Isla Cristina (Huelva) (19 de diciembre de 2019)

### 3. Acciones de divulgación en el año 2020

Durante el año 2020 se realizaron las actuaciones programadas para la promoción del proyecto a pesar de la situación sanitaria debido a la COVID-19. Una de las primeras acciones consistió en la producción y edición de un vídeo promocional, rotulado en español y portugués, en el que se describen los objetivos y actividades a desarrollar en el Proyecto KTTSeaDrones (Figura 3). Ambos vídeos pueden ser visualizados desde los siguientes enlaces:

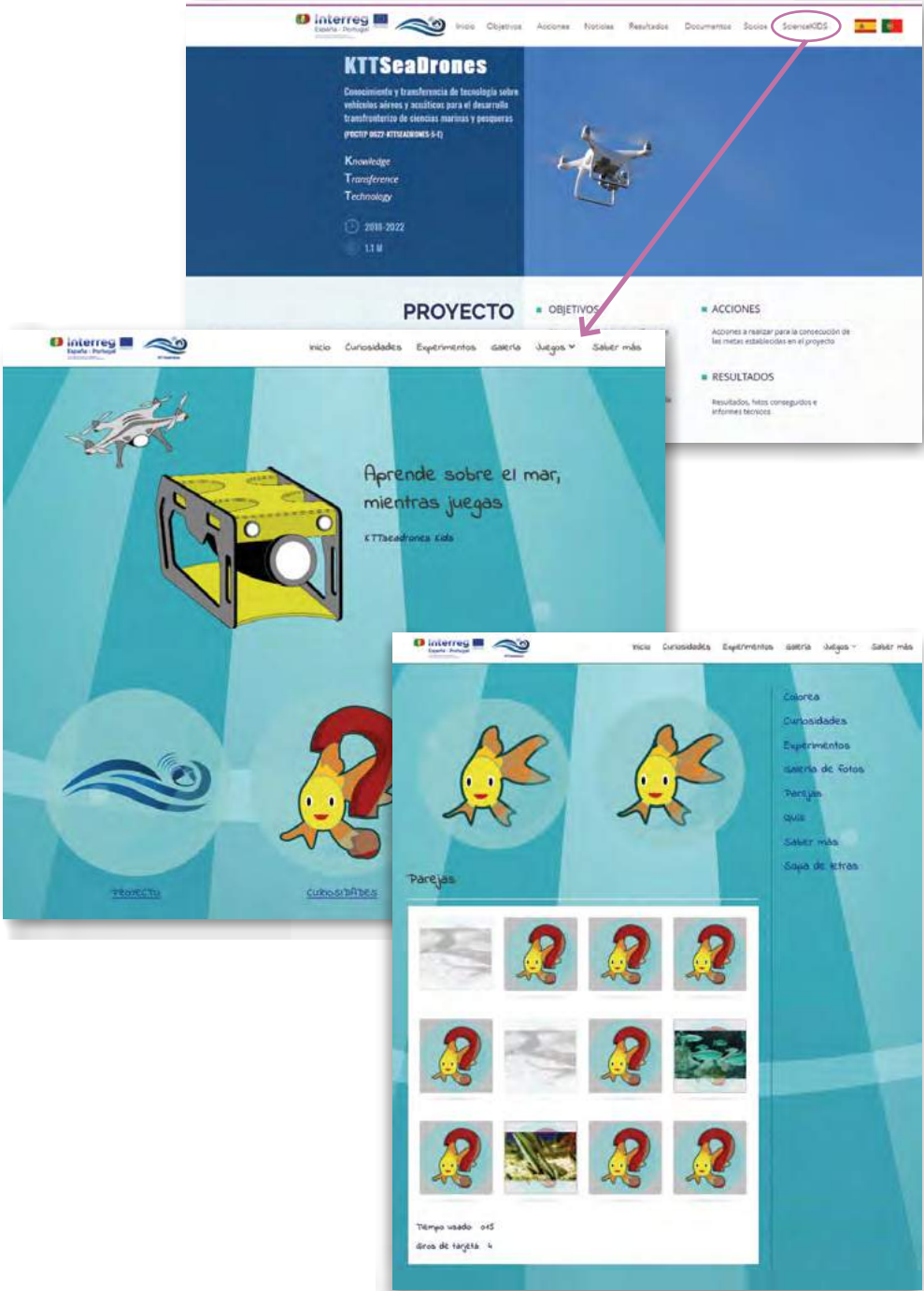
<https://youtu.be/42s0lovzQkY?list=TLGGbYgWPSP-GhgwODA2MjAyMg>

[https://youtu.be/qhpgCLFcGjY?list=TLGG46bygsL\\_45QwODA2MjAyMg](https://youtu.be/qhpgCLFcGjY?list=TLGG46bygsL_45QwODA2MjAyMg)



**Figura 3.** Fotograma rotulado en español del vídeo promocional del Proyecto KTT-SeaDrones





**Figura 4.** Ventanas de uno de los juegos incluidos en el apartado ‘Science for KIDS’ de la página web del proyecto KTTSeaDrones (<https://kttseadrones-kids.com/>)

Se incluyó en la página web del Proyecto un apartado 'Science for KIDS' (<https://kttseadrones-kids.com/>) con el objetivo de transmitir de forma amigable y atractiva al público infantil los principios y fundamentos del uso de los vehículos aéreos y marinos operados remotamente y autónomos en el sector de la pesca, la acuicultura y gestión del litoral (Figura 4).

Otra de las acciones llevadas a cabo durante este año fue la publicación de dos reportajes del proyecto en revistas especializadas del sector pesquero y acuícola de tirada nacional: 'Ruta Pesquera y Naval' (Figura 5) e 'Industrias Pesqueras' (Figura 6).



**Figura 5.** Gutiérrez-Estrada, J.C., Gómez-Bravo, F., Peregrín-Rubio, A., Pulido-Calvo, I., Bethencourt, M., Barbero, L., Semião, J., Martínez-Ceada, I., Escobar-Zamora, M. 2020. KTTSeaDrones: Conocimiento y soluciones tecnológicas para el sector pesquero-acuícola. Ruta Pesquera y Naval 143: 26-27





**Figura 6.** Gutiérrez-Estrada, J.C., Gómez-Bravo, F., Peregrín-Rubio, A., Pulido-Calvo, I., Bethencourt, M., Barbero, L., Semião, J., Martínez-Ceada, I., Escobar-Zamora, M. 2020. Proyecto KTTSeaDrones: Drones aéreos y acuáticos para el sector pesquero-acuícola. Industrias Pesqueras 2163: 68-69

También hay que destacar como actuaciones relevantes la presentación del Proyecto en la Noche Europea de los Investigadores 2020 con el taller 'Drones para acuicultura (KTTSeaDrones)' (<https://www.youtube.com/watch?v=d6CNJdDWXhA>) (Figura 7) y la preparación de un póster que consiguió el segundo puesto en el I Concurso de pósters de la cooperación transfronteriza en la Eurorregión Alentejo-Algarve-Andalucía (EUROAAA) (Figura 8).

Por noveno año consecutivo y al mismo tiempo que casi 400 ciudades europeas, la Universidad de Huelva te invita a descubrir el lado más social de la investigación a través de un contacto directo con los propios expertos y expertas.

La Noche Europea de los Investigadores, se desarrollará en esta ocasión el próximo 27 de noviembre en las ocho capitales andaluzas, con diversas actividades virtuales y presenciales. Experimentos, talleres, demostraciones, experiencias, rutas, representaciones teatrales, monólogos, etcétera. Todos los medios son válidos para acercar las investigaciones a la ciudadanía de una forma rigurosa y al mismo tiempo amena, con el fin de dar a conocer los beneficios que aportan a la sociedad y su repercusión en la vida cotidiana.

La Noche Europea de los Investigadores forma parte de un proyecto europeo de divulgación científica promovido por la Comisión Europea dentro de las acciones Marie Skłodowska-Curie del programa Horizonte2020.

[www.lanochedelosinvestigadores.es](http://www.lanochedelosinvestigadores.es) | [#NIGHTSpain](#) | [#MSCAnight](#)

**LA NOCHE EUROPEA DE LOS INVESTIGADOR@S**

27 | 11 | 20  
Andalucía

**Huelva**

**PROGRAMA**

Inauguración	18.00
Rutas	18.00
Actividades virtuales	Todo el día

**PREEVENTO** 4 Noviembre  
Seminario virtual Comunidades compasivas universitarias en el espacio transfronterizo  
<http://borderlesscompassioncommunity.org/inscripciones>

**ACTIVIDADES EN CENTROS DE ENSEÑANZA**

10. Conferencia Iconos artísticos onubenses II: Joaquín de Sorolla y "La pesca del atún en Ayamonte"
11. Desmontando mitos sobre el consumo de alcohol
12. Taller de especies exóticas invasoras (RC)
13. Aprendizaje basado en proyectos en enseñanzas medias
14. Mujeres Científicas (RC)
15. Challenge en Redes Sociales por la Igualdad en la Ciencia
16. Los Colores de la Química (RC)
17. La ciudad hispanorromana de Arocci (Aroche, Huelva)
18. Drones para acuicultura (KTTSeaDrones) (EC)

**Figura 7.** Taller 'Drones para acuicultura (KTTSeaDrones)' incluido en la programación de la Noche Europea de los Investigadores 2020 (27 de noviembre de 2020)



**Figura 8.** Póster presentado en el I Concurso de pósters de la cooperación transfronteriza en la Eurorregión Alentejo-Algarve-Andalucía (EUROAAA)

A finales del año 2020 se organizó la reunión de trabajo 'Uso de Nuevas Tecnologías para la Sostenibilidad en el Sector de la Pesca y la Acuicultura' en formato webinar dada la situación sanitaria por la COVID-19. Se reunieron 68 participantes vinculados al sector de la pesca y la acuicultura de la Eurorregión Algarve-Andalucía. El panel de ponentes, compuesto por el Dr. Ignacio de la Rosa (Culmasur S.A. - Universidad de Huelva), D. Luis Alberto Olmo (Departamento de Gestión de Recursos Pesqueros, Dirección General de Pesca y Acuicultura de la Junta de Andalucía), Dr. Jorge Gonçalves

(Universidad de Algarve) y el Dr. Eduardo Balguerías (Instituto Español de Oceanografía), destacaron la importancia de la transferencia de tecnología al sector de la pesca y la acuicultura como vía para una gestión sostenible (Figura 9). La jornada finalizó con la exposición de los avances del proyecto KTTSeaDrones en formato pechakucha. Las presentaciones de los ponentes se pueden consultar en el enlace de la página web del Proyecto: <https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones/resultados>.



**Figura 9.** Intervención de varios ponentes durante la celebración de la webinar 'Uso de Nuevas Tecnologías para la Sostenibilidad en el Sector de la Pesca y la Acuicultura' (18 de noviembre de 2020)

Asimismo durante el año 2020 las acciones del Proyecto relacionadas con las pruebas experimentales de los grupos de trabajo para la calibración de los equipos para la toma de datos en instalaciones de las entidades colaboradoras (actividades 2 y 3) se dieron a conocer en diversos medios de comunicación digitales (Figura 10).





**Figura 10.** Titulares de algunas de las noticias publicadas en medios digitales sobre las pruebas experimentales realizadas en instalaciones de entidades colaboradoras e incluidas en las actividades del Proyecto KTTSeaDrones

## 4. Acciones de divulgación en el año 2021

Durante el año 2021 se continuó con las labores de difusión y promoción de todas las acciones ejecutadas durante el desarrollo del Proyecto. En este sentido hay que destacar dos eventos, con un eminente carácter de transferencia social, para presentar a los principales agentes económicos del sector pesquero-acuícola de la región transfronteriza Algarve-Andalucía los avances obtenidos durante la ejecución de las actividades programadas: (a) Mesa de Trabajo de la Pesca; y (b) Exposición 'Tecnologías y Conocimiento Azul'.

Los objetivos de la 'Mesa de Trabajo de la Pesca' celebrada el 28 de octubre de 2021 en Isla Cristina (Huelva) fueron: (a) Presentar los trabajos y resultados obtenidos hasta la fecha en el Proyecto; (b) Conocer las opiniones y valoraciones de los principales agentes sociales y económicos del sector pesquero-acuícola de la región; y (c) Plantear futuras líneas de actuación para conseguir el deseado equilibrio entre el desarrollo económico del sector pesquero-acuícola y la sostenibilidad ambiental. Los asistentes a esta jornada de trabajo fueron personal de: Cofradía de Pescadores de Isla Cristina, Asociación de Armadores de Cerco (ASURABUCER), Asociación Isleña de



**Figura 11.** Acción 'Mesa de Trabajo de la Pesca' celebrada en Isla Cristina (Huelva) (28 de octubre de 2021)

Armadores Pesqueros (ASOISAMAR), Armadores de Punta del Moral, Asociación de Productores de Caballas del Sur (ASPROCASUR), Asesoría Quintero, GALP Costa Occidental de Huelva COSTALUZ, Ayuntamiento de Isla Cristina, Universidad del Algarve y Universidad de Huelva, así como otros armadores del Golfo de Cádiz en la zona de Isla Cristina (Figura 11).

La Exposición ‘Tecnologías y Conocimiento Azul’ ubicada en el C.I.T. Garum de Isla Cristina estuvo abierta al público durante el último trimestre de 2021 (Figura 12). Se hizo especial hincapié en incluir contenidos destinados a la comunidad educativa en sus diferentes etapas para sensibilizarlos sobre la importancia del conocimiento y protección de los mares y océanos y de la vinculación de éstos con el sector pesquero-acuícola. De esta forma, se consiguió que la Exposición fuese visitada por diferentes asociaciones y entidades locales así como por más de 1.500 escolares de primaria y secundaria (Figura 13).



**Figura 12.** Inauguración de la Exposición ‘Tecnologías y Conocimiento Azul’ ubicada en el C.I.T. Garum de Isla Cristina (Huelva) (8 de noviembre de 2021)





**Figura 13.** Visita de escolares a la Exposición 'Tecnologías y Conocimiento Azul' ubicada en el C.I.T. Garum de Isla Cristina (Huelva)



**Figura 14.** Paneles con temática 'La Mar en Femenino' en la Exposición 'Tecnologías y Conocimiento Azul' ubicada en el C.I.T. Garum de Isla Cristina (Huelva)



Una de las temáticas de los paneles de esta exposición estuvo dedicada a la igualdad de género en el sector pesquero-acuícola. Titulada 'La Mar en Femenino' recogió una descripción del papel que la mujer ha jugado a lo largo de la historia en las actividades relacionadas con la pesca, el marisqueo y la acuicultura (Figura 14).



Figura 15. Noticia publicada en el periódico Huelva Información sobre la Exposición 'Tecnologías y Conocimiento Azul' (9 de noviembre de 2021)



Figura 16. Reportaje publicado en el suplemento ABC EMPRESA relativo a la aplicación de nuevas tecnologías en el sector pesquero (25 de abril de 2021)

Los avances y soluciones conseguidos durante la ejecución del Proyecto fueron el objetivo de noticias en medios de comunicación impresos y digitales de tirada regional y nacional -ABC, El Correo de Andalucía, Diario de Cádiz y Huelva Información- (Figuras 15 y 16) así como en medios audiovisuales regionales de radio (Canal Sur Radio) y televisión (Programa EnRed del Canal Sur Televisión) (Figura 17).



**Figura 17.** Reportaje sobre el Proyecto KTTSeaDrones en el Programa EnRed de Canal Sur Televisión

También hay que destacar como acciones relevantes realizadas en el año 2021: (a) La presentación de resultados del Proyecto en la Noche Europea de los Investigadores 2021 con el taller 'KTTSeaDrones: Tecnologías y Conocimiento AZUL' (Figura 18); (b) La participación en el evento internacional 'OCEAN HACKATHON 2021' (Figura 19) presentando una solución al reto 'natural productivity and fish population estimation by ROV' aplicando los conocimientos adquiridos con KTTSeaDrones; y (c) La programación de rutas guiadas, de alumnos de Secundaria y Bachillerato del municipio de Isla Cristina (Huelva), por los laboratorios de Tecnologías de la Información, de Sistemas Electrónicos y Mecatrónica y de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva donde se ha trabajado en el diseño, desarrollo y evaluación de sonares y sensores para la visualización, estimación y monitorización de peces en balsas de esteros mejorados de producción acuícola.



**Figura 18.** Taller 'KTTSeaDrones: Tecnologías y Conocimiento AZUL' en la Noche Europea de los Investigadores 2021 (24 de septiembre de 2021)



**Figura 19.** Propuesta de soluciones al reto 'natural productivity and fish population estimation by ROV' en el evento internacional 'OCEAN HACKATHON 2021' (5 al 7 de noviembre de 2021)

## 5. Acciones de divulgación en el año 2022

En el último año de ejecución del Proyecto, la actividad 6 de comunicación ha sido prioritaria. Se ha seguido trabajando en la promoción, difusión y transferencia de los conocimientos, experiencias y resultados obtenidos en cada una de las actividades mediante el desarrollo de las siguientes actuaciones:

(a) Redacción, edición y publicación de este manual de resultados que se constituye como un Informe Ejecutivo que puede servir de referente para el uso y aplicación de nuevas tecnologías para la monitorización de diferentes parámetros y factores que ayuden en una mejor planificación de las operaciones realizadas en el sector marino y pesquero-acuícola y en la gestión óptima de las zonas de litoral.

(b) Edición y producción de un vídeo de resultados como instrumento fundamental de presentación y divulgación del Proyecto. Recoge imágenes de todos los equipos aéreos y acuáticos en operación durante las pruebas experimentales realizadas y es una síntesis de todas las acciones ejecutadas con sus correspondientes conclusiones.

(c) Visitas guiadas de alumnos de Secundaria y Bachillerato a las Universidades de Huelva y del Algarve para conocer *in situ* los laboratorios



**Figura 20.** Visitas de alumnos de Secundaria y Bachillerato de Isla Cristina a las Universidades de Huelva y del Algarve: (a) En la foto izquierda, recepción de alumnos en el Campus de Gambelas (Faro) de la Universidad del Algarve; y (b) En la foto derecha, alumnos en el laboratorio de Sistemas Electrónicos y Mecatrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva



donde los grupos de trabajo están diseñando, desarrollando, validando y poniendo a punto todos los sensores, equipos y aplicaciones informáticas que facilitarán la monitorización en tiempo real de especies piscícolas en balsas de esteros mejorados y en zonas litorales (Figura 20).

(d) Celebración el 8 de julio de 2022 de la Jornada sobre ‘Transferencia de Tecnología para la Pesca, Acuicultura y Gestión del Litoral’ en el Salón de Grados de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva. Se presentaron los principales resultados conseguidos durante el desarrollo del proyecto KTTSeaDrones y se invitó a diferentes agentes socio-económicos para compartirlos y debatirlos y así analizar su implementación para la consecución de productos, desarrollos y servicios que apoyen una Economía Azul diversificada y sostenible (Figura 21).



**Figura 21.** Inauguración de la Jornada ‘Transferencia de Tecnología para la Pesca, la Acuicultura y Gestión del Litoral (proyectos, soluciones y casos de éxito)’ (8 de julio de 2022)

Esta Jornada se dividió en tres bloques de trabajo: gestión del litoral, pesca y acuicultura. En el bloque de gestión del litoral se enfatizó en la necesaria promoción de medidas y acciones coordinadas en el que participen todos los agentes socio-económicos vinculados al sector. En el bloque de la pesca se analizó la aplicación de nuevas tecnologías que podrían garantizar la consecución de una planificación estratégica del sector pesquero que permita la compatibilización de la actividad económica de armadores y pescadores con la conservación de los ecosistemas marinos. En el bloque de acuicultura se planteó la necesidad de mejorar el conocimiento científi-

co-técnico para apoyar y fomentar el cultivo de especies acuícolas en zonas de esteros, actividad económica tradicional ligada a espacios de gran valor ambiental de la región transfronteriza Andalucía-Algarve (Figuras 22 y 23).



**Figura 22.** Mesa redonda sobre propuestas y soluciones para la pesca en la Jornada 'Transferencia de Tecnología para la Pesca, Acuicultura y Gestión del Litoral' (8 de julio de 2022)



**Figura 23.** Mesa redonda sobre propuestas y soluciones para la acuicultura en la Jornada 'Transferencia de Tecnología para la Pesca, Acuicultura y Gestión del Litoral' (8 de julio de 2022)

## 6. Referencias

Todas las noticias, resultados, informes técnicos y ejecutivos del Proyecto KTTSeaDrones pueden ser consultadas a través de la página web del Proyecto (<https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones>), las redes sociales Facebook (<https://www.facebook.com/KTTSeadrones> y <https://www.facebook.com/juan.gutest.9>) e Instagram (<https://www.instagram.com/kttseadrones/>) y en el canal KTTSeaDrones de YouTube.







# Interreg

## España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



UNIÓN EUROPEA  
UNIÃO EUROPEIA



## KTTSeaDrones

**KTTSeaDrones - Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras (POCTEP 0622\_KTTSEADRONES\_5\_E) cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER a través del programa Interreg V-A España - Portugal (POCTEP) 2014-2020**

ISBN 978-84-09-42392-7



9 788409 423927

Este libro dispone de versión EBOOK