

Acción 1.1.

Nuevos sistemas de captación y análisis de
datos de origen marino



Entregable 1.1.2.

Protocolos de homogeneización, uso y
análisis de sensores y datos

Coordina: IIM-CSIC

Participan: CETMAR, Universidade do Algarve, Universidade de Evora, CEiMAR, AGAPA

Coordinación y edición:

Laura G. Peteiro (IIM-CSIC)
Fran Saborido Rey (IIM-CSIC)

Contribuciones (por orden alfabético):

Pedro Almeida (UEvora)
Alex Alonso (IIM-CSIC)
Jose Juan Alonso (CEiMAR)
Pablo Álvarez (CETMAR)
M. J. Álvarez-Fernández (IIM-CSIC)
Xosé Antón Álvarez-Salgado (IIM-CSIC)
Jose MF Babarro (IIM-CSIC)
Vânia Baptista (UAlgarve)
Ana Barbosa (UAlgarve)
Carmen G. Castro (IIM-CSIC)
Inês Cerveira (UAlgarve)
Paula Conde (IIM-CSIC)
Jessica Cremades (UAlgarve)
Joana Cruz (UAlgarve)
Fernando del Castillo (AGAPA)
Rita Domingues (UAlgarve)
João Encarnação (UAlgarve)
Noelia M. Fajar (IIM-CSIC)
Miguel Gil (IIM-CSIC)
J. Severino P. Ibánhez (IIM-CSIC)
David Jacinto (UEvora)
Laura Moreno (IIM-CSIC)
Benjamin Mosley (UAlgarve)
Gonzalo Mucientes (IIM-CSIC)
Fiz F. Pérez (IIM-CSIC)
Laura G. Peteiro (IIM-CSIC)
Fran Saborido Rey (IIM-CSIC)
Bernardo Silva (UEvora)
Alexandra Teodosio (UAlgarve)
Silvia Torres (CETMAR)
Antón Velo (IIM-CSIC)
Juan Vidal (CEiMAR)

Tabla de contenido:

1. Introducción y objetivos.....	5
2. Tecnologías emergentes para cubrir las necesidades de observación de la economía azul.....	9
2.1. Sensores.....	11
2.1.1 Sensores de Temperatura y Salinidad	12
2.1.2 Sensores de Oxígeno	15
2.1.3 Sensores de Radioisótopos.....	20
2.1.4 Sensores de pH.....	24
2.1.5 Sensores para la caracterización de la materia particulada.....	30
2.1.6 Sistemas de captación de imágenes.....	34
2.1.6 Sensores acústicos.....	41
2.1.6.1 Sensores acústicos pasivos.....	43
2.1.6.1.1 Sistemas de Telemetría Acústica	43
2.1.6.2 Sensores acústicos activos	52
2.1.7 Sensores genéticos.....	53
2.1.8 Biosensores	55
2.2 Plataformas de observación.....	59
2.2.1 Satélites	59
2.2.2 Plataformas “ <i>in situ</i> ”.....	66
2.2.2.1 Buques oceanográficos.....	67
2.2.2.2 Buques de oportunidad	71
2.2.2.3 Plataformas oceanográficas fijas	74
2.2.2.4 Plataformas de deriva o drifters.....	78

2.2.2.5 Drones aéreos o Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs).....	80
2.2.2.6 Drones superficiales o Vehículos superficiales no tripulados (Unmanned Surface Vehicles – USVs)	81
2.2.2.7 Vehículos submarinos operados remotamente (Remotely Operated Vehicles- ROVs)	84
2.2.2.8 Vehículos submarinos autónomos propulsados (Autonomous Underwater Vehicles - AUVs)	86
2.2.2.9 Gliders	88
3. Conclusiones y recomendaciones finales.....	90
4. Bibliografía.....	93

1. Introducción y objetivos

Pese a la superficie que ocupan los océanos en nuestro planeta (71%) y la reconocida relevancia de los mismos para la regulación del clima, el suministro de alimentos, nuestra salud y en general la de todos los organismos de la tierra, así como nuestro bienestar socio-económico y cultural, el océano sigue siendo nuestro gran desconocido.

Las áreas oceánicas, estuarinas y costeras son vastas y, a menudo, de difícil acceso y, por lo tanto, generalmente no se conocen con precisión (menos del 20% de los fondos marinos se ha cartografiado) y se carece de sistemas de monitorización adecuados. Sin embargo, el seguimiento del estado de los océanos es necesario para caracterizar y comprender las dinámicas y vulnerabilidades costeras y oceánicas a diferentes escalas temporales y espaciales y para medir el impacto de las condiciones globales y locales, y de las actividades humanas, que nos permitan garantizar un uso sostenible de los recursos marinos, así como prepararnos para las condiciones futuras.

La declaración por parte de la UNESCO de la Década de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030), refleja el consenso mundial en la necesidad de acelerar los avances en ciencias oceánicas para lograr una mejor comprensión del océano y ofrecer soluciones para lograr la Agenda 2030 de desarrollo sostenible.

A nivel internacional, los océanos representan la nueva frontera de las políticas ambientales y, al mismo tiempo, constituyen la base de la economía azul sobre la cual se enfocan las estrategias económicas globales, regionales y locales. El fundamento de las decisiones políticas sobre el uso y conservación de los océanos y sus recursos debe ser la información científica generada y basada en observaciones repetitivas que permitan realizar evaluaciones permanentes sobre el estado de los océanos

La implementación de redes de monitorización cada vez más completas, pretende contribuir no sólo a ampliar el conocimiento sobre las complejas dinámicas oceánicas y mejorar nuestras capacidades de modelado y predicción,

sino también a implementar una economía azul sostenible basada en el conocimiento.

El valor de las observaciones oceánicas es reconocido internacionalmente y, en las últimas décadas se han ido incrementando los esfuerzos conjuntos para generar sistemas de observación globales.

Desde la creación del Sistema Global de Observación de los Océanos (GOOS, por sus siglas en inglés) en 1991 por parte de la COI-UNESCO, hasta la declaración de la Década de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030), se ha avanzado mucho en el establecimiento de estándares de observación, almacenamiento y disponibilización de datos brutos y productos específicos para evaluar el estado y evolución de la salud de los océanos y el impacto de nuestras interacciones.

Existen a su vez iniciativas a nivel europeo, como *Copernicus Marine Service*, programa coordinado y gestionado por la UE, que ofrece servicios de información basados en observaciones satelitales, datos in situ (no satelitales) y modelos numéricos. Este servicio, se coordina y complementa con la Red Europea de Observación y Datos Marinos (EMODNET), que centraliza los programas de monitoreo y los centros de gestión de datos marinos “in situ” de los estados miembros de la UE en una estructura única.

Ambas plataformas, aportan indicadores relevantes para una variedad de sectores de la economía azul, incluyendo la pesca, la acuicultura, el turismo, el transporte marítimo, la energía y la gestión de riesgos.

Estas estructuras globales de observación y organización de la información son vitales, pero requieren a su vez del mantenimiento de Observatorios Costeros nacionales y regionales, que pueden atender a las necesidades locales, y pueden resultar más económicas y operativas para la observación de patrones regionales, así como desarrollar productos e indicadores específicos para las prioridades locales (i.e. acuicultura, pesca, etc.).

El mejor enfoque para obtener esta información es a través de un sistema de observación oceánica multidisciplinario y transdisciplinario que promueva los esfuerzos regionales de monitoreo y los organice en una red global.

Las últimas décadas han visto una increíble variedad de avances tecnológicos, y nos encontramos ahora inmersos en una cuarta revolución industrial, que se está construyendo sobre la revolución digital, pero que se caracteriza por una fusión de tecnologías que está difuminando las líneas entre las esferas física, química, digital y biológica.

Disponemos ahora de una capacidad mucho mayor de recopilar datos de diferente índole de nuestro entorno. Además de la recopilación de datos más rápida e intensiva, se está mejorando drásticamente nuestra capacidad para convertir datos en conocimiento mediante el aprendizaje automático y la inteligencia artificial y con ello el potencial para lograr una gestión adaptativa de la costa y los océanos en respuesta a unos cambios y amenazas que comprendemos cada vez mejor. Las tecnologías emergentes que se integran en este nuevo ecosistema de datos, serán las que nos abran el camino hacia una gestión ecosistémica y sostenible de los recursos en el futuro próximo.

Pero este rápido avance en nuestra capacidad de observación y recopilación de datos complejos, requiere también de un enfoque integrado para garantizar que se considere la información sobre todos los componentes relevantes y sus interacciones. Para observar y predecir adecuadamente el estado del océano, atendiendo a diferentes disciplinas y escalas, las observaciones del océano son más eficaces si se realizan desde múltiples plataformas in situ y remotas bien coordinadas.

Al extender los sistemas de observación existentes a una red global, necesitamos identificar, obtener consenso y medir un conjunto central de variables centradas en cuantificar los cambios bióticos y abióticos en el océano. Esto requiere la integración de las observaciones biogeoquímicas y biológicas con el sistema de observación física en continuo desarrollo.

Por lo tanto, un enfoque integrado requiere una colaboración efectiva entre los diferentes dominios de experiencia, a través de disciplinas y tecnologías, para combinar de manera óptima tales observaciones multiplataforma en un conjunto consistente de datos.

Este reto de integración de multi-plataformas de observación de diferente índole en un marco internacional que abarca la región costera

Atlántica de la Península Ibérica, es uno de los que pretende abordar el proyecto Atlazul. En concreto dentro de su Acción 1.1 “Nuevos sistemas de captación y análisis de datos de origen marino” encuadrada dentro de la Actividad 1 “Generando Conocimiento Azul”, se apuesta por la integración de observaciones físicas, biogeoquímicas y biológicas a diferente escala espacio-temporal, para avanzar desde diferentes disciplinas en la obtención de protocolos y mapas de ruta, que faciliten el intercambio de conocimiento y el avance hacia un sistema de observación global y transfronterizo.

En los siguientes apartados del presente entregable, se analizarán diferentes aspectos a tener en cuenta para la selección de plataformas de observación, sensores físicos, biogeoquímicos y biológicos, así como para el almacenamiento y tratamiento de la información obtenida para convertirla en información reutilizable y eficaz para diferentes propósitos. Estos apartados partirán de una bibliografía básica del estado del arte de los diferentes tipos de plataformas y sensores y avanzará a través de la experiencia propia ganada durante este proyecto para establecer recomendaciones y protocolos consensuados de actuación.

2. Tecnologías emergentes para cubrir las necesidades de observación de la economía azul

Mientras que los enfoques tradicionales de evaluación de un sector de la economía azul concreto, por ejemplo, las pesquerías, se centraban en una única especie o problemática, se está intentando adoptar un enfoque holístico que permita un manejo integral de los ecosistemas marinos, lo que requiere de un conocimiento profundo de las interacciones entre las diferentes componentes del mismo y nuestras actividades (Figura 1). Este enfoque requiere integrar grandes cantidades de información heterogénea, lo que supone un desafío para la gestión de los recursos, pero plantea un escenario prometedor, para una gestión informada y flexible, que consiga alcanzar la sostenibilidad de los diferentes sectores que integran la economía azul.

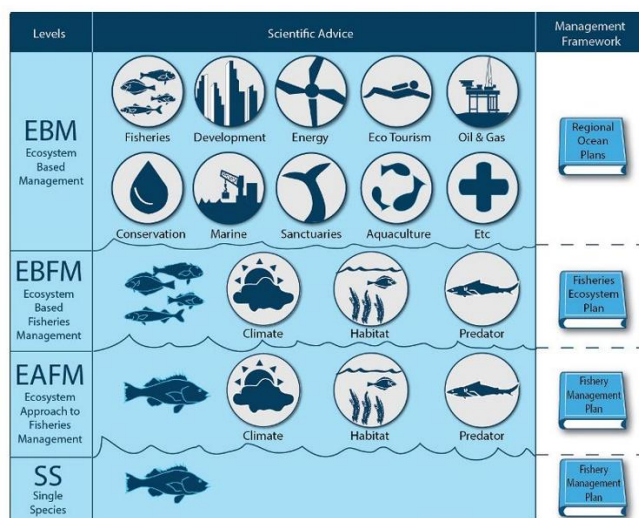


Figura 1. Información necesaria para los diferentes enfoques de gestión de la pesca y el ecosistema marino. Extraído de (Schmidt et al. 2019).

Esta aproximación requiere de observaciones de alta calidad a escalas espacio-temporales que permitan resolver procesos ecológicos críticos para una gestión adecuada de los recursos. El desarrollo de sensores y plataformas de observación más fiables y rentables, así como de tecnologías de procesamiento masivo de información han permitido incrementar esa resolución espacio-temporal, proveyendo información relevante no sólo sobre

la dinámica y comportamiento de las poblaciones objetivo de la pesca, sino también de las interacciones con otras especies, sus hábitats en un entorno que cambia rápidamente y otras actividades humanas que puedan compartir un mismo espacio.

Los sensores miden variables físicas o químicas como la luz, el sonido, la temperatura, etc. y las traducen en información digital o datos, que constituyen la base de la monitorización de los océanos. Más y mejores sensores significan más y mejores datos. La evolución de los sensores está impulsada por la miniaturización y la reducción de las necesidades de energía para su funcionamiento que, junto con una mayor capacidad de captar energía solar, eólica u undimotriz, permite que cada vez seamos capaces de colocar sensores durante más tiempo en una mayor variedad de plataformas (Figura 2).

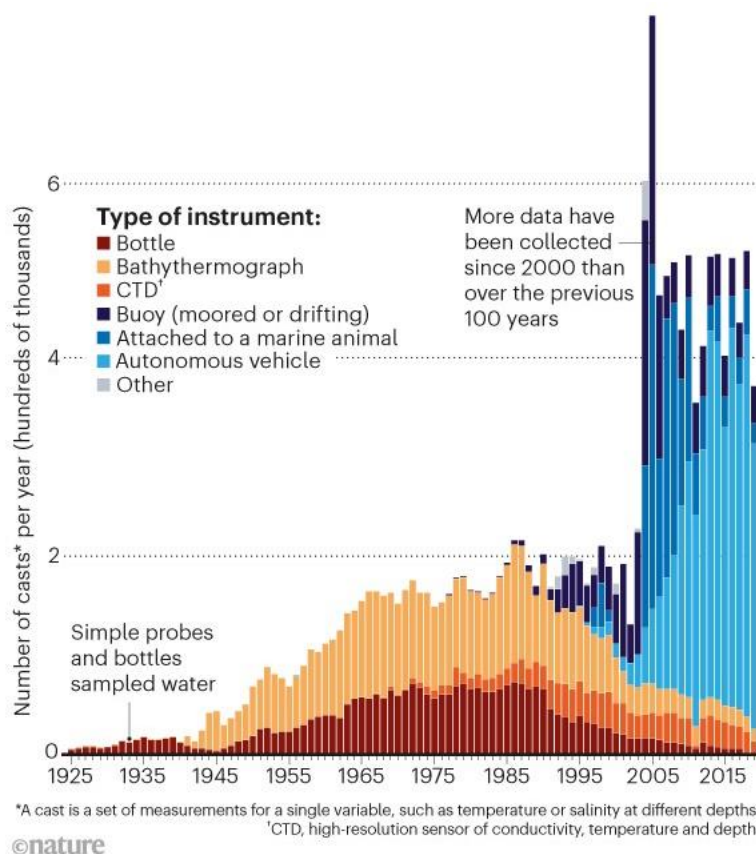


Figura 2. A) Evolución en el número de observaciones realizadas en el océano durante el último siglo. Extraído de (Brett et al. 2020)

2.1. Sensores

A continuación, revisaremos los principales avances que se están realizando en cuanto a sensórica marina, centrándonos principalmente en los sensores que han sido abordados en el proyecto azul, con particular atención a los sensores biogeoquímicos, pues son en los que se han realizado los mayores avances en las últimas décadas.

Los sensores biogeoquímicos registran datos clave, como los niveles de oxígeno, dióxido de carbono, el pH del agua, concentraciones de nutrientes, clorofila, etc. que permiten estudiar procesos clave como el cambio climático y su interacción con el clima. Pese a su relevancia, el registro de estas variables de forma sistemática está mucho menos extendido que el de variables físicas, debido a la mayor complejidad y coste de la adquisición de estos datos.

Existen iniciativas como la del proyecto [GLODAC](#) (Global Ocean Data Analysis Project) para aunar los esfuerzos en la recogida de estas variables, y que valida, y pone a disposición del público en general datos biogeoquímicos recolectados en diferentes iniciativas, que resultan fundamentales para la cuantificación del sumidero de carbono oceánico, el estudio de la acidificación del océano o el estudio de los ciclos biogeoquímicos.

Además, cada vez hay más iniciativas para desarrollar sensores de bajo coste, que permitan democratizar las observaciones del medio marino y ampliar la cobertura espacial y temporal de las mismas. A continuación, se analizan los avances más significativos que se están llevando a cabo para reducir los costes asociados con el desarrollo de sensores biogeoquímicos, los cuales se resumen en la Tabla 1, extraída de (Wang et al. 2019).

Parameters	Cost-effective sensing technology	Traditional cost level	Cost-effective level	TRL for cost-effective sensors ¹	Availability for cost-effective sensors ²
DO	Luminescence quenching (optode)	\$\$\$	\$	5	Individual researchers
	Clark-type electrode	\$\$	\$	9	Individual researchers; commercial
pH	Spectrophotometric	\$\$\$	\$	7	Individual researchers; commercial
	Spectrophotometric	N/A ³	\$\$ (Lab-on-a-chip)	7	Individual researchers; pre-commercial
Nitrate	Electrochemical	\$\$\$	\$	6	Individual researchers; commercial
	Fluorescence	\$\$\$	\$\$ (Lab-on-a-chip)	5	Individual researchers
Ammonia/Ammonium	Lab-on-a-chip (colorimetric)	N/A	\$\$	6	Individual researchers; pre-commercial
	Reagentless/electrochemical	N/A	\$\$	5	Individual researchers
Phosphorous	Lab-on-a-chip (colorimetric)	N/A	\$\$	7	Individual researchers; pre-commercial
	Reagentless/electrochemical	N/A	\$\$	6	Individual researchers; pre-commercial
Particle and POC	OBS	\$\$	\$	8	Commercial
	ABS	\$\$	\$	8	Commercial
Phytoplankton biomass	Fluorometric	\$\$\$	\$\$	9	Commercial
Plankton ⁴	Optic (microplankton size fraction > 10 µm)	\$\$\$\$\$	\$\$\$	4	Individual researchers
	Optic (mesoplankton size fraction > 100 µm)	\$\$\$\$\$	\$\$	7	Individual researchers; Commercial
Zooplankton and fish abundance and distribution	Acoustic	\$\$\$\$\$	\$\$\$\$	9	Commercial
Microbes, phytoplankton and zooplankton	Genetic	\$\$\$\$\$	\$\$\$\$	5–6	Individual researchers; Commercial

\$-\$\$\$\$\$ signs: relative sensor cost level. ¹ Technology readiness level (TRL). These are estimated TRLs based on literature review. ² See text for more details. ³ Not applicable. ⁴ Phytoplankton and zooplankton biomass and functional diversity.

Tabla 1 Caracterización de los nuevos desarrollos que se están llevando a cabo para el desarrollo de tecnologías de detección in situ de parámetros bio-geoquímicos y estimación de la reducción en coste que supone respecto a las tecnologías tradicionales, así como caracterización del TRL en que se encuentra la nueva tecnología. Extraído de (Wang et al. 2019).

2.1.1 Sensores de Temperatura y Salinidad

Conceptos básicos para la selección de sensores

En el medio marino, dos de los parámetros ambientales que más influyen en la distribución de las especies son la temperatura y la salinidad. En el caso de la temperatura, es especialmente importante crear bases de datos a largo plazo para controlar los efectos del cambio climático y la aparición de fenómenos meteorológicos extremos (García-Soto et al. 2021). En los ambientes de transición, la salinidad constituye uno de los parámetros que más condicionan la distribución de las especies. En los estuarios y entornos de lagunas costeras, donde las variaciones de estos parámetros ambientales son constantes y sustanciales a nivel diario, es especialmente importante vigilarlos

para comprender la distribución espacial de las especies de fauna y flora (i.e., (Thiel et al. 1995; Marshall y Elliott 1998).

Los CTDs, (Conductivity, Temperature, Depth) son una herramienta esencial utilizada en todas las disciplinas de la oceanografía, que permiten medir las variaciones en conductividad y temperatura del agua en relación con la profundidad. A partir de estos tres parámetros, se derivan los valores de salinidad, densidad o velocidad del sonido, permitiendo identificar diferentes masas de agua, así como diversos procesos físicos, químicos o biológicos.

Un CTD es una serie de pequeñas sondas que pueden desplegarse de forma independiente o incorporarse en una variedad de plataformas de observación, como vehículos operados a distancia, drifters o boyas de observación fijas.

Los CTD pueden incorporar una bomba, que asegura un flujo constante de agua atravesando los sensores, o pueden no tener incorporado dicho sistema de bombeo. Los CTD sin bombeo tienen un menor consumo de energía, así como una menor susceptibilidad de bloqueos en el sistema de muestreo, sin embargo, los que incorporan bombeo, proporcionan un tiempo de respuesta del sensor más estable y mediciones más precisas.

Para su despliegue en estaciones fijas, puede prescindirse del sensor de presión, puesto que se va a mantener a una profundidad constante. Así mismo, cuanto menor sea la frecuencia de muestreo necesaria y por tanto también menor el tiempo de respuesta requerido para el sensor, se puede alcanzar una mayor miniaturización de los mismos y una mayor autonomía de las baterías y duración de la memoria de almacenamiento.

Dependiendo de las aplicaciones para las que se vayan a emplear los datos, se requieren diferentes frecuencias de muestreo. Por ejemplo, desde los CTD más sofisticados, que permiten hasta 24 medidas por segundo (p.ejemplo el Sea-Bird 9 plus), hasta los más sencillos que recogen cuatro medidas por segundo (p. ej. Sea-Bird 19 plus), se produce una disminución en la resolución espacial y temporal de los datos obtenidos, pero también una reducción sustancial en el coste del equipamiento, así como en el tamaño y grado de compactación del mismo.

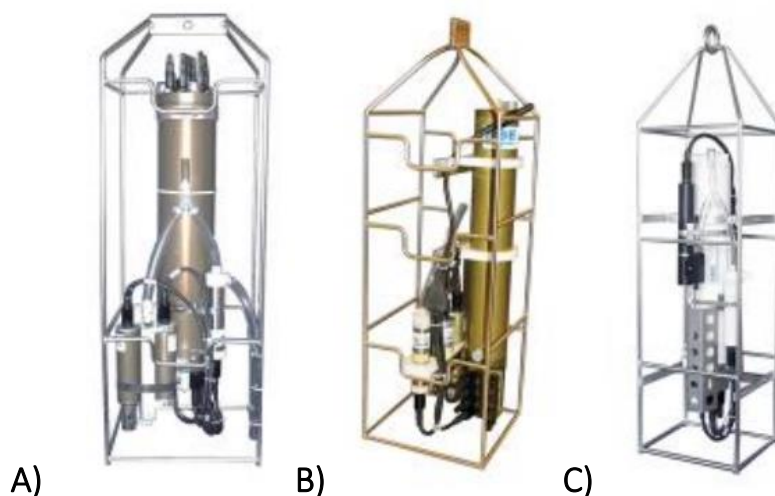


Figura 3 Algunos ejemplos de CTD de la marca Seabird, que varían en su frecuencia de muestreo **(A)** SBE 9plus con una frecuencia de muestreo de 24Hz **(B)** SBE 25plus con una frecuencia de muestreo de 16Hz y **(C)** SBE19plus V2 con una frecuencia de 4Hz.

Para aplicaciones en estaciones fijas a baja profundidad, existen “*dataloggers*” más sencillos que recogen Conductividad y Temperatura, permitiendo seguimientos en continuo más eficientes y económicos para este tipo de ambientes.

Por ejemplo, el [HOBO U-24](#) (Figura 4) es un dispositivo que pesa menos de 200 gramos y que permite registros de ambas variables cada segundo, con una autonomía que se puede extender hasta los 3 años reduciendo la frecuencia de muestreo a una medida por minuto. Estas características lo convierten en el dispositivo más indicado para despliegues en estuarios poco profundos como el del Guadiana en Portugal, permitiendo la implementación de medidas en continuo de variables esenciales a un bajo costo y con resolución suficiente para acompañar la interpretación de procesos rutinarios de monitorización de la composición del fito- y zooplancton que se llevan a cabo en dicho estuario y que forman parte de las actuaciones de este proyecto.



Figura 4 Sensor de temperatura y conductividad, modelo U-24 de la marca HOBO

Mantenimiento de sensores y gestión de datos

El uso de sensores ambientales ópticos requiere su mantenimiento periódico para reducir el *biofouling* en los sensores (la fijación de organismos que cubren el equipo), que es uno de los factores que más influyen en la capacidad de recoger datos precisos y fiables (i.e., (Garel et al. 2009; Garel y Ferreira 2011). En cuanto al *biofouling*, la periodicidad de las acciones de mantenimiento dependerá del lugar donde se encuentre el equipo. Ciertos entornos (estuarios, costas u océanos) pueden implicar la necesidad de un mantenimiento mensual, mientras que otros cada 3 o 6 meses. En el caso del registrador de datos HOBO U24, cuando se opera en ambientes de estuario, se espera que el sensor óptico se limpie al menos cada 3 meses. Se puede recomendar una calibración cada 3 años junto con un cambio de batería.

Los fabricantes de ciertos sensores (dataloggers), como el HOBO U24, recomiendan una calibración previa al despliegue, así como tomar lecturas al inicio de la recogida y al final conjuntamente con el sensor y una sonda multiparamétrica calibrada. Estas lecturas pueden introducirse en el software 'HOBOWare Conductivity Assistant' para ajustar los datos del sensor y compensar cualquier desviación de las lecturas a lo largo del despliegue. Los datos se almacenan en la memoria interna del sensor y se descargan en un PC a través de la base de lectura propia de HOBO.

2.1.2 Sensores de Oxígeno

Conceptos básicos para la selección de sensores

El oxígeno es crítico para todos los organismos aeróbicos y juega un papel clave en los ciclos biogeoquímicos globales. En las últimas décadas, el océano ha perdido el 2% del inventario de oxígeno disuelto (DO) (Schmidtke, Stramma, y Visbeck 2017). La hipoxia ($DO < 2 \text{ mg l}^{-1}$) es un umbral crítico asociada con eventos de eutrofización, causando mortalidad en los organismos, alteraciones en los servicios del ecosistema o en los ciclos biogeoquímicos (i.e., (Yin, Lin, y Ke 2004; Coffin et al. 2018). La disminución del oxígeno disuelto, la desoxigenación, se ha convertido en uno de los principales riesgos directamente asociados con el cambio climático además del calentamiento (Gruber 2011). La pérdida de oxígeno se atribuye principalmente a una reducción en la solubilidad del oxígeno debido al calentamiento, una circulación oceánica más lenta, una menor mezcla de la columna de agua y un aumento en la respiración microbiana. Además, la eutrofización costera también induce la desoxigenación costera por el aumento de la carga de nutrientes antropogénicos (Rabalais 2015). La disminución del oxígeno y la expansión de las aguas con poco oxígeno afectan no solo a la biogeoquímica de los océanos, sino también afectan a todos los niveles tróficos en función de sus necesidades de oxígeno.

El oxígeno juega además un papel clave para evaluar el estado del ciclo del carbono. Los sensores de oxígeno son uno de los sensores biogeoquímicos más maduros actualmente.

El método estándar para analizar el contenido de oxígeno en el agua es una precipitación química del oxígeno disuelto seguido de una valoración potenciométrica. El método fue descrito por primera vez por (Winkler, LW 1888) y desde entonces se ha mantenido como estándar general. La valoración de Winkler casi siempre se realiza en el laboratorio. Es por tanto un trabajo analítico que requiere mucho tiempo y exige un cuidado meticuloso. Por lo tanto, este no es un método adecuado para obtener datos *in situ* con alta resolución espacial y temporal.

Para mediciones *in situ* de oxígeno, los sensores utilizados generalmente siguen uno de los siguientes métodos de detección: (1) Detección

electroquímica tipo Clark, que es muy fácil de implementar en un sensor, pero que se considera menos preciso y con tendencia a derivar en sus medidas con el tiempo y (2) “quenching” o extinción de la luminiscencia, que es más preciso y es en el que se basa el desarrollo del óptodo de oxígeno que es la tecnología más empleada en sensores oceanográficos en las últimas décadas.

Los sensores electroquímicos (los llamados sensores tipo Clark), se han empleado ampliamente y son muy fácilmente miniaturizables, por lo que se han estado empleando para su incorporación junto con microsensors de Conductividad y Temperatura para desarrollar el [micro-CTDO](#), que permitirá la medición simultánea de estos tres parámetros utilizando un chip del tamaño de un sello (Figura. 5A). Ahora bien, estos sensores requieren una calibración relativamente frecuente (al menos una vez al mes) para obtener mediciones precisas de oxígeno.

La implementación de óptodo es relativamente reciente en la investigación acuática (i.e.(Klimant, Meyer, y Köhl 1995; Glud et al. 1999; Wenzhöfer, Holby, y Kohls 2001). El principio fundamental se basa en la capacidad de ciertas sustancias para extinguir la luminiscencia dinámica. En el caso del oxígeno, si un complejo de rutenio se ilumina con luz azul, se excita y emite una luz luminiscente roja con una intensidad, o vida útil, que depende de la concentración de oxígeno ambiental.

En las dos últimas décadas, los llamados óptodos, se han instaurado como una buena alternativa a los sensores electroquímicos. En cuanto a los sensores basados en los métodos ópticos, también se ha estado trabajando en la miniaturización de estos dispositivos para su colocación en una mayor diversidad de plataformas, incluyendo etiquetas de seguimiento en animales, como es el caso del DO-PAT (Dissolved oxygen pop-up satellite archival tag; Figura 5B) (Coffey y Holland 2015).

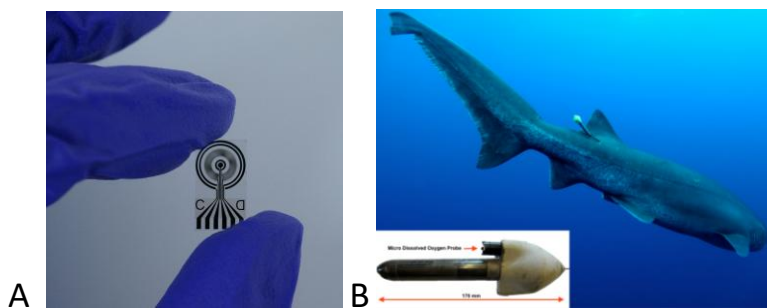


Figura 5. A) Micro-CTDO en desarrollo por el National Oceanographic Centre of the UK (NOC) y la University of Southampton. Foto extraída de la página [web](#) del NOC **B)** DO-PAT adherido a un ejemplar de *Hexanchus griseus* (Coffey y Holland 2015)

Los óptodos tienen varias ventajas sobre los sensores tipo Clark, entre las que destaca que son robustos y no requieren calibraciones tan frecuentes. Es precisamente por esto, por lo que los sensores de oxígeno escogidos para el refuerzo de la red de observación existente durante el proyecto Atlazul, son sensores tipo óptodo.

Existen distintos modelos de sensores tipo óptodo para fondeos en el medio marino en el mercado. Para la selección de los equipos debe tenerse en cuenta varias características, algunas relacionadas con (1) la zona de estudio, tales como la profundidad, la propia dinámica del local a monitorizar, la cantidad de sólidos en suspensión en el medio, etc. Por otro lado es necesario tener en cuenta la (2) duración y frecuencia del muestreo y por último es también muy relevante considerar la (3) probabilidad de bio-incrustación (incrustación biológica de organismos, tanto vegetal como animal, sobre la lámina de determinación de oxígeno, o “*biofouling*”).

Para un seguimiento continuo, se persigue que los sensores tengan la mayor autonomía posible en cuanto a la duración de la batería, siendo siempre un factor determinante sobre el modelo a elegir la cantidad de financiación disponible.

Entre los modelos desplegados dentro del proyecto Atlazul, para el caso de estudio del Estuario del Guadiana, se han seleccionado sensores compactos [HOBO U-26](#), de tan sólo 300 gramos de peso, que permiten una frecuencia de muestreo máxima de una medida por segundo y que pueden alcanzar una

autonomía de hasta 3 años reduciendo la frecuencia de muestreo a una medida cada 5 minutos.

Para las estaciones localizadas en las Rías gallegas, se ha optado por sensores de oxígeno [miniDO2T](#), dado que responden a las necesidades de muestreo con la ventaja de emplear un [cepillo mecánico](#) para eliminar el “*biofouling*”, lo que los hace más adecuadas para este ambiente de alta problemática de bio-incrustaciones para su mantenimiento.

Mantenimiento sensores y gestión de datos

Como se indicó anteriormente el biofouling es uno de los principales problemas de mantenimiento, pues puede interferir en la exactitud de las mediciones. En el caso del miniDO2T, el mantenimiento óptimo de la fina membrana sobre la que se calcula la extinción de la luminiscencia, es requisito fundamental para el registro de datos exactos. El uso de mecanismos anti-fouling, como el limpiador mecánico mencionado previamente, permite asegurar un buen funcionamiento del sensor durante un tiempo más prolongado. Por ejemplo el acoplado al miniDO2T, se ha programado con una frecuencia horaria, para cepillar y mantener limpia la membrana. En función del medio marino en donde se fondeen los sensores la bio-incrustación es más o menos intensa. Aún utilizando mecanismos anti-fouling como el descrito, es conveniente limpiar manualmente el sensor periódicamente, en el caso de zonas de alta bio-incrustación, las visitas deben ser como mínimo mensuales.

En el caso de otros sensores mencionados, como el sensor HOB0 U26, este tiene una cubierta de sensor que tiene una validez de 6 meses, tras los cuales debe ser repuesta. En ambientes de estuario, el equipamiento debe ser limpiado al menos cada 3 meses. En estos equipos, la instalación de una protección antiincrustante de cobre (<https://www.onsetcomp.com/products/replacements/u26-guard-2/>), ayuda a reducir drásticamente la fijación de organismos.

Se suele recomendar una calibración previa al despliegue de los sensores con una sonda multiparámetrica, además de una re-calibración como mínimo cada 3 años. Algunos sensores, como los HOB0 U26, tienen disponibles softwares específicos, como el “Dissolved Oxygen Assistan”, que permiten

utilizar los datos de calibración para compensar cualquier desviación, incluyendo factores de corrección para el desarrollo de bioincrustaciones.

Estos sensores suelen ser autocontenidos, de modo que los datos son registrados en una tarjeta SD de memoria. Dependiendo del sensor puede haber programas específicos de la marca comercial para su descarga, así como diferentes formatos de almacenaje de los datos obtenidos.

2.1.3 Sensores de Radioisótopos

Conceptos básicos para la selección de sensores

El compartimiento bentónico tiene una importancia crucial en la circulación de los elementos que sostienen los servicios ecosistémicos de las regiones costeras. El transporte de agua desde el sedimento hacia el agua suprayacente, independientemente de su origen y composición, se denomina Descarga Submarina de Agua Subterránea (SGD, del inglés Submarine Groundwater Discharge; (Burnett et al. 2003). La SGD generalmente ocurre cerca de la costa en sedimentos permeables e incluye tanto al agua de mar recirculada a través de los sedimentos como las aguas subterráneas continentales siempre que un acuífero costero esté conectado hidráulicamente con el mar y con un gradiente de presión positivo (Santos, Eyre, y Huettel 2012). Si bien las entradas fluviales a la zona costera están bien restringidas, lo que permite estimaciones relativamente precisas de la carga de solutos transportada al océano costero, la SGD ha sido ignorada sistemáticamente como un vector de transporte de solutos al mar costero debido a la dificultad en identificar y cuantificar esta fuente difusa de solutos.

Ya sea con origen continental o marino, con el paso del agua a través del sedimento costero se produce un enriquecimiento en compuestos originarios en los mismos que se pueden utilizar como trazadores de esta estrecha interacción sedimento-agua. Particularmente durante la última década, el uso de radioisótopos como trazadores de la SGD reveló parcialmente la ubicuidad geográfica y la magnitud de la descarga de aguas subterráneas continentales a escala global. Estimaciones recientes apuntan a que la descarga de agua subterránea es una fuente de agua y solutos muy significativa para el océano

costero (Cho et al. 2018). Además, la SGD es un fenómeno de transporte difuso de diferentes contaminantes de origen terrestre hacia la costa.

Hasta el momento aunque ha habido intentos de desarrollar sistemas de espectroscopia de masas subacuática *in situ* (Underwater Mass Spectroscopy), que permitirían la medición de diferentes gases disueltos en el agua simultáneamente todavía no existe ningún modelo comercial (Chua et al. 2016).

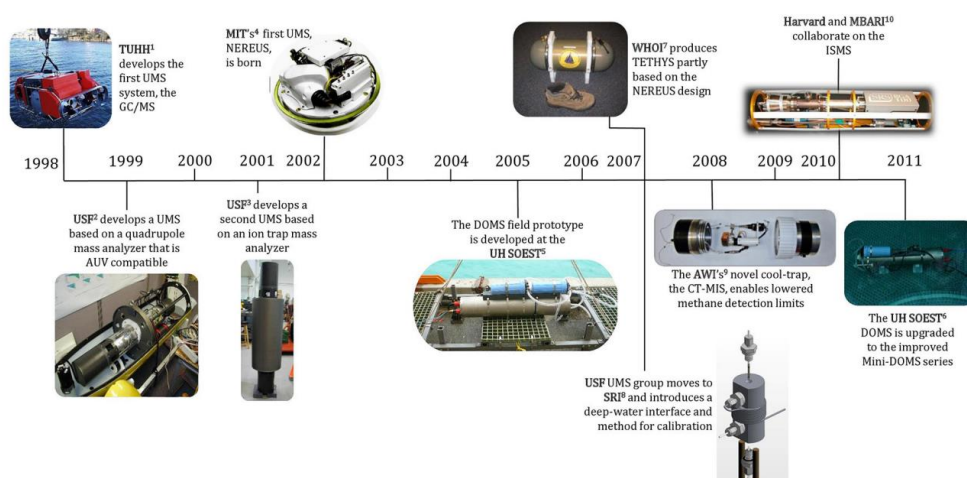


Figura 6. Línea temporal representando los principales avances en el desarrollo de sistemas *in situ* de espectrometría de masas. Extraído de (Chua et al. 2016).

Es por ello que dentro del proyecto Atlazul se está desarrollando un prototipo para la medición en semi-continuo de isótopos de radón. De entre los radioisótopos utilizados como trazadores de SGD, el radón es sin duda el mejor candidato para su monitorización en semi-continuo. Esto es principalmente por varias causas: a) el elevado enriquecimiento de las aguas intersticiales en radioisótopos comparado con las aguas superficiales, b) la relativa facilidad para medir el radón en comparación a otros radioisótopos, c) el hecho de ser un gas no reactivo, y d) el tener un tiempo de vida medio (3.8 días) comparable a la escala temporal de procesos de mezcla y reactividad costeros.

La configuración necesaria para determinar radón de forma semi-continua en agua de mar que se ha abordado durante el proyecto Atlazul (Figura 7) consta de las siguientes partes fundamentales:

- Bomba de agua. Al tratarse de un gas, la determinación de radón en agua de mar en una corriente continua de agua necesita una bomba sin cavitación.
- Equilibrador agua-aire. Los equipos de determinación de radón miden este gas en una corriente de aire. De esta manera, para determinar radón en agua es necesario equilibrar una corriente de aire con el contenido en radón de la corriente de agua. Existen diferentes opciones para ello, aunque todas ellas deben garantizar que el agua no entra en el circuito de aire para prevenir el deterioro de los sensores.
- Deshumidificador. El vapor de agua interfiere en las determinaciones de radón. El sistema de secado de la corriente de aire que entrará en el sensor de radón debe ser efectivo, fiable y lo más duradero posible.
- Sensor de radón. De entre los detectores de radón disponibles, el más utilizado para la detección de la SGD es el Rad7 de DurrIDGE (DurrIDGE Co., Inc., Estados Unidos). Esto es porque presenta una serie de características diferenciadoras de otros modelos y especialmente interesantes para el propósito en cuestión: es portátil, duradero, muy sensible y puede operar en modo continuo.

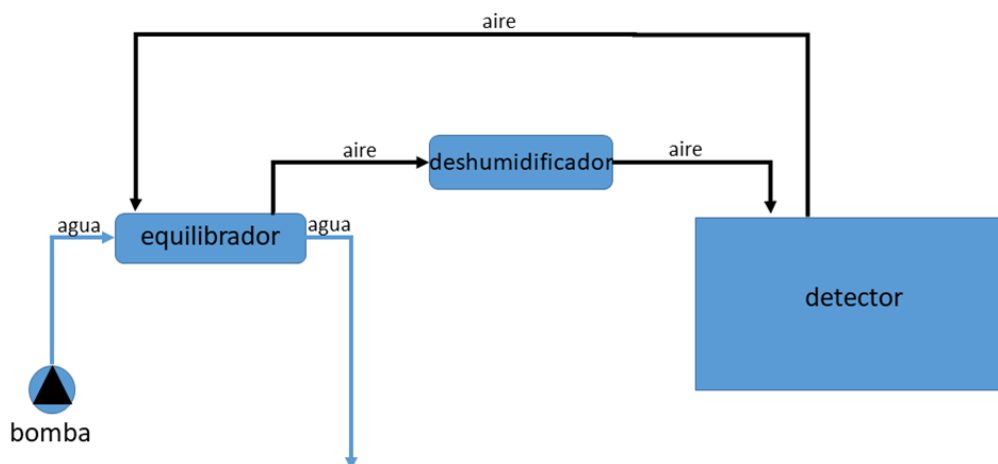


Figura 7. Esquema de la configuración necesaria para la monitorización de radioisótopos en agua de mar.

Mantenimiento sensores y gestión de datos

Al requerir un bombeo continuo de agua de mar, la parte de la configuración utilizada para la medición de radioisótopos en semi-continuo que está en contacto directo con el agua de mar requiere un mantenimiento periódico para evitar el corte del flujo por la proliferación de organismos o bloqueos físicos. El sistema contiene un filtro en la captación de agua lo que impide el bloqueo directo por la intrusión de material sólido en el sistema. Sin embargo, el *biofouling* puede ser problemático. Así, la inspección visual y recambio periódico de las mangueras por las que circula el agua y del equilibrador son necesarias (cada 15-20 días). Además, el isótopo padre del radón, el radio-226, tiene elevada capacidad de adsorción a las superficies. Una elevada adsorción de radio-226 en el conducto de circulación de agua supone una fuente adicional de radón que puede interferir con las mediciones. Con el cambio periódico de las mangueras y el equilibrador este problema queda extraordinariamente minimizado.

El sistema de deshumidificación de la corriente de aire consta de dos sistemas, uno eléctrico y otro químico. El deshumidificador químico pierde eficacia con el tiempo y necesita ser reemplazado periódicamente. Además, el sensor de radón ofrece mediciones de humedad en el aire que permiten detectar la pérdida de eficacia del sistema de deshumidificación u otros problemas relacionados como puede ser un problema con el flujo de agua. Así, la monitorización del contenido en agua de la corriente de agua es necesaria más allá de los períodos de mantenimiento periódico de la configuración.

Dependiendo de los niveles de radón encontrados, el detector puede sufrir deriva en las lecturas causada por saturación. Durante los períodos de mantenimiento periódicos, se recogen muestras discretas para la determinación de radioisótopos en el laboratorio y poder así evaluar si el detector está sufriendo deriva en las lecturas. Los datos extraídos del equipo en funcionamiento en semi-continuo serán así corregidos ante potenciales derivas con los datos obtenidos en el laboratorio y expresados finalmente en actividad de radioisótopo por unidad de volumen de agua (Bq m⁻³).

Si es el caso, el detector será sometido a un proceso de limpieza de los niveles de fondo en el laboratorio para su posterior reinstalación. Esta operación necesita de personal con formación específica en la recogida de muestras de gases y la medición de radioisótopos.

Finalmente, el detector de radón necesita calibraciones periódicas realizadas en las instalaciones del fabricante, con una periodicidad de dos-tres años.

En cuanto al almacenaje de la información, el equipo RAD7 almacena los datos en una memoria interna limitada a 999 determinaciones y que posteriormente pueden ser leídos y descargados con el software CAPTURE de DurrIDGE. En una monitorización continua, este número de determinaciones puede ser alcanzado rápidamente. De esta manera, haciendo uso del puerto serie del equipo, establecemos comunicación por hyperterminal con el equipo para así poder leer y descargar los datos, liberar la memoria interna e incluso poder anticiparse a problemas en las determinaciones como bloqueos en el bombeo del agua o derivas en las determinaciones. Los datos extraídos de esta manera se recogen en archivo de texto que puede ser posteriormente procesado con el software CAPTURE del fabricante del sensor.

2.1.4 Sensores de pH

Conceptos básicos para la selección de sensores

En el escenario actual de cambio climático, el CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera, producido principalmente por combustibles fósiles y deforestación (Friedlingstein et al. 2020). El CO₂ es captado y acumulado por los océanos, transformándose en otras especies químicas y acidificando el medio. Este hecho, tiene nefastas consecuencias para las aguas marinas y sus ecosistemas: la acidificación oceánica (OA), junto con el calentamiento global y la desoxigenación, son actualmente las tres mayores amenazas (Gruber 2011) al océano.

En 2015, la UNESCO aprobó un conjunto de [Objetivos de Desarrollo Sostenible](#) (SDG), donde el Objetivo número 14 es específico sobre los

océanos. Concretamente, el pH fue declarado Variable Esencial del Clima, lo cual lo convierte en un indicador de acidez media del mar ([Indicador 14.3.1](#)).

La vigilancia de la OA es una necesidad especial para la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (SDGs 13.2 y 14.3) en la que se establece la necesidad de realizar observaciones a escala mundial para conocer y comprender correctamente la OA, sus factores determinantes y sus implicaciones, así como, disponer de datos suficientes para desarrollar habilidades de predicción y sistemas de alerta temprana.

Una repercusión directa son las observaciones recientes en ecosistemas costeros, que han mostrado ritmos que duplican las observadas en océano abierto (Padin, Velo, y Pérez 2020) y que, a su vez, ha movilizó el interés de monitorizar la OA en ecosistemas como la Rías gallegas; donde existen importantes recursos económicos, ambientales y sociales relacionados con la acuicultura.

Por todo ello conocer y controlar el sistema del CO₂ en agua de mar es de vital importancia. La forma de caracterizar este complejo sistema es mediante las cuatro variables medibles del CO₂, que son carbono inorgánico total disuelto (DIC), la presión parcial de CO₂ (pCO₂), pH y alcalinidad total (TA). Se requieren mediciones de al menos dos de los cuatro parámetros para resolver el sistema y poder calcular, por ejemplo, los estados de saturación de CaCO₃.

Hoy en día existen soluciones comerciales para medir pCO₂ y pH en agua de mar. Los 2 tipos de sensores de pH más empleados son los espectrofotométricos, como el SAMI pH y su versión low cost, el i-SAMI pH, ambos desarrollados por Sunburst Sensors; y los tipo ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor), como el SeaFET de Sea-Bird Scientific, Inc. Los clásicos electrodos de vidrio también se siguen empleando, pero presentan una gran incertidumbre y deriva, por lo que su uso se está evitando progresivamente y sus medidas no se consideran para la inclusión en bases de datos, tal como se indica en los indicadores de los objetivos de desarrollo sostenible (SDG 14.3.1) de la UNESCO.

Cabe destacar la versión “Do It Yourself” (DIY) de bajo coste desarrollada en la University of South Florida, que permite reproducir un sensor de buena calidad y bajo mantenimiento (Yang et al. 2015). Con respecto a este tipo de sensores DIY, investigadores del IIM-CSIC han desarrollado un instrumento llamado SURCOM-pH que todavía se encuentra en fases previas a la comercialización, pero que cubre un amplio rango de pH con una deriva mínima ($\pm 0,003$ unidades de pH), incluye la transmisión de datos costeros en tiempo real, cuenta con tamaño reducido y una autonomía superior a un año de transmisión continua. Dentro del proyecto Atlazul, se han construido y fondeado varios de estos sensores, para incrementar la cobertura espacial y temporal de las mediciones de pH en las Rías gallegas. En la figura 8 se puede ver una foto de uno de los prototipos de SURCOM-pH que se ha instalado en la plataforma de Cortegada (Ría de Arousa, Galicia) enmarcado dentro del proyecto Atlazul.



Figura 8. Fotografía del prototipo de sensor de pH, SURCOM-pH, desarrollado por personal científico del IIM-CSIC y fondeado en la estación de Cortegada en el contexto del proyecto Atlazul

A grandes rasgos, la configuración necesaria para medir y registrar datos de pH de forma continua mediante el sensor de fabricación propia SURCOM-pH del IIM-CSIC es la que se muestra en la Figura 9, cuyas partes principales son:

- Condiciones medioambientales adecuadas para garantizar que el sensor se mantenga semi-sumergido.
- Un sensor durafet encapsulado en una carcasa tubular protectora y desmontable junto con toda la parte electrónica necesaria para que registre y envíe los datos en remoto mediante una antena.
- Un sistema de visualización de datos, en este caso se ha utilizado el sistema gratuito de visualización de datos GRAFANA, que permite

consultar en tiempo real los datos de pH y temperatura que registra el SURCOM-pH.

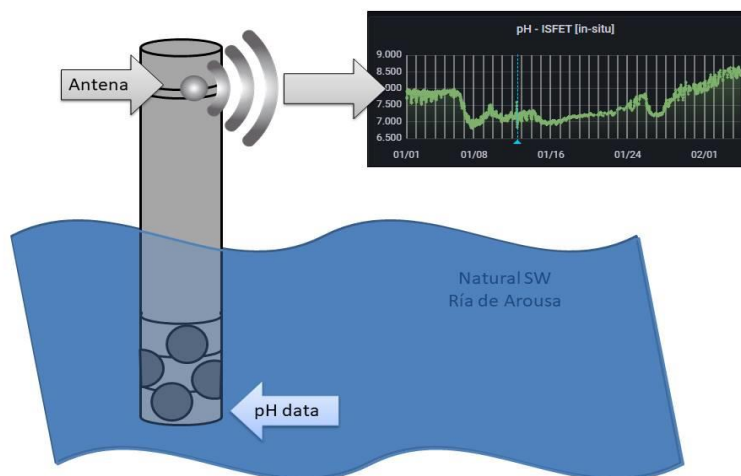


Figura 9. Esquema de la configuración necesaria para la monitorización y visualización de datos en tiempo real de valores pH en agua de mar utilizando el SURCOM-pH.

Mantenimiento de sensores y gestión de datos

El mantenimiento de los sensores tipo SURCOM-pH se realiza periódicamente cada quince o veinte días, principalmente para controlar los problemas de biofouling (Figura 10).

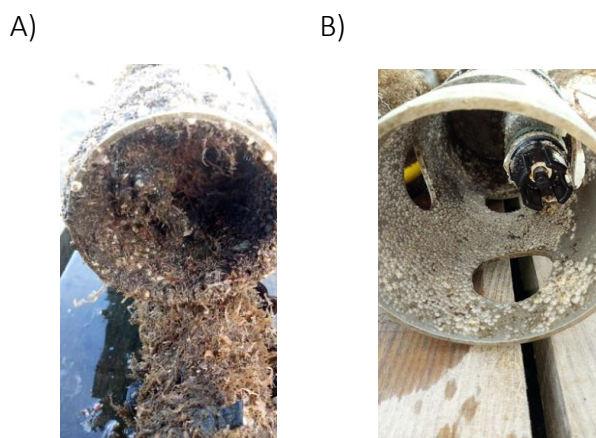


Figura 10. Imágenes del SURCOM-pH instalado en la plataforma de Cortegada (A) antes y (B) después de su mantenimiento habitual. En la imagen de “antes” se observan diferentes tipos de organismos vivos, mientras que en la imagen de “después”, se ha eliminado casi la totalidad del *biofouling* pero todavía quedan organismos calcáreos adheridos.

La frecuencia de limpieza depende de las condiciones en las que se encuentre el sensor y que la tendencia de los datos recibidos sean los esperados. Como se puede ver en la Figura 10, las algas y los organismos calcáreos tienden a adherirse al sensor. Esto genera interferencias con la respuesta de las mediciones.

El protocolo habitual de limpieza del sensor SURMCOM-pH es el que se detalla a continuación, aunque puede extrapolarse a otros sensores:

- (1) Sacar la carcasa móvil del SURCOM para que sea más fácil acceder al sensor durafet.
- (2) Colocar el electrodo bajo un flujo de agua destilada para eliminar los residuos sueltos.
- (3) En caso de que haya *biofouling*, utilizar lejía diluida y después aclarar a fondo con agua destilada.
- (4) En caso de que haya incrustaciones calcáreas, utilizar ácido clorhídrico diluido y después aclarar a fondo con agua destilada.
- (5) La zona del sensor puede limpiarse con un cepillo de forma suave, en el caso de que se vean adheridas todavía partículas sólidas o una película que lo tape.

En caso de fallo del sensor durafet (deriva excesiva) existen metodologías para tratar su recuperación, como la que se detalla a continuación:

- (1) Protocolo de limpieza habitual, tal y como se ha descrito anteriormente.
- (2) Colocar el electrodo en un vaso de precipitados con diferentes buffers para controlar un posible offset en el sensor de pH.
- (3) Colocar el electrodo en un vaso de precipitados con una solución saturada de cloruro de potasio (KCl) y calentar hasta la ebullición.
- (4) Retirar del fuego y dejar el electrodo sumergido en esta solución hasta que se enfríe a temperatura ambiente.

En cuanto a la recepción y tratamiento de los datos, en el caso del SURCOM-pH, estos se van registrando en

https://co2.iim.csic.es/monitoring/d/surcom_cortegada/



Figura 11. Vista general de datos de pH y temperatura registrados cada diez minutos y medio por el sensor low cost SURCOM-pH almacenados en el sistema de visualización GRAFANA.

El sensor SURCOM-pH realiza medida cada diez minutos y medio, cuya información se va almacenando en el sistema de visualización GRAFANA (Figura 11). En este sistema se van registrado automáticamente y en tiempo real los datos de:

- **pH-ISFET [in-situ]:** pH en escala total a temperatura in-situ (panel superior con puntos en verde)
- **Temperature [degC] :** temperatura en °C (panel intermedio con puntos en amarillo)
- **Battery [volts]:** valor de voltaje interno del equipo para estimar la autonomía restante (panel inferior derecho con puntos en verde)
- **Data:** tabla en la que se van guardando la información que se genera en la toma de medidas. Se permite la descarga de datos desde la tabla del panel Data pinchando en Data→ Inspect→Data, desde donde se puede descargar en formato CSV toda la serie de datos ya que el panel es de acceso público. La información que está disponible es:
 - Time: fecha y hora en las que se registra el dato.
 - Device: código del equipo registrado en sigfox.
 - Durafet-pH: valor de pH registrado por el sensor durafet de pH.
 - Durafet_temperature: valor de temperatura registrada por el sensor durafet.

- ds18b20_temperature: Temperatura registrada por un sensor digital de temperatura colocado a mayores para comprobar la posible deriva de la temperatura del durafet con el consumo de batería.

Además, se ha dado de alta la plataforma “AtIAZUL - Cortegada” dentro de las series temporales fijas, de la iniciativa Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON), que aglomera series temporales del sistema de carbono y que puede consultarse a través del explorador [GOA-ON Explorer](#) que proporciona acceso y visualización a los datos de acidificación oceánica que se están recogiendo en todo el mundo a partir de boyas, campañas oceanográficas y estaciones de series temporales fijas. Para la implementación de dichas medidas se han seguido los standards y recomendaciones respecto al almacenaje de datos y metadatos descritos por (Jiang et al. 2022).

2.1.5 Sensores para la caracterización de la materia particulada

Conceptos básicos para la selección de sensores

La turbidez es la medida de las propiedades de dispersión de la luz del agua y depende de la cantidad, el tamaño y la composición de la materia en suspensión, como arcilla, limo, partículas coloidales, plancton y otros organismos microscópicos. Se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Los sólidos suspendidos se refieren a la masa de la materia suspendida y se miden como mg/L. La turbidez es un indicador primario de la calidad del agua porque la alta turbidez alta corresponde a elevados niveles de sólidos en suspensión y la correspondiente baja transparencia que resulta en bajos niveles de luz transmitida limita la producción primaria. Asimismo, un alto contenido en sólidos en suspensión, en términos generales, significa una mayor carga de materia potencialmente oxidable en el medio marino, lo que en último término deriva en problemas de eutrofización, y por ello la turbidez se puede emplear como un indicador de eutrofización.

Las técnicas más comunes para la determinación de la turbidez son el análisis gravimétrico, los sensores ópticos (OBS – Optic Backscatter Sensor) y los sensores acústicos (ABS –Acoustic Backscatter Sensor). Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas. Los sensores ópticos, (OBS) son por norma más sensible a las partículas más pequeñas, mientras que los acústicos detectan

mejor las partículas más gruesas. Además, los métodos ópticos tienen la ventaja de que son más operativos a la hora de un fondeo de largo término y su coste no es tan elevado como puede ser un sensor acústico. Además, la calibración de los sensores acústicos es mucho más compleja y tediosa que la de los sensores ópticos. Los sensores ópticos miden la turbidez del agua detectando la radiación infrarroja dispersada por la materia suspendida, existiendo una respuesta lineal del backscattering del sensor con la concentración de sólidos en suspensión (Black y Rosenberg 1994; Aspillaga et al. 2021).

Existen distintos modelos de sensores ópticos de turbidez en el mercado para fondeos en el medio marino. Para la selección de los equipos debe tenerse en cuenta varias características como aquellas relacionadas con (1) la zona de estudio (profundidad, dinámica propia del área de interés, cantidad de sólidos en suspensión en el medio, etc), (2) la duración y frecuencia del muestreo que determinarán la duración de la batería y por tanto el tiempo de autonomía del sensor, (3) la probabilidad de biofouling y por supuesto (4) las limitaciones de financiación.

Nos interesa destacar aquí, que en la selección del sensor de turbidez es muy importante conocer el rango de turbidez en que se haya nuestra zona de estudio lo cual afectará a la sensibilidad del sensor (Tabla 2). Dentro del ámbito del proyecto Atlazul, en que se instalarán dos sensores de turbidez (superficie y fondo), modelo Eco FLNTU en la zona interior de la Ría de Arousa (Illa de Cortegada), se tuvo en consideración no sólo el hecho de que la zona de estudio se encuentra próxima a la desembocadura del río Ulla, con un muy alto aporte continental, sino también que es una zona sometida a una intensa actividad de marisqueo. Estas dos circunstancias conllevan una intensa resuspensión de sedimento y exigen desplegar dispositivos con un amplio rango de NTUs (> 100 NTUs) para la determinación anual de medidas, lo cual afecta a la sensibilidad del aparato.. Así mismo, resulta indispensable, la incorporación de mecanismos *anti-fouling* (“wipper”), dada la rápida formación de películas incrustantes en esa zona.

Turbidez (NTU)		Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
Rango	Sensibilidad	Rango	Sensibilidad
0-10	0.005	0-30	0.015
0-25	0.013	0-50	0.025
0-100	0.098	0-50	0.037
0-200	0.172	0-75	0.062
0-1000	0.198	0-250	0.123

Tabla 2. Relación entre la sensibilidad de los sensores y los rangos de turbidez y clorofila que pueden abarcar.

Los sensores ópticos para la determinación de materia particulada, suelen combinarse con fluorómetros para la determinación de la fracción de materia orgánica disuelta (Fluorescent Dissolved Organic Matter – fDOM) y clorofila-a, como por ejemplo el modelo [Eco-Triplet](#) de Seabird, lo que permite el cálculo de la concentración de carbono orgánico disuelto para el estudio de los ciclos biogeoquímicos.

El uso de fluorómetros para cuantificar la biomasa de fitoplancton in situ a partir de la intensidad de la clorofila-a lleva usándose de forma rutinaria desde hace más de 50 años en sensores oceanográficos. Sin embargo, se sigue avanzando en la miniaturización y abaratamiento de este tipo de dispositivos.

Algunos ejemplos en esta dirección es el desarrollo de perfiladores de bajo coste como la serie T-Flap, que permite realizar mediciones de temperatura, conductividad fluorescencia y fDOM (Marcelli et al. 2014), o el modelo desarrollado por (Leeuw, Boss, y Wright 2013) que sigue el concepto de “Do-it-yourself” y disponibiliza el diseño y software gratuito para construir un fluorómetro a partir de componentes electrónicos sencillos y ampliamente disponibles (LED azul para excitar la clorofila un fotodiodo de silicio y un microcontrolador Arduino).

Existen también fluorómetros que permiten, obtener información sobre otros pigmentos más allá de la clorofila-a y en base a los cuales se puede obtener información sobre la abundancia relativa de ciertos grupos funcionales. Algunos ejemplos de sensores que permiten distinguir en base a la huella espectral de diferentes grupos funcionales y también determina la fracción de materia orgánica disuelta fluorescente (fDOM), son el [PhytoFind](#) de

TurnersDesigns, el [MatrixFlu](#) de Trios, o el [ECO Fluorometer](#) de Seabird, que diferencian diferentes grupos de algas en función de la concentración clorofila-a, rodamina, phycoeritrina y phycocianina.

El desarrollo de sensores basados en el principio de fluorescencia, es decir la emisión de luz a una longitud de onda diferente a la longitud de onda de excitación, han demostrado su capacidad para detectar compuestos más allá de la clorofila, y se utilizan regularmente para la detección de otras sustancias, como por ejemplo hidrocarburos. Un par de ejemplos de sensores de fluorescencia para la identificación de hidrocarburos son el [SeaOWL UV-A](#), o el MiniFluo-UV, este último implementado con éxito en gliders (Cyr et al. 2019).

Es habitual combinar con los fluorómetros, también un radiómetro, que miden radiancia o irradiancia en el agua a longitudes de onda pre-establecidas y permiten entre otras cosas conocer la fracción de radiación fotosintéticamente activa disponible (Photosynthetically Active Radiation-PAR) al medir la intensidad de radiación en el rango de longitud de onda comprendido entre los 400 y los 700 nm. También permiten estudiar otros procesos que intervienen en la absorción de la luz en el agua y en el “color” de la misma, por lo cual se está evolucionando hacia radiómetros hyperespectrales, capaces de almacenar información sobre más de 250 canales o secciones del espectro visible, como el modelo [HyperORC](#) de Seabird.

Por otro lado, el análisis de la distribución de frecuencias de tamaño también puede ayudar a clasificar grupos funcionales en muestras de plancton. Los contadores de partículas suelen estar basados en la caracterización de la difracción y transimetría de una fuente de luz, que suele ser un laser. Sin embargo, dado el amplio rango de tamaños de las partículas presentes en el plancton que abarca varios órdenes de magnitud, ningún dispositivo puede muestrear todo el espectro de tamaños. Por ejemplo, organismos del mesozooplancton (200-2000 μm) pueden utilizarse contadores LOPC (Laser Optical Plankton Counters) como el HR-LOPC Rolls Royce Canada Ltd.–Naval Marine (Herman, Beanlands, y Phillips 2004), mientras que para caracterizar nano- y micro-organismos deben utilizarse instrumentos como los de la [serie LISST](#) (Laser In Situ Scattering and Transmissiometry) de Sequoia Sc, que

presenta múltiples configuraciones para muestrear sobre diferentes plataformas fijas o móviles.

Por otro lado, las técnicas de citometría de flujo miden la fluorescencia y las señales de dispersión de las partículas contenidas en una muestra de agua. Este tipo de sensores, están diseñados para orientar las partículas una a una a través de un capilar donde se iluminan secuencialmente por uno o varios rayos láser. Las señales de dispersión acompañadas de diferentes intensidades de señal de fluorescencia se registran para cada objeto individual. Este tipo de sensores lleva utilizándose rutinariamente desde hace más de 30 años para la caracterización del plancton y normalmente suelen ir acopladas a sistemas de captación de imágenes que incrementan su potencial para la caracterización del plancton, lo que se conoce como “imaging flow-cytometers”. Hay 4 modelos que se utilizan rutinariamente en investigación que son el [FlowCytobot](#), el [Cytosense](#) de Cytobuoy, la [FlowCam](#) y la ZooCAM (Colas et al. 2018; Lombard et al. 2019), cuyas especificaciones están resumidas en la Tabla 4 y Figura 5 de la siguiente sección.

Un ejemplo de nuevas aproximaciones que combinana la citometría de flujo con el concepto de lab-on-a-chip, es el proyecto [Cytochip](#), en el que están desarrollando un microcitómetro, que mida simultáneamente propiedades ópticas y eléctricas de las células, para la identificación automática de fitoplancton tóxico.

2.1.6 Sistemas de captación de imágenes

Conceptos básicos para la selección de sensores

Los dispositivos cuantitativos de captación de imágenes para la caracterización del plancton llevan desarrollándose desde la década de 1980, y hoy en día existe una considerable lista de modelos comercializables (Tabla 3 extraída de (Lombard et al. 2019). El funcionamiento de todos ellos se basa en el mismo principio; Las partículas se colocan en un volumen conocido iluminado por una fuente de luz específica. Para los dispositivos ópticos, se realizan varias mediciones ópticas (por ejemplo, fluorescencia), mientras que para los dispositivos de captura de imágenes, se toman una serie de mediciones inferidas de la propia imagen, que pueden incluir desde el tamaño, forma u área

de la sección transversal, como la intensidad de la luz proveniente de cada píxel de la partícula, produciendo una gran cantidad de datos brutos. Cada técnica tiene su propia limitación de rango de tamaños (Tabla 3, Figura 12) pues las partículas muy pequeñas a menudo no permiten obtener imágenes eficientes (muy pocos píxeles o señal cercana al umbral de ruido), mientras que las partículas muy grandes pueden ser demasiado escasos para el volumen de agua muestreado por algunas técnicas, o directamente demasiado grandes para el tamaño del muestreador (Tabla 3, Figura 12). Este tipo de dispositivos resultan de extrema utilidad para la comprensión de los ecosistemas marinos, y en particular para cuantificación de huevos y larvas de peces de relevancia para importantes pesquerías. Por ejemplo, un reciente estudio (Axler et al. 2020) realizado en el Golfo de Méjico, estudió las dinámicas de predación de larvas de peces en base a las imágenes de alta resolución captadas con un dispositivo ISIIS, que junto con técnicas de Inteligencia Artificial para la clasificación automática de las imágenes, les permitió analizar la distribución de las larvas de peces, sus presas (copépodos calanoides) y depredadores principales (ctenóforos, hidromedusas y sifonóforos) en amplias escalas espaciales (kms).

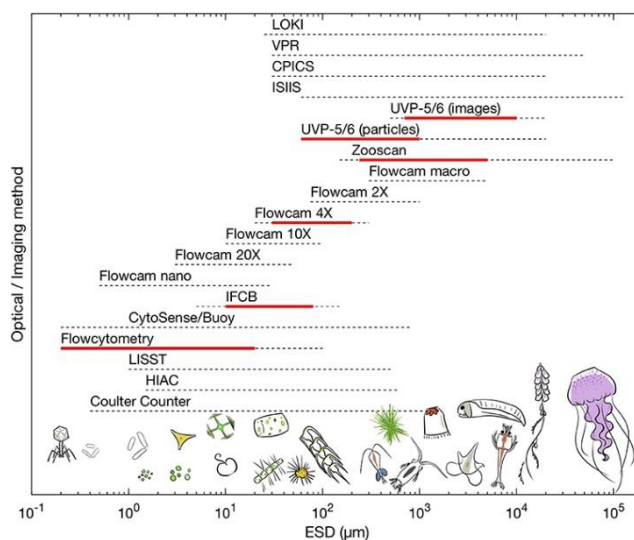


Figura 12. Comparación del rango de tamaños de los organismos del plancton en Equivalentes de Diámetro Esférico (Equivalent Spherical Diameter-ESD) que los métodos ópticos actuales y de adquisición de imágenes pueden muestrear. Extraído de (Lombard et al. 2019)

Instrument	total size range (ESD)	Size target for quantitative observations	Typical sample volume	Sampling	Sample	Condition of use	Max. operating range	Method	Approximate cost	Seller	Final results
HIAC	1.3–600 μm	tbe	25–100 ml/min	Water	Fresh (fixed)	On board/ laboratory	na	Optical	26,000 €	Beckman-Coulter	Particles nb, size
Coulter Counter	0.4–1,600 μm	tbe	> 8 ml/min	Water	Fresh (fixed)	On board/ laboratory	na	Physical	45,000€	Beckman-Coulter	Particles nb, size
Flowcytometry	0.2–100 μm	0.2–20 μm	10 μL ~1 ml	Water	Fixed with Glutaraldehyde	Laboratory	na	Optical	-	several available	Particles nb, type, size
Imaging FlowCytoBot	5–150 μm	10–80 μm	5 ml (15 ml/h)	Water	Fresh (fixed)	<i>In situ</i> /on board/ laboratory	40 m	Optical/imaging	\$158,000	McLane research laboratories inc.	Particles nb, type, size
CytoSense and CytoSub	0.2–800 μm (optical) 1–800 μm (imaging)	tbe	0.5–5ml (5–1,000 $\mu\text{L}/\text{min}$)	Water	Fresh (fixed)	<i>In situ</i> /on board/ laboratory	200 m	Optical (scanning flowcytometry)/ imaging (optional)	90,000–130,000 €depending on configuration	CytoBuoy b. v.	Particles nb, type, size
FlowCam Nano	300 nm–30 μm	tbe	20 $\mu\text{L}/\text{min}$	Water	Fresh / Fixed	On board/ laboratory	na	Imaging	\$117,000	Fluid Imaging Technologies	Particles nb, type, size
Flowcam with different objectives: -2X -4X -10X -20X	-75–1,000 μm -20–300 μm -10–100 μm -3–50 μm	-tbe -30–100 (water) 200 (net) μm -tbe -tbe	-na 5 ml/min -40 ml 1 ml/min -na 0.2 ml/min -na 0.05 ml/min	Water + Plankton nets	Fresh/Fixed	On board/ laboratory	na	Imaging (triggered by optical signal)	\$57,000 \$92,500 (laser)	Fluid Imaging Technologies	Particles nb, type, size
Flowcam-macro	300–5,000 μm	tbe	100–900 ml/min (several m3 depending on net cast)	Plankton nets	Fresh / Fixed	On board/ laboratory	na	Imaging	\$54,000	Fluid Imaging Technologies	Particles nb, type, size
Zooscan	150–100,000 μm	240– 5,000 μm (depending on nets)	several m3 depending on net cast	Plankton nets	Fresh / Fixed	Laboratory	na	Imaging	26,000€	Hydroptic	Particles nb, type, size
LISST-200	1–500 μm	tbe	-	Cast	Fresh	<i>In situ</i>	600 m	Optical	\$37,500	Sequoia	Particles nb, size
LISST-Holo2	25–2,500 μm	tbe	30 ml/s	Cast	Fresh	<i>In situ</i>	3,000 m	Optical	\$39,500	Sequoia	Particles nb, size
UVP-5	60–20,000 μm	60–1,000 μm (optical) 700–10,000 μm (imaging)	100–200 L per 5 m depth intervals	Cast	Fresh	<i>In situ</i>	6,000 m	Optical/imaging	92,000 €	Hydroptic	Particles nb, type, size
UVP-6LP	60–20,000 μm	60–1,000 μm (optical) 500–10,000 μm (imaging)	-	Cast, gliders, Argo floats	Fresh	<i>In situ</i>	6,000 m	Optical/imaging	15,000€	Hydroptic	Particles nb, type, size
ISIS	60 μm –130 mm	600 μm –130 mm (imaging)	150 L/s at 5 kts	Towed	Fresh	<i>In situ</i>	200 m	Focused shadowgraph	\$100,000	Bellmare-us.com	Particles nb, type, size
CPICS	30 μm –20 mm	60 μm - tbe	1 ml (10 ml/s)	Fluids	Fresh/fixed	<i>In situ</i>	1,000, 6,000, 10,000 m	Imaging	38,000	Coastal/Ocean Vision.com	Particles nb, type, size
VPR	30 μm –5 cm	100 μm -tbe	1.25–380 ml (37 ml/s–9.5 L/s)	Water	Fresh	<i>In situ</i>	1,000 m	Imaging	\$100,000	Seascan Inc. (info@seascaninc.com)	Particles nb, type, size
LOKI	25 μm –2 cm	50 μm –2 cm	1.6–3.5 ml	Towed	Fresh	<i>In situ</i>	1,000 or 3,000 m	Imaging	75,000–150,000 €	ISITEC (sale@isitec.de)	Particles nb, type, size

tbe: to be evaluated.

Tabla 3. Comparación de los diferentes métodos ópticos y de adquisición de imagen para el análisis de la composición del plancton, en función del rango de tamaño objetivo, sus capacidades, precio, forma de muestreo, etc. Extraído de (Lombard et al. 2019).

Existen 5 modelos que son los más comúnmente utilizados: el [ISIS](#) (Ichthyoplankton Imaging System), el [CPICS](#) (Continuous Plankton Imaging and Classification Sensor), el [VPR](#) (Video Plankton Recorder), el [UVP](#) (Underwater Vision Profiler 5 HD) y el LOKI (Lightframe On-sight Key species Investigation system; (Schmid et al. 2016)) cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 3 y en (Lombard et al. 2019).

También nos gustaría destacar una tecnología que todavía no está muy implementada debido a su reciente desarrollo, como son los sensores

holográficos, que permiten la creación de hologramas para la reconstrucción en 3D del micro-plancton a partir de imágenes tomadas a muy altas frecuencias. Para esta tecnología se dispone del modelo comercial [LISST-HOLO](#) de Sequoia Sci, aunque nuevos modelos experimentales, como el miniHDC (Dyomin et al. 2021) aparecen regularmente.

Este tipo de dispositivos generan una cantidad ingente de datos, que requiere todavía avances en su procesamiento. Aunque se está avanzando rápidamente en las técnicas de inteligencia artificial y “deep-learning”, así como en el número de bibliotecas de imágenes de entrenamiento, todavía es necesaria la asistencia de taxónomos expertos para la clasificación de esta información a nivel taxonómico (Lombard et al. 2019).

Estos dispositivos están pensados para recoger imágenes de organismos marinos de hasta unos 13 cms de tamaño, sin embargo, el análisis de imágenes submarinas para la identificación de ensamblajes de organismos de mayor tamaño, particularmente poblaciones de peces, presenta un gran potencial y lleva utilizándose regularmente desde hace décadas (Mallet y Pelletier 2014).

El término “underwater video” abarca diferentes técnicas que incluyen: (1) estaciones fijas de recogida de imágenes remotas (RUV-Remote Underwater Video Recorders), que pueden incorporar algún tipo de cebo para atraer más individuos al alcance de la cámara (BRUV-Baited Remote Underwater Video Recorders). (2) estaciones móviles operadas desde superficie, que incluyen cámaras directamente sumergidas desde buques (TOWV – Towed Video), a cámaras montadas sobre vehículos más sofisticados como ROVs y (3) transectos de video realizados por buceadores (DOV – Diver Operated Video) (Figura 13).

Cualquiera de estas técnicas, puede utilizar una única cámara, o dos, lo que se conoce como estéreo-cámaras (Figura 13) y que permite obtener imágenes en 3D para permitir mejores medidas del tamaño de los individuos.

Gracias a los avances tecnológicos en el desarrollo de cámaras digitales y baterías más potentes, el uso de RUV y BRUV se ha incrementado sustancialmente desde su primera implantación en la década de 1990 (Bicknell et al. 2016)(Figura 14).

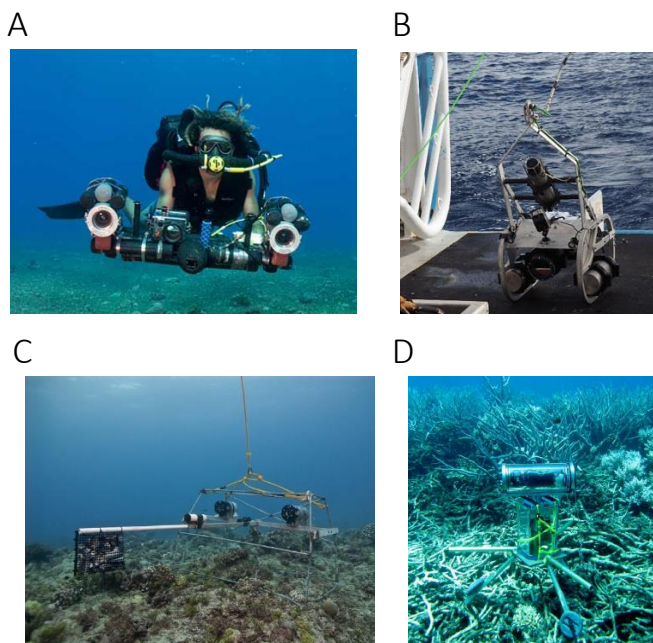


Figura 13 A) DOV con estereocámara. [Imagen Coral Reef Research Foundation](http://www.coralreefresearchfoundation.org) B) TOWV imagen del [Australian Institute of Marine Science](http://www.auim.org.au) C) BRUV Imagen obtenida en la página web de pifsc.noaa.gov D) RUV Cámara giratoria Extraído de (Pelletier et al. 2012)

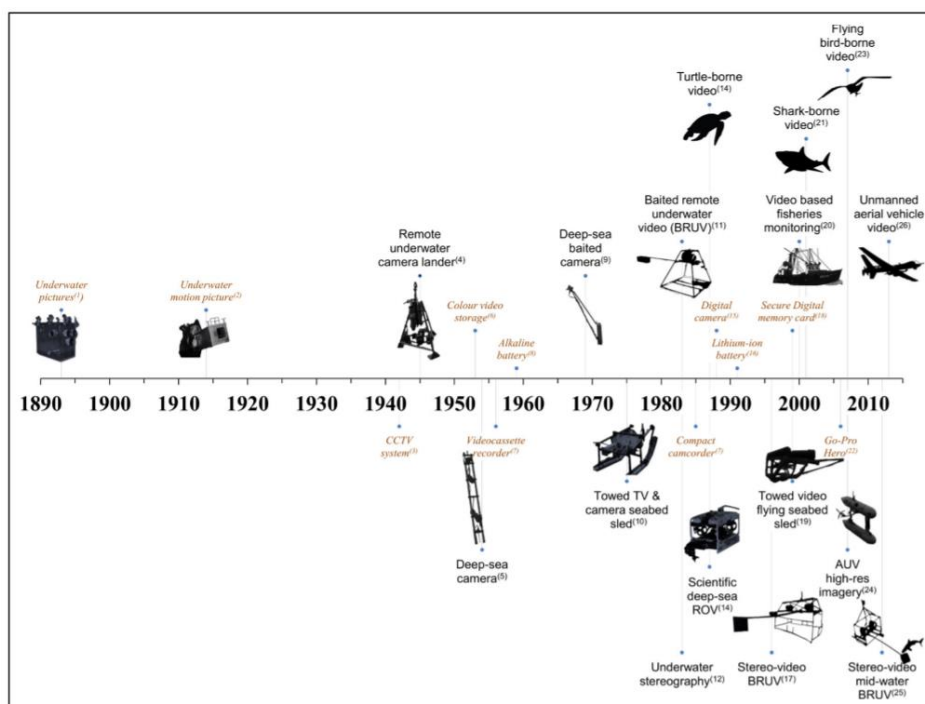


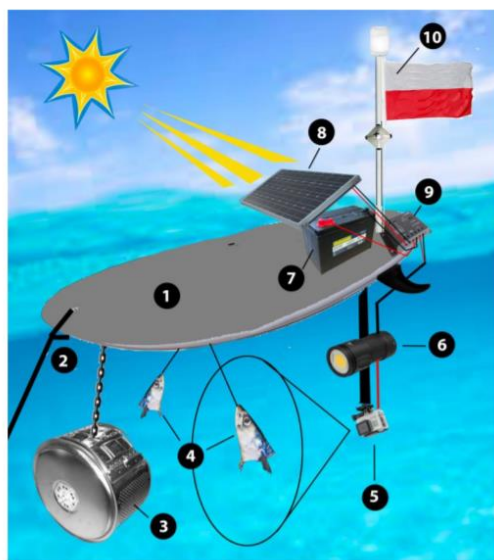
Figura 14 Línea temporal de eventos importantes en el desarrollo y utilización de los sistemas de captación de imágenes submarinas. Extraído de Bicknell et al., 2016

Aunque el precio de este tipo de aparatos sigue siendo elevado, y que el procesamiento de las imágenes es un trabajo lento y difícil de automatizar en muchas ocasiones, el uso de este tipo de plataformas se utiliza cada vez más para caracterizar la diversidad y abundancia de diferentes especies, así como para estudiar su comportamiento, ecología e incluso evaluar ciertos impactos de la pesca (Mallet y Pelletier 2014). Un ejemplo de una iniciativa de colaboración internacional reciente es el proyecto [Globalfingerprint](#), que aunando esfuerzos de investigadores de todo el mundo, despliegan BRUVs siguiendo unos protocolos establecidos, para evaluar la diversidad y densidad de tiburones costeros y las presiones que la sobrepesca y la pesca ilegal ejercen sobre ellos (MacNeil et al. 2020).

Una de las claves en el abaratamiento de la toma de imágenes submarinas es la aparición de cámaras digitales de alta definición, producción en masa y bajo coste, tipo GoPro ©. Su precio reducido, junto con su pequeño tamaño y con la aparición de carcasas subacuáticas mejoradas que permiten alcanzar mayores profundidades, ha ampliado el espectro de contextos en que se pueden utilizar imágenes submarinas para estudiar la diversidad marina.

También existen cada vez más iniciativas para diseñar prototipos de bajo-coste, y bajo la premisa de Do-it-yourself, como por ejemplo el prototipo de BRUV desarrollado por (Torres, Abril, y Clua 2020) que consiste en una tabla de surf modificada con un sistema de anclaje, cámara de video subacuática, tambor de cebo, una fuente de luz blanca que se enciende únicamente de noche y una placa solar con batería para alimentar dicha fuente de luz (Figura 8) permitiendo desplegar un BRUV por menos de 1500 euros (Torres, Abril, y Clua 2020). Otro ejemplo sería la cámara-trampa, TrigCam desarrollada por (Williams et al. 2014) también bajo el concepto de Do-it-yourself y que se trata de un RUV activado por movimiento que emplea iluminación roja lejana y estéreo-imágenes que puede construirse por menos de 1700 euros (Figura 15).

A



B

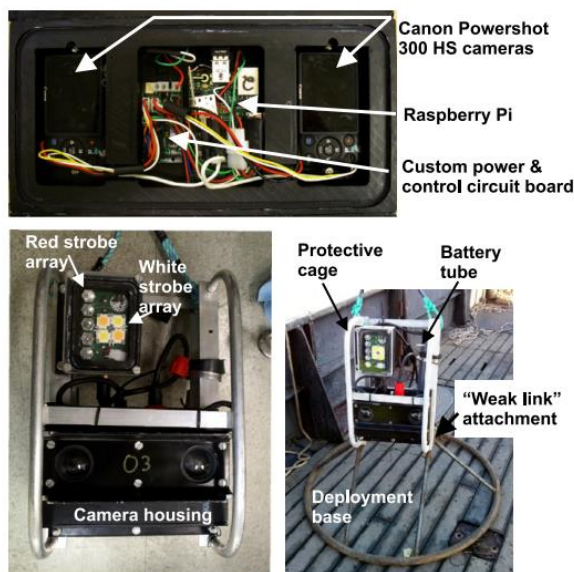


Figura 15 A) Prototipo de BRUV de bajo coste extraído de (Torres, Abril, y Clua 2020) B) Prototipo de TrigCam, de bajo coste extraído de (Williams et al. 2014)

Sin embargo, el principal reto tecnológico para estos sistemas de captación de imágenes, es el procesamiento e identificación automática de especies a partir de las mismas. Las técnicas convencionales de clasificación de imágenes no suelen funcionar bien en condiciones submarinas donde el fondo es complejo y la forma y características diferenciales de las diferentes especies de peces sutiles. Se están desarrollando nuevas aproximaciones basadas en redes neuronales y “Deep learning” con resultados prometedores (Siddiqui et al. 2018).

Es más, el desarrollo de técnicas de IA, está permitiendo llegar incluso a utilizar imágenes recogidas por buceadores sobre ciertas especies (*Raja undulata*), como identificadores individuales, a modo de huella dactilar, para estudios de la ecología de estas especies en torno a Areas Marinas Protegidas (Proyecto [iGENTAC](#)).

2.1.6 Sensores acústicos

Dado que el océano es en promedio diez billones de veces más opaco que la atmósfera, la acústica resulta una técnica en ocasiones más apropiada para explorarlo que la óptica.

El campo de la sensórica acústica está en continua evolución, y desarrolla herramientas con múltiples funcionalidades, que van desde hidrófonos o “trampas acústicas” que registran de forma pasiva el sonido de los océanos a sonares destinados a la navegación o el rastreo de buques, ecosondas que permiten explorar el fondo y su composición, sonares de barrido lateral que ayudan a la localización de bancos pesqueros, marcadores de telemetría acústica que permiten el seguimiento de individuos en particular, o incluso tomógrafos o perfiladores acústicos doppler que miden la temperatura, o la velocidad y dirección de las corrientes de agua (Figura 16;(Howe et al. 2019)

Existen dos tipos principales de sensores acústicos con diferentes aplicaciones, los pasivos (PAM-Passive Acoustic Monitoring Systems) y los activos (AAM – Active Acoustic Monitoring Systems), que ofrecen múltiples aplicaciones para la observación de los ecosistemas marinos y las actividades humanas (Figura 14).

En la Tabla 4 se resumen las características de los modelos revisados por (Ursula K. Verfuss et al. 2019) en un trabajo exhaustivo sobre los desarrollos tecnológicos en este campo.

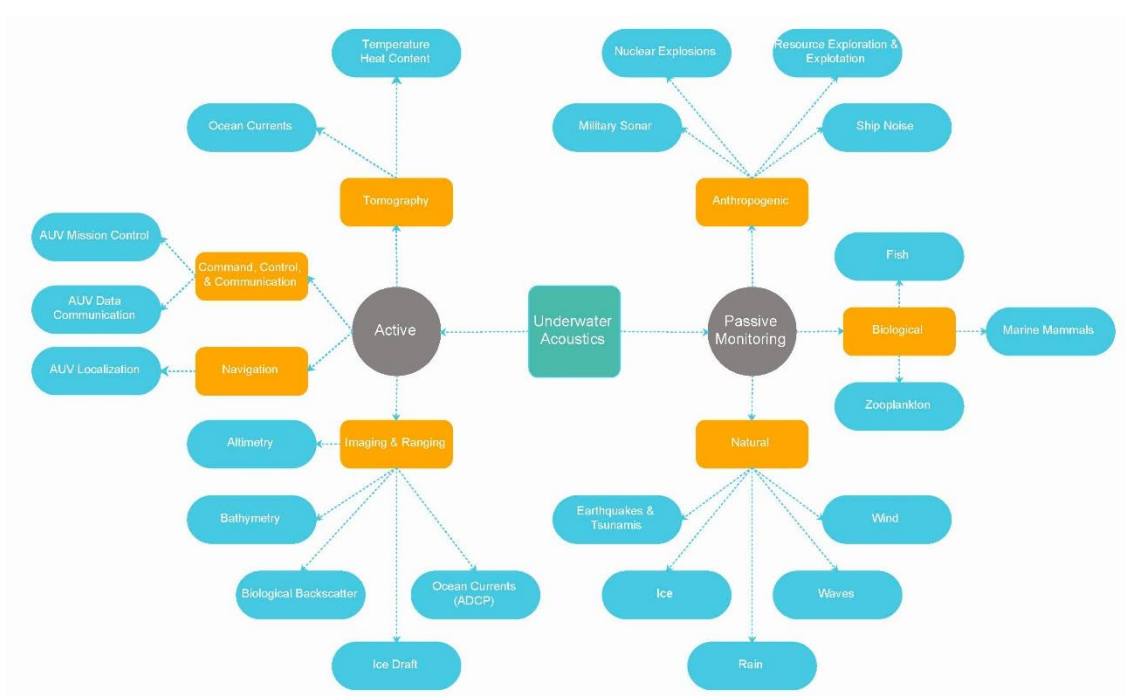


Figura 16. Aplicaciones de los sensores acústicos en la observación oceánica. Extraído de (Howe et al. 2019).

Sensor type	System name	Manufacturer	Technology readiness level
Active acoustic monitoring	Aquadopp	Nortek, Norway	Full commercial application
	ADP	Sontek, USA	Full commercial application
	AZFP	ASL, Canada	Basic research
			Full commercially application as moored system (for AUV)
	DT-X SUB	BioSonics, USA	Full commercial application
	ES853	Imagenex, Canada	Full commercial application
	Gemini 720i, Gemini 720is	Tritech, UK	Full commercial application
	Modular VR2C, VMT	Vemco, Canada	Full commercial application
	WBAT	Kongsberg/Simrad, Norway	Full commercial application
	WBT mini		Prototype system
Passive acoustic monitoring	A-Tag	Marine Micro Technology, Japan	Full commercial application
	AUSOMS-mini Black	Aquasound Inc., Japan	Full commercial application
	C-POD-F	Chelonia Ltd., UK	Small scale prototype
	C-POD		Demonstration system
	Cornell/AutoBuoys	Cornell (PAM)/EOS (buoy), USA	Ready
	Decimus	SA Instrumentation Ltd., UK	Full commercial application
	DMON	WHOI, USA	Available from WHOI n. p.
	SDA14	RTSYS, France	Demonstration system
	SDA416		Prototype system
	Seiche real time transmission system	Seiche Measurements Ltd., UK	n. p.
	SM2, SM3	Wildlife Acoustics, USA	Full commercial application
	SoundTrap 4 channel	Ocean Instruments, New Zealand	Prototype system
	SoundTrap HF		Full commercial application
	WISPR	Embedded Ocean System, USA	n. p.

Tabla 4. Sensores Activos y Pasivos de monitorización acústica que pueden instalarse en vehículos remotos no tripulados. Extraído de (Ursula K. Verfuss et al. 2019).

2.1.6.1 Sensores acústicos pasivos

El monitoreo acústico pasivo (PAM) implica monitorear el medio ambiente mediante la captación de sonido del medio utilizando hidrófonos acoplado a una grabadora. Las grabaciones se procesan después para extraer datos ecológicos de interés como la presencia de ciertas especies, pero también la abundancia y composición de comunidades marinas, calcular proxies acústicos de biodiversidad (Browning et al. 2017), así como registrar la contaminación sonora de la actividad humana y sus implicaciones para el ecosistema (F. Thomsen et al. 2021).

Los sistemas PAM constan de uno o más hidrófonos, si bien un solo hidrófono no permite la localización de la posición de la fuente de sonido, mientras que el despliegue de grupos de hidrófonos permite, mediante el cálculo del retardo de la llegada del sonido a cada uno de los dispositivos, identificar su localización.

Los sensores PAM son relativamente sencillos y se han desarrollado modelos de una gran variedad de tamaños, pensados para aplicaciones diferentes y para ser desplegados en diferentes plataformas (Tabla 4).

Una de las principales limitaciones de esta tecnología, es el almacenamiento, transmisión y procesamiento de los datos. Aunque con el fin de reducir tanto las cantidades de datos almacenados como transmitidos, la mayoría de los sistemas PAM enumerados en la Tabla 4 incorporan softwares para el procesamiento en tiempo real, lo que les permite transmitir una menor cantidad de “paquetes de datos”.

Una aplicación cada vez más empleada de los PAM es su utilización para la recepción de señales de telemetría acústica procedentes de animales marcados con emisores que permiten identificarlos individualmente.

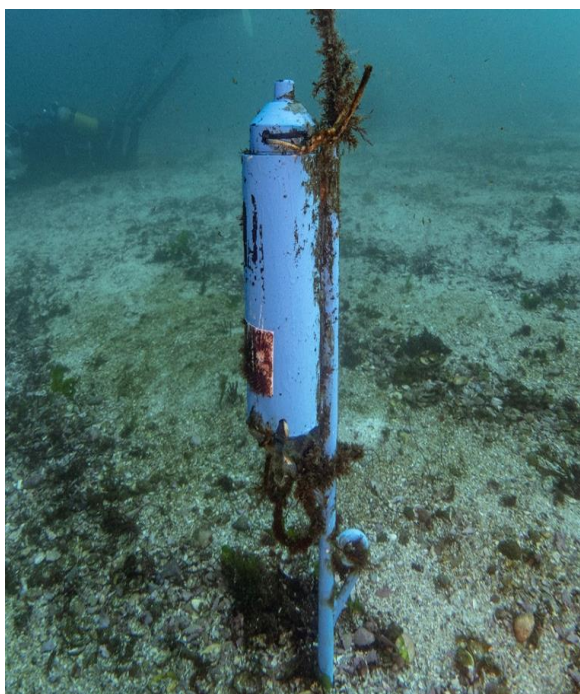
2.1.6.1.1 Sistemas de Telemetría Acústica

Conceptos básicos para la selección de sensores

La telemetría acústica se ha convertido en una herramienta esencial para el estudio de la ecología espacial (movimientos y comportamiento) de

poblaciones naturales en el medio costero (Hussey et al. 2015) ya que es capaz de proporcionar estimaciones continuadas de la posición del mismo individuo durante largos periodos de tiempo. Brevemente, la técnica consiste en el marcaje de individuos de especies marinas con emisores acústicos que emitirán una señal a intervalos predefinidos (desde segundos a minutos) que será almacenada en receptores submarinos (hidrófonos) previamente fondeados en la zona de estudio (Figura 17).

A



B



Figura 17. Receptores acústicos instalados en aguas del Parque Nacional das Ilhas Atlánticas mediante A) un anclaje fijo en fondos planos (tipo tornillo) y B) mediante un muerto en fondos rocosos (tipo muerto).

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del proyecto Atlazul, es el refuerzo e integración de la red atlántica de observatorios marinos transfronterizos, un aspecto crucial es la compatibilidad entre los equipos instalados por los diferentes grupos de investigación que componen el consorcio. Pero esto es extensible a la instalación de dispositivos en cualquier otro ámbito.

Existen varias compañías que ofertan entre sus productos hidrófonos y emisores que permiten llevar a cabo estudios de telemetría acústica en el medio acuático (Innovasea, Thelma Biotel, Sonotronics, Lotek, **Star Oddi**); pero que pueden usar diferentes protocolos de comunicación que los hagan incompatibles entre ellos (Tabla 5).

Old name	Thelma	Sonotronics	Lotek	MAP-110*	MAP-112*	MAP-113*	MAP-114*	MAP-115*
	OPI	OPI	OPI	-	-	-	-	-
	OPs	OPs	OPs	-	-	-	-	-
R64K	A69-1303	A69-1303	A69-1303	A69-1303	A69-1303	A69-1303	A69-1303	-
S256	A69-1105	A69-1105	A69-1105	A69-1105	A69-1105	A69-1105	-	-
R04K	A69-1206	A69-1206	-	A69-1206	A69-1206	-	-	-
R256	A69-1008	-	-	A69-1008	-	-	-	-
<i>Unique code sets NON-compatible between manufacturers</i>								
	HS256	ACT	Lotek Map			A69-9006	A69-9006	A69-9006
	DS256				A69-9005			
	R01M				A69-9004	A69-9004	A69-9004	A69-9004
	S64K				A69-9002	A69-9002	A69-9002	A69-9002
					A69-9001	A69-9001	A69-9001	A69-9001
						A69-1602	A69-1602	A69-1602
					A69-1601	A69-1601	A69-1601	A69-1601

N.B. Protocols of the same colour are **compatible**. For example, Thelma A69-1303 protocol equipment is compatible with all other equipment using A69-1303, **except** for Vemco/Innovasea MAP-115, where this protocol is no longer supported.

OPI and OPs are new Open Protocols, available for **ALL** manufacturers and supported by the ETN. OPI for ID tags and OPs for sensor tags.

*Vemco/Innovasea protocol sets

Tabla 5. Tabla resumen con las compatibilidades entre protocolos de las diferentes compañías.

Por lo tanto, el primer requisito para la selección de los equipos de telemetría acústica a instalar debería ser asegurar una total compatibilidad entre todos los elementos de la red. En este sentido, es conveniente seguir los principios de compatibilidad de la *European Tracking Network* (ETN) que junto con varias de las compañías anteriormente mencionadas desarrollaron un protocolo abierto (Open Protocol, OP) para asignación de IDs (OPI and OPs).

A día de hoy las siguientes compañías han firmado un memorando de entendimiento de Open Protocol: Lotek, Sonotronics, Thelma, Star Oddi, y Chelonia Limited (<https://europeantrackingnetwork.org/en/memorandum-understanding>). De este modo no solo nos aseguraremos la compatibilidad dentro de los observatorios resultantes de ATLAZUL (<https://www.vliz.be/en/imis?module=project&proid=5218&ext=1>), sino con

toda la red de equipos acústicos que componen la ETN (<https://www.lifewatch.be/etn/>) ampliando el alcance de los estudios.

El hecho de poder funcionar en red con la ETN, pone a disposición de la comunidad científica hasta el momento un total de 2110 receptores en este momento, lo que ha permitido realizar más de 509 millones de detecciones de individuos, de un total de 81 especies diferentes. Esto aumenta la potencia de la telemetría acústica como herramienta para comprender el funcionamiento de los ecosistemas marinos y los efectos de las perturbaciones humanas, tales como la llegada de especies invasoras, la degradación de hábitats, alteraciones en las rutas climáticas, etc. Esta información también ofrece un gran potencial para mejorar la efectividad de la medida de gestión de los ecosistemas y las prácticas pesqueras al identificar áreas y períodos que son importantes para diferentes especies marinas.

Otro requisito relacionado con la compatibilidad entre elementos de la red de observatorios, es la frecuencia de trabajo de los equipos instalados. La recomendación general sería trabajar en la frecuencia de 69 kHz, la aceptada dentro de la ETN para el OP.

Para la selección de los equipos se debe tener en cuenta las profundidades de trabajo. En sistemas costeros someros (<20m de profundidad) se puede recurrir a diferentes sistemas de fondeo en posiciones fijas conocidas que mantengan los equipos en posición vertical cerca del fondo (Figura 17).

También se puede recurrir a plataformas de observación en superficie ya existentes, como boyas oceanográficas, asegurándose que los hidrófonos queden orientados hacia el fondo, como ha sido el caso en muchos de los receptores colocados dentro del marco del proyecto Atlazul, que han aprovechado, las boyas oceanometereológicas del Observatorio Costero de Galicia, que se integran dentro del observatorio RAIA.

En zonas profundas, fuera del rango de operaciones del buceo autónomo, existen hidrófonos equipados con liberadores acústicos para su recuperación desde superficie.

Respecto a los emisores acústicos (Figuras 18 y 19) para marcar a las especies objeto de estudio se deben considerar los siguientes aspectos:

- Potencia de la señal, que determina el alcance de la señal permitiendo un mayor rango de detección a mayor potencia de la señal; pero que limitará la durabilidad de la batería interna del mismo. Es conveniente realizar un test de rango de los equipos acústicos con los diferentes niveles de potencia de la señal.
- Frecuencia de emisión, que se puede programar para que emitan la señal acústica a intervalos de tiempo determinados, desde segundos a minutos. Una mayor frecuencia de emisión aumentará las probabilidades de detectar la señal; pero irá en detrimento de la duración de la batería del emisor así como aumentar las potenciales colisiones de señales emitidas por otros emisores en la zona.
- Tamaño del emisor, que generalmente afecta a la batería (duración del emisor) y a la potencia de la señal; pero siempre con el limitante del tamaño de los ejemplares que vamos a marcar.
- Sensores, muchos de los emisores ofertados por las diferentes compañías disponen de la posibilidad de añadir un sensor que registre datos de diferentes variables como la profundidad, temperatura, aceleración, inclinación, etc. Estos sensores pueden ser muy útiles para determinar eventos de mortalidad en los ejemplares marcados (i.e. (Villegas-Ríos et al. 2020), por eso, siempre que sea posible es recomendable utilizar marcas acústicas con sensores de profundidad o algún otro que proporcione información sobre el nivel de actividad (Pereira et al. 2021).

Teniendo en cuenta estas consideraciones generales, la selección del emisor vendrá determinada en gran medida por la especie objeto de estudio y de los objetivos del mismo.



Figura 18. Emisor implantado en un ejemplar de *Labrus bergylta* antes de ser liberado al medio natural.

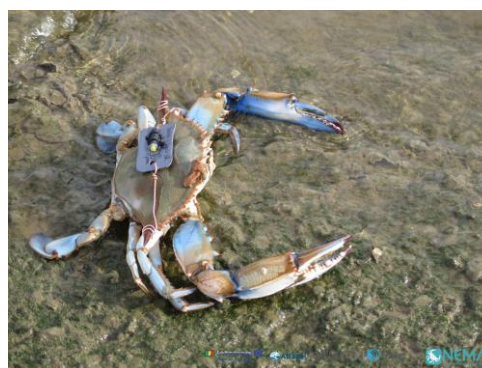


Figura 19. Cangrejos azules marcados con transmisores MP9L (Thelma Biotel) en el estuario del Guadiana (SE-Portugal) por la Universidad del Algarve en Mayo de 2022, dentro del proyecto ATLAZUL.

Mantenimiento de sensores y gestión de datos

Las redes de telemetría acústica implementadas dentro del proyecto ATLAZUL, y las más comúnmente utilizada dentro de la ETN y la Red Portuguesa de Receptores de Telemetría Acústica (PTN - Portuguese Tracking Network) integrada en el observatorio CoastNet (<https://coastnet.pt/>), están compuestas por equipos *autocontenidos*. Los receptores disponen de una batería interna como fuente de alimentación, además de una memoria interna para guardar los datos registrados; no requieren de comunicación externa de ningún tipo.

Esto supone una ventaja en términos de trabajo de mantenimiento; pero exige visitas periódicas tanto para el cambio de baterías como para descarga de los datos. Las baterías más utilizadas son de litio de celda cilíndrica de capacidad de 3,6 V y 19,0 Ah. Existen opciones con receptores que se pueden usar con una unidad de conector de cable que permite el acceso a datos en tiempo real y una fuente de alimentación externa, que reducirían el trabajo de mantenimiento, pero requieren de una instalación más complicada y costosa en términos económicos y que es dependiente de una plataforma de observación que sustente todo el equipo accesorio en superficie. Esta última opción es la menos utilizada en las redes actualmente instaladas en Europa.

Si la opción elegida son los equipos (**receptores acústicos**) *autocontenidos* las labores de mantenimiento son realmente sencillas y constan básicamente de un cambio de baterías y descarga de los datos. La frecuencia mínima de los trabajos de mantenimiento para un correcto funcionamiento de los equipos es baja. La duración de las baterías puede superar el año en condiciones normales y la capacidad de la memoria puede almacenar más de medio millón de registros, por lo que dependiendo de la cantidad de ejemplares marcados dentro del rango de detección del receptor, en términos generales, con un cambio de batería anual y una descarga de datos cada 6 meses podríamos estar cubriendo las necesidades mínimas para estos equipos. Se recomienda el uso de algún elemento *antifouling*, como pueden ser las pinturas anti-incrustantes que reduzca la epibiotas que se adhiera al hidrófono y que pueda reducir la detección de señales acústicas.

Para la **descarga** de la información registrada en los receptores acústicos es preciso disponer de un ordenador portátil con conexión bluetooth que permita la descarga *in situ* de los datos. El ordenador debe tener instalado el software específico de la marca de los receptores (Thelma Biotel, Innovasea, etc.). Para trabajos a bordo de buques es recomendable disponer de un equipo informático robusto resistente a mojaduras, o al menos disponer de una zona seca para manejo de los equipos informáticos. Alternativamente, los datos se pueden descargar en tierra si se cuenta con la cantidad de receptores necesarios para intercambiar cada equipo. Esta opción tiene la ventaja de

reducir el número de inmersiones necesarias para realizar la operación, en caso de que la recuperación del receptor requiera realizar una inmersión de buceo.

Los **emisores acústicos** se consideran *fungibles*. No existe posibilidad de cambio de batería, por lo que podríamos decir que es un elemento del sistema que carece de mantenimiento una vez implantado. Sin embargo, existe la posibilidad de recuperar el emisor en el caso de que los ejemplares marcados sean capturados por parte de la flota profesional o recreativa. Por lo tanto, es recomendable incentivar la cooperación con el sector pesquero mediante campañas informativas acerca de las labores de marcado.

Se requiere de **personal cualificado** con experiencia en el manejo de estos equipos y con titulación específica: *buceo y experimentación animal*. Dependiendo de los sistemas de fondeo empleados para instalar los receptores acústicos es recomendable disponer en el equipo de trabajo de personal con la titulación de buceo correspondiente para asistir en la instalación y recuperación de los equipos. Además, para el manejo de los animales durante las campañas de marcado es preciso que el responsable esté acreditado por el organismo competente para procedimientos de experimentación animal. Además, todo proyecto que incluya marcado de animales requiere de la autorización del proyecto de experimentación animal por parte de la autoridad competente.

Como norma general, es preciso disponer de un **buque** para acceder a las localizaciones donde están instalados los equipos y que cumpla con los requisitos mínimos (eslora, potencia, autonomía) adaptada a las condiciones de navegación de la zona en cuestión.

Las redes de telemetría acústica pueden generar una gran cantidad de datos, incluidos datos de detección de receptores acústicos y datos ambientales, que requieren una estrategia adecuada para garantizar la trazabilidad y fomentar el intercambio de datos. Los datos recopilados serán de tres tipos:

- (1) Registros de las detecciones acústicas: Se registrarán las detecciones acústicas de los transmisores implantados en los organismos marinos objeto de estudio, que incluirán información del momento (fecha y hora) de detección, la identificación del transmisor, la identificación del

receptor y el valor del sensor correspondiente (presión, aceleración, etc.).

(2) Registros complementarios de posición: Se necesitan algunos archivos de metadatos para comprender los archivos de detección, como información sobre la ubicación de los receptores acústicos, información sobre las características de los transmisores utilizados e información biológica de los individuos marcados.

(3) Registro de temperatura: Se registrarán datos de la temperatura de la mar asociada a cada estación acústica.

Para garantizar la accesibilidad a largo plazo, las bases de datos de detecciones acústicas, incluidos los metadatos sobre receptores acústicos, transmisores e individuos marcados, se subirán al portal de datos de la European Tracking Network (ETN) alojada en el Flanders Marine Institute (VLIZ) como parte de la contribución a LifeWatch. La propia ETN proporciona un manual para la gestión de este tipo de datos (<https://www.lifewatch.be/etn/assets/docs/ETN-DataManual.pdf>) así como una guía rápida para la subida de datos a la plataforma (<https://www.lifewatch.be/etn/assets/docs/ETN-QuickGuide.pdf>). Existe además un paquete informático en código R para facilita la gestión de los datos generados en las redes acústica y su interacción con la plataforma de la ETN (<http://marine.lifewatch.eu/etn-r-package>). Para más información sobre la política de datos de la ETN se puede consultar el siguiente documento: <https://www.lifewatch.be/etn/assets/docs/ETN-DataPolicy.pdf>.

Las aportaciones de los distintos miembros de ATLAZUL que trabajan con telemetría pueden consultarse en este enlace VLIZ: <https://www.vliz.be/en/imis?module=project&proid=5218&ext=1>.

Las bases de datos de información de peces y registros de temperatura, junto con el resto de outputs derivados de la red (publicaciones, material divulgativo, etc.), se podrán depositar en el repositorio del CSIC (DigitalCSIC). DigitalCSIC es el repositorio institucional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas que organiza, conserva y da acceso abierto a la

producción investigadora del CSIC siguiendo los principios FAIR, para hacer que los datos sean Localizables, Accesibles, Interoperables y Reutilizables.

2.1.6.2 Sensores acústicos activos

En cuanto a los sensores activos (AAM) estos actúan transmitiendo una onda de sonido y midiendo la señal reflejada por los objetos que encuentra en su camino. Los sensores AAM pueden detectar cualquier cosa, desde manchas de zooplancton, peces, mamíferos marinos.

La clasificación de las especies a partir de los espectros de sonido reflejado es compleja y dependen de las características de los mismos. Durante las últimas décadas, el principal avance es la llegada de los sistemas acústicos multifrecuencia de banda ancha que permiten una mayor discriminación entre marcas sonoras específicas y por tanto una mayor precisión en la identificación de especies (Moustahfid et al. 2020). La marca sonora específica de un individuo, viene determinada por como ese animal dispersa el sonido, lo cual depende de sus propiedades acústicas, por ejemplo, en el caso de peces, si tiene una inclusión de gas como una vejiga natatoria, o partes duras, como un caparazón o un esqueleto óseo.

La dispersión del sonido por parte de un individuo también cambia con su tamaño, forma y orientación en relación con la fuente acústica y el receptor. Los diferentes tipos de animales exhiben respuestas de frecuencia características que han sido modeladas y medidas, de modo que un mayor ancho de banda aumenta la información disponible para la caracterización y clasificación del objetivo biológico (Benoit-Bird y Waluk 2020). Las ventajas en la identificación y reducción de incertidumbre, vienen acompañadas de complejidades adicionales asociadas con las calibraciones del sistema, el almacenamiento de datos, la velocidad de procesamiento, el análisis de señales y su interpretación (Demer, D. A. et al. 2017), que tiende a compensarse con el rápido avance de los procesadores informáticos y las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (Fernandez Garcia et al. 2021; Rezvanifar et al. 2019). Los datos generalmente se almacenan brutos sin pre-procesar y se transmiten en tiempo real, aunque los modelos DT-X-Sub y WBAT (Tabla 5) tienen procesadores integrados que en son capaces de realizar resúmenes

simplificados de los ecogramas de forma gráfica, que puede incluir alertas activadas para eventos de encuentro con especies objetivo.

A su vez, los rápidos avances en la miniaturización de sensores acústicos (transductores) y la mejora de las baterías, así como de los sistemas de captación de energía solar, eólica o undamotriz, permiten montarlos en diversas plataformas móviles, como boyas, drones, ROVs, vehículos submarinos autónomos (gliders, etc) o vehículos superficiales no tripulados (USVs), etc. (Howe et al. 2019), lo que está haciendo que esta tecnología de detección sea cada vez más rentable y polifacética.

2.1.7 Sensores genéticos

Los sensores genéticos, son sensores diseñados para analizar DNA medioambiental (Environmental DNA-eDNA) in situ. Todos los organismos liberamos partículas de ADN a nuestro medio a través de la piel, heces, gametos, excreciones, etc, el eDNA hace referencia a ese material genético, que podemos obtener directamente de una muestra ambiental, en el caso de los organismos marinos, de una muestra de agua. El procedimiento requiere la recogida de una muestra de agua, su filtrado para concentrar el contenido de ADN para su posterior extracción y amplificación por el método de PCR cuantitativa (qPCR), o meta-barcoding, dependiendo del objetivo del análisis. Normalmente se utilizan qPCR para la detección de una especie diana en concreto, como por ejemplo una especie invasora, o tóxica, mientras que los métodos de meta-barcoding son mejores para identificar y describir comunidades biológicas completas, tanto dentro de un grupo taxonómico en particular, como a través de diferentes grupos taxonómicos.

Algunos estudios sugieren que la eficacia de esta técnica para identificar la diversidad de especies, es comparable con la obtenida mediante técnicas de muestreo tradicionales, como los muestreos de pesca o buceo, lo que la convierte en una potencial alternativa para la evaluación de stocks pesqueros (P. F. Thomsen et al. 2012). Algunos estudios sugieren que esta técnica podría también ayudar a reducir los descartes de ciertas pesquerías, detectando zonas de menor interés para la pesca al presentar un porcentaje mayor de especies de menor interés (Uhlmann, Ulrich, y Kennelly 2019). Aunque se han

encontrado correlaciones positivas entre los datos de abundancia de pesca suministrados por arrastreros y los obtenidos mediante muestras de eDNA (P. F. Thomsen et al. 2016), esta técnica todavía muestra algunas limitaciones. Por ejemplo, desconocemos la correlación entre la cantidad de ADN excretado y la biomasa de las diferentes especies, lo cual dependerá de factores bióticos como el tamaño, la edad, el sexo o la salud. También desconocemos el tiempo de retención del ADN, es decir cuánto tiempo tarda en degradarse, lo cual es dependiente de múltiples factores como la temperatura, el pH, la irradiación solar, etc. (Hansen et al. 2018).

Otro problema potencial para su aplicación directa en sistemas de observación continuos, es la capacidad de realizar estos análisis in situ, aunque se está avanzando rápidamente en su portabilidad. En la actualidad, ya existen equipos y kits portátiles que permiten la extracción y secuenciación de ADN fuera del laboratorio. Por ejemplo, Oxford Nanopore Technologies ha diseñado un dispositivo ([Voltrax](#)) para la preparación automatizada de muestras por metabarcoding, que combinado con una máquina de secuenciación portátil como la [MinION](#) desarrollada también por ellos permite realizar este tipo de análisis fácilmente a bordo de un buque. Incluso están desarrollando un modelo más pequeño todavía, el [SmidgION](#) que es compatible con un Smartphone y puede secuenciar hasta 20 Gigabases de ADN de una vez. Existen otras soluciones portátiles basadas en el método qPCR, como la desarrollada por [Biomeme](#), que consiste en un kit de extracción rápida de ADN que permite la preparación de la muestra en pocos minutos sin necesidad de ningún equipo de laboratorio y un dispositivo de secuenciación ultra-pequeño que se acopla a un Smartphone y puede correr hasta nueve muestras simultáneamente utilizando hasta dos especies de objetivo diferentes en una hora.

Por último, se están desarrollando también sensores genéticos, también llamados “ecogenómicos”, que son sensores sumergibles capaces de realizar automáticamente el muestreo del agua y el análisis de ADN (Wang et al. 2019). El único modelo comercial que existe hasta el momento es el [Environmental Sample Processor](#) (2G ESP) desarrollado por McLane Labs y permite la recogida de muestras, extracción de ADN y análisis por qPCR. También es capaz de medir toxinas y realizar ARNr fingerprinting usando ELISA y matrices de hibridación.

Además transmite los datos prácticamente en tiempo real al usuario y ya ha demostrado su aplicación práctica para la monitorización de microorganismos, zooplancton y distintas especies de peces (Scholin et al. 2017). Este sensor podría acoplarse en diferentes plataformas estacionarias o móviles, incluso acoplarse al casco de un barco de pesca, del mismo modo que una ecosonda. En estos momentos se está avanzando hacia una tercera generación del ESP, que permita una mayor miniaturización para su integración en el fuselaje de un vehículo autónomo sumergible (AUV).

2.1.8 Biosensores

Los biosensores son dispositivos analíticos, que utilizan para la detección de una sustancia química un componente biológico combinado con un detector fisicoquímico. Los biosensores tienen la ventaja de que complementan a los métodos químicos para proporcionar información sobre las interacciones de ciertos compuestos con material biológico (Kröger y Law 2005). Los biosensores se clasifican según su elemento sensor biológico (enzimas, anticuerpos, células, aptámeros, tejidos, MIP, ADN o incluso individuos completos) o por el tipo de detector físico-químico (óptico, electroquímico, piezoeléctrico o térmico). Cuando el analito objetivo interactúa con el elemento sensor biológico, el transductor genera una señal relacionada con la concentración del analito. La señal es amplificada para mostrarla. En (Hara y Singh 2021) se hace una revisión detallada de los diferentes biosensores desarrollados para la detección de pesticidas y metales pesados, mientras que en (Bertani y Lu 2021; Kröger y Law 2005) se detallan también biosensores específicos para la detección de toxinas y disruptores endocrinos.

El carácter sésil y gregario de gran parte de moluscos bivalvos ha permitido el uso de este grupo de organismos como centinelas de los cambios ambientales en el entorno que habitan. Para ello durante años se han desarrollado sensores que permiten monitorizar las reacciones del organismo diana. La caracterización del movimiento de las valvas de los moluscos bivalvos (Nagai et al. 2006) es un ejemplo exitoso de la combinación de la tecnología (electrónica) y la ecología clásica para implementar sistemas de vigilancia automatizados y fáciles de manejar, con el uso de organismos centinela. A

modo de ejemplo, MolluSCAN-eye (<https://molluscan-eye.com/en/home/>) es un sistema altamente especializado que transfiere los datos del movimiento de las válvulas de forma automática a través de una red móvil (Andrade et al. 2016), permitiendo monitorizar comportamientos anormales relacionados con la presencia de contaminantes, metales o microalgas tóxicas (Tran et al. 2004). Estas acciones permiten una mejor gestión de las condiciones de determinadas zonas acuícolas y/o de interés comercial respecto a cultivos marinos de zonas costeras.

Este tipo de biosensores han sido utilizados con éxito en las Rías Gallegas, en experimentación con moluscos bivalvos y las respuestas frente a fitoplancton tóxico, variabilidad ambiental natural, escenarios de acidificación oceánica y calentamiento global (Figura 20). Además, debido a la importancia de las proliferaciones de fitoplancton tóxico (microalgas nocivas para la salud humana), el potencial de estos sensores de comportamiento valvar de los moluscos bivalvos es enorme por su uso como biosensores en sistemas de alerta temprana (EWS del inglés Early Warning System) de proliferaciones de este tipo de algas.

La caracterización valvar se implementa como tecnología emergente mediante el uso de sensores no invasivos y de alta frecuencia (del inglés HFNI, high-frequency non-invasive) en organismos de carácter y vida sésil por lo que pueden reflejar significativamente la salubridad del ambiente local y sus cambios a partir del comportamiento del organismo.

Esta técnica incluye un sensor Hall en una de las valvas de los moluscos y un imán en la otra que establecen un campo magnético que cambia con el grado de apertura-cierre valvar y se registra con alta frecuencia.

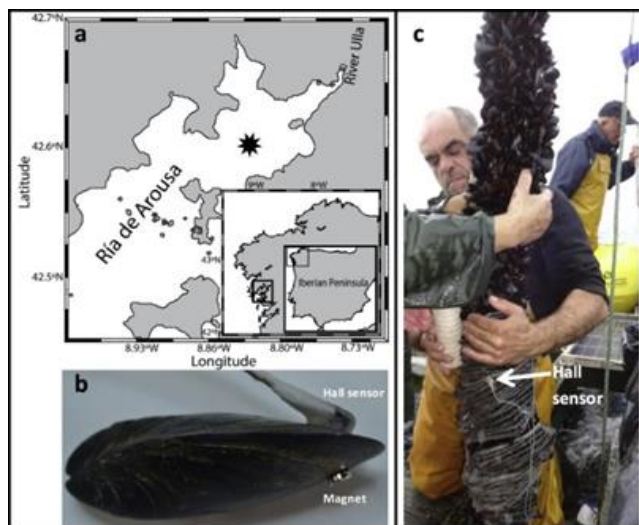


Figura 20. Esquema de uso del sensor Hall y valvometría en cuerda de cultivo de mejillón (Ría de Arousa).

Actualmente se está trabajando en la miniaturización de este sistema y en el desarrollo de sensores “*low cost*” para facilitar su implementación como técnica de monitorización en acuicultura. Este desarrollo contempla el uso de un equipo controlado por Arduino (Mega2560 R3) usando código abierto y software libre. El flujo de datos al PC es usado con una script de Python que registra como ASCII en el disco duro y transfiere los datos a un servidor MySQL que se ejecuta en el ordenador. La base de datos MySQL está conectada a una plataforma de visualización Grafana que, a su vez, puede trazar los datos a través de cuadros de mando en cualquier navegador de Internet.

Mantenimiento de sensores y gestión de datos

Los biosensores seleccionados para la monitorización de la apertura valvar están basados en el efecto Hall, en la aparición de un campo eléctrico, inducido en el sensor situado en una de las valvas, en presencia de un campo magnético, generado por el imán localizado en la valva opuesta. Las dos piezas fundamentales de este sistema son sensibles a la corrosión y, por lo tanto, deben cubrirse de sustancias impermeables (resinas, pegamentos y/o esmaltes) que impidan el contacto con el agua marina y facilitan su fijación a las valvas. Dado que el campo magnético se debilita con la distancia, los compuestos usados deben crear una capa aislante lo más fina posible para no

aumentar la separación entre imán y sensor Hall al tiempo que garanticen la impermeabilización a las presiones hidrostáticas existentes en las profundidades de trabajo.

Los protocolos de mantenimiento de estos sensores se orientan a la fase inicial de fijación y aislamiento, a pruebas de estanqueidad de los sensores durante un determinado tiempo (una semana) para asegurar su impermeabilización. Durante el período de trabajo del sensor se monitoriza su nivel de señal base para comprobar si hay deriva que pueda indicar corrosión. En general la corrosión no es rápida (escalas de semanas) y hasta que no es muy intensa no suele afectar a las observaciones de apertura valvar que se basan en las diferencias de lecturas separadas varias decenas de milisegundos.

En cuanto a la adquisición y almacenaje de datos, el flujo de datos en 3 etapas:

- 1) La primera etapa, implementada en el Arduino, es la grabación de datos brutos en binario dentro del instrumento, en la tarjeta de memoria SD.
- 2) La segunda, con scripts en Python ejecutados en un ordenador tras descargar los ficheros, es la conversión a unidades físicas y formato en ASCII de los datos almacenados en binario.
- 3) La tercera, y última, corresponde al procesamiento de las observaciones incluidas en los ficheros ASCII con scripts en R para estimar las métricas que describen el comportamiento valvar.

En instrumentos con biosensores destinados a bateas hay un paso intermedio entre la etapa 1 y la 2, y es el envío de los datos en binario desde el instrumento hasta un servidor en el laboratorio usando un modem GPRS. Entre las etapas 2 y 3 también puede haber un paso intermedio, el envío de las observaciones a una base de datos MySQL que será la fuente de registros para el sistema de visualización Grafana.

2.2 Plataformas de observación

A medida que los sensores se vuelven más pequeños y descienden sus requerimientos de energía, aumenta el número de plataformas en que podemos colocarlos, ampliando enormemente nuestra capacidad de observación (Figura 21). Aumentan además las capacidades de comunicación, lo que permite comunicarse de forma remota a plataformas lejanas, para comprobar su correcto funcionamiento, alterar los esquemas de muestreo de un determinado aparato, así como recopilar en tiempo real la información de los sensores que las diferentes plataformas transporten.

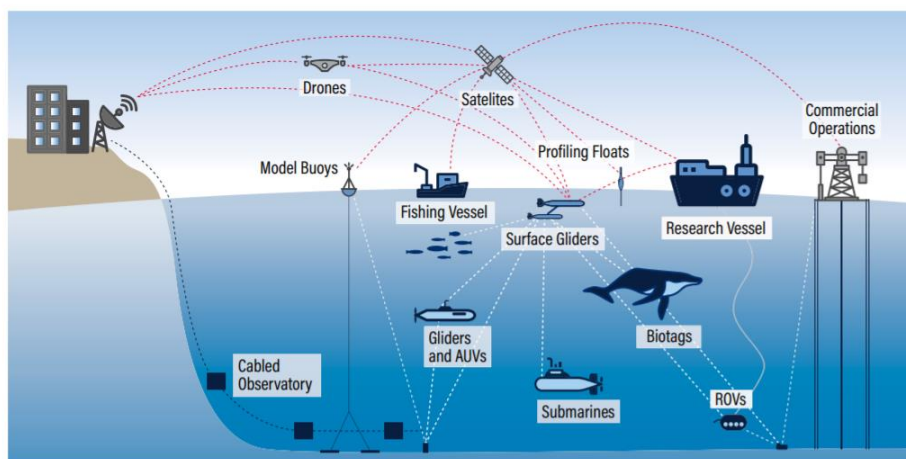


Figura 21 Representación de los diferentes tipos de plataformas de observación automática que existen en la actualidad. Extraída de (Leape, Abbott, y Sakaguchi 2020)

Durante las últimas décadas ha habido un avance impresionante en el desarrollo de nuevas plataformas autónomas para la recogida de observaciones oceanográficas, a continuación, detallaremos los principales avances de los tipos principales de plataformas, haciendo especial hincapié en las utilizadas dentro del proyecto Atlazul.

2.2.1 Satélites

Los datos provenientes de satélites, plataformas privilegiadas para la observación y seguimiento de fenómenos que ocurren en la superficie terrestre, han cambiado la manera de estudiar la naturaleza. Se ha pasado de la micro-escala a, directamente, la meso- y macro-escala.

La rápida evolución de la tecnología satelital ha impulsado una revolución de la teledetección y un cambio de paradigma en el tipo de misiones satelitales que se realizan, pasándose de misiones primordialmente experimentales impulsadas por las grandes instituciones gubernamentales a proyectos más pequeños que apoyan a una variedad más amplia de usuarios y necesidades. Se utilizan ahora satélites mucho más pequeños, que se están lanzando con mucha más frecuencia, algunas estimaciones calculan que se lanzarán entre 2018 y 2027 unos 7.000 satélites, mientras que en la década anterior se lanzaron menos de 1.000 (Cusack et al. 2021). Alrededor del 82% de estos satélites formarán parte de constelaciones construidas por grandes corporaciones como SpaceX y Amazon. El aumento de la capacidad satelital amplía el área de cobertura y el intervalo de captación de los sensores en ellos incorporados, que van desde sensores ópticos como el Radiómetro de Infrarrojo Visible (Infrared Imaging Radiometer Suite; VIIRS) que permite detectar luces aisladas a 800 kms de la tierra y con ello perseguir pequeñas embarcaciones realizando tareas de pesca ilegal (Oozeki et al. 2018; Ruiz, Caballero, y Navarro 2020), a sistemas de radar de apertura sintética (SAR), que permiten obtener imágenes de alta resolución sin la interferencia de nubes u otras interferencias meteorológicas con las cuales se puede llegar a identificar bancos de peces en base a la estela que dejan en la superficie con su movimiento (Klemas 2013), así como la presencia de diferentes embarcaciones (Cusack et al. 2021), o incluso sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging) que de forma análoga al radar, utilizan la tecnología láser para obtener imágenes de alta resolución que permiten incluso detectar las migraciones verticales del zooplancton a escala planetaria (Behrenfeld et al. 2019).

El lanzamiento de constelaciones de satélites equipados con SAR o LiDAR se está popularizando, debido al avance en la miniaturización y abaratamiento de esta tecnología, incrementándose el número de iniciativas privadas en este sentido. Por ejemplo, [Capela Space](#) espera tener operativa en 2022 una red de 36 satélites equipados con SAR que permitirán a sus clientes solicitar imágenes de zonas concretas con alta resolución (de entre 4m y 50 cms de resolución) y prácticamente a tiempo real (con una hora de retraso). [IceEye](#) está desarrollando también una constelación de 18 satélites con similares

características. Esto demuestra la existencia de un potencial mercado comercial para este tipo de datos satelitales, pero muchas de estas empresas, como por ejemplo [Planet Labs](#) proporcionan datos “degradados” de menor resolución de forma gratuita con fines no comerciales, como la investigación o la gestión integrada de los océanos (Leape, Abbott, y Sakaguchi 2020).

La proliferación de imágenes cada vez con un mayor potencial, ha favorecido la utilización de la información satelital para comprender los impactos globales en el océano, rastrear cambios en la costa y diferentes ecosistemas, monitorizar la contaminación, así como comprender variaciones en las condiciones ambientales que afectan al reclutamiento, distribución, abundancia y disponibilidad de la pesca, etc. Los sensores remotos pueden proporcionar una amplia gama de índices del estado del ecosistema.

Los parámetros ambientales específicos que se miden más comúnmente a partir de sensores remotos aéreos y satelitales incluyen: temperatura de la superficie; propiedades ópticas o bioópticas de la superficie (color del océano, coeficiente de atenuación difusa, materia suspendida total, sustancia amarilla, pigmentos de clorofila); salinidad; circulación vertical y horizontal, incluidos frentes y “eddies”; contaminación; condiciones de viento y oleaje. En la tabla 6, extraída de una revisión exhaustiva realizada por Williamson et al. 2019, se detallan los sensores colocados en satélites utilizados para obtener variables ambientales marinas, y las misiones a las que están asociadas.

En la Tabla 7 extraída también de (Williamson et al. 2019) se recopilan portales de descarga donde obtener los datos referidos, aunque [Copernicus Marine Service](#), constituye un repositorio agregado de la mayor parte de estos datos, permitiendo el acceso a más de 160 productos derivados de datos satelitales.

Sensor	Satellite	Variable	Temporal coverage	Temporal resolution	Spatial coverage	Spatial resolution	Wavelength region	Bands	Reference
Polar orbiting passive microwave sensors									
AMSR-2	GCOM-W1	Sea surface temperature Wind	2012–present	Daily	Global	5–62 km	6.90–89.0 GHz	7	Data Users' Manual for the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)
AMSR-E	AQUA	Sea surface temperature	2002–2011	Daily	Global	5–50 km	6.90–89.0 GHz	6	AMSR-E Data Users Handbook
MIRAS	SMOS	Salinity	2009–present	1–10 day	global	30–50 km	1.40 GHz	2	European Space Agency. SMOS Data Products
SSM/I	DMSP	Sea surface temperature	1999–present	Daily	Global	25 km	19.35–85.50 GHz	7	DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation. Final Report.
TMI	TRMM	Sea surface temperature	1997–2015	NA	Global	6–50 km	10.65–85.50 GHz	9	TRMM Data Users Handbook
WINDSAT	Coriolis	Sea surface temperature Wind	2003–present	8 day	Global	25 km	6.80–37.00 GHz	5	WindSat Quick Guide
Polar orbiting active sensors									
AQUARIUS	SAC-D	Salinity	2011–2015	7 day	Global	150 km	1.40 GHz	1	Aquarius User Guide
ASCAT	METOP-A	Wind	2006–present	29 day	Global	25–50 km	5.25 GHz	1	ASCAT L2 winds Data Record Product User Manual
NSCAT	ADEOS	Wind	1996–1997	41 day	Global	25 km	13.99 GHz	1	https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/adeos
SAR	ERS-1/2	Sea surface height Wind	1991–2010	3 day 35 day 168 day	Global	0.03 km	5.30 GHz	1	ERS User Handbook
SeaWinds	QuikSCAT	Wind	1999–2009	2 day	Global	25 km	13.40 GHz	1	QuikSCAT Science Data Product Users' Manual
Geostationary sensors									
ABI	GOES-R	Sea surface temperature	2017–present	5 min	Western hemisphere	0.5–2 km	0.47–13.30 μm	16	GOES-R ABI Fact Sheet
AHI	Himawari-8	Sea surface temperature	2015–present	15 min	Western Pacific	0.5–2 km	0.46–13.30 μm	16	Himawari-8/9. Himawari Standard Data User's Guide
Imager	GOES 12-15	Sea surface temperature	2003–present	30 min	Western hemisphere	4 km	0.65–13.70 μm	5	NOAA Technical Report NESDIS 131
SEVIRI	Meteosat-8	Sea surface temperature	2002–present	15 min	Europe, Africa, Indian Ocean	1–3 km	0.60–13.40 μm	12	SEVIRI Instrument User Guide

Tabla 6 Resumen de los sensores colocados en satélites utilizados para obtener variables ambientales marinas, incluyendo el detalle de la cobertura espacio-temporal de cada uno, resolución, etc. Extraída de (Williamson et al. 2019). Continúa en la página siguiente

Sensor	Satellite	Variable	Temporal coverage	Temporal resolution	Spatial coverage	Spatial resolution	Wavelength region	Bands	Reference
Polar orbiting passive optical sensors									
AATSR	ENVISAT	Sea surface temperature	2002–2012	3 day	Global	1.0 km	3.70–12.00 μm	3	European Space Agency. Envisat AATSR Product Handbook.
ATSR	ERS-1/2	Sea surface temperature	1991–2010	3 day 35 day 168 day	Global	1.0 km	0.55–12.00 μm	7	ATSR-1/2 User Guide
AVHRR	POES	Sea surface temperature	1998–present	Daily	Global	1.0 km	0.58–12.50 μm	5	NOAA-KLM User's Guide
CZCS	Nimbus -7	Ocean productivity	1978–1986	6 day	Global	0.8 km	0.43–12.50 μm	6	Nimbus 7 Coastal Zone Color Scanner Data Product Users' Guide
IASI	METOP-A	Sea surface temperature	2006–present	29 day	Global	12.0 km	3.62–15.50 μm	3	EUMETSAT IASI Level 1: Product Guide
MERIS	ENVISAT	Ocean productivity	2002–2012	2 day	Global	0.3–1.2 km	0.41–0.90 μm	15	MERIS Product Handbook
MODIS	AQUA	Deep scattering layer Frontal data Ocean productivity Sea surface temperature	2002–2011	16 day	Global	0.25–1.0 km	6.20–21.55 μm	7	Modis Technical Guide
OCI	ROCSAT-1/ Formosat-1	Ocean productivity	1999–present	2 day	Global	0.8 km	0.41–0.87 μm	8	https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-1
OCM	IRS-P4/ Oceansat	Ocean productivity	1999–present	2 day	Global	1.0 km	0.40–0.88 μm	8	Oceansat 2 Handbook
OCTS	ADEOS	Ocean productivity	1996–1997	41 day	Global	0.7 km	0.40–12.70 μm	12	OCTS Mission Overview
OLCI	Sentinel-3	Deep scattering layer Deep scattering layer	2016–present	2 day	Global	0.3–1.3 km	0.40–1.02 μm	21	Sentinel-3 User Handbook
SeaWiFS	OrbView-2	Ocean productivity Deep scattering layer	1997–2010	daily	Global	1.10 km	0.40–0.88 μm	8	SeaWiFS Technical Report Series
SGLI	GCOM-C	Ocean productivity	2017–present	2–3 day	Global	0.25–1.0 km	0.38–12.00 μm	19	GCOM Science PI
SLSTR	Sentinel-3	Sea surface temperature	2016–present	2 day	Global	0.5–1.0 km	0.50–12.00 μm	9	Sentinel-3 User Handbook
VIIRS	SNPP	Deep scattering layer Frontal data Ocean productivity Sea surface temperature	2011–2017	Daily	Global	0.3–0.7 km	0.41–12.01 μm	22	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Sensor Data Record (SDR) User's Guide

Tabla 6 Continuación. Resumen de los sensores colocados en satélites utilizados para obtener variables ambientales marinas, incluyendo el detalle de la cobertura espacio-temporal de cada uno, resolución, etc. Extraída de (Williamson et al. 2019)

Variable	Source	Website
Bathymetry	GEBCO	https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_30_second_grid/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Chlorophyll-a	NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP) NOAA Laboratory for Satellite Altimetry ESA Copernicus Access Hub GlobColour Google Earth Engine MyOcean-Copernicus EU consortium NASA Giovanni NASA Ocean Color NERC Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP) NOAA STAR - Center for Applications and Research	https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/ https://scihub.copernicus.eu/ http://www.globcolour.info/ explorer.earthengine.google.com http://marine.copernicus.eu/ https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ http://www.neodaas.ac.uk/data/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Current	CERSAT Google Earth Engine MyOcean-Copernicus EU consortium NASA Jet Propulsion Laboratory NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP)	https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/index.php http://cersat.ifremer.fr explorer.earthengine.google.com http://marine.copernicus.eu/ https://ecco.jpl.nasa.gov/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Deep scattering layer	ESA Copernicus Access Hub NASA Giovanni NERC Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP) NOAA STAR - Center for Applications and Research	https://scihub.copernicus.eu/ https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ http://www.neodaas.ac.uk/data/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/index.php
Frontal data	NERC Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service NOAA STAR - Center for Applications and Research	http://www.neodaas.ac.uk/data/ https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/index.php
Imagery	ESA Copernicus Access Hub Google Earth Engine USGS Earth Explorer	https://scihub.copernicus.eu/ explorer.earthengine.google.com https://earthexplorer.usgs.gov/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Ocean productivity	NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP) NOAA STAR - Center for Applications and Research Oregon State University	https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/index.php http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/
Salinity	NASA Jet Propulsion Laboratory CERSAT Google Earth Engine MyOcean-Copernicus EU consortium NASA Ocean Color NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC)	https://ecco.jpl.nasa.gov/ http://cersat.ifremer.fr explorer.earthengine.google.com http://marine.copernicus.eu/ https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ https://podaac.jpl.nasa.gov/
Sea surface height	MyOcean-Copernicus EU consortium Google Earth Engine NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP)	http://marine.copernicus.eu/ explorer.earthengine.google.com https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Sea surface temperature	CERSAT Google Earth Engine MyOcean-Copernicus EU consortium NASA Ocean Color NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC) National center for environmental protection NERC Earth Observation Data Acquisition and Analysis Service NOAA Environmental Research Division's Data Access Program (ERDDAP)	http://cersat.ifremer.fr explorer.earthengine.google.com http://marine.copernicus.eu/ https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ https://podaac.jpl.nasa.gov/ http://www.ncep.noaa.gov/ http://www.neodaas.ac.uk/data/ https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html
Wind	MyOcean-Copernicus EU consortium AVISO CERSAT ESA Copernicus Access Hub Google Earth Engine NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Centre (PODAAC)	http://marine.copernicus.eu/ https://www.aviso.altimetry.fr http://cersat.ifremer.fr https://scihub.copernicus.eu/ explorer.earthengine.google.com https://podaac.jpl.nasa.gov/

Tabla 7. Listado de variables ambientales marinas recogidas a partir de satélites e información sobre el portal de descarga de cada una de ellas. Extraída de (Williamson et al. 2019)

Sin embargo, a la hora de trabajar con productos provenientes de misiones de satélites artificiales no es conveniente hablar de sensores ya que la mayoría de productos son denominados de multimisión. Esto quiere decir que para generar un mapa de temperatura superficial del mar no se recurre a un solo satélite o a una sola misión sino a un conjunto. La cuestión es qué producto puede resultar el más adecuado para una aplicación determinada.

Un ejemplo es la selección del mejor producto para obtener mapas de temperatura superficial diarios con la mayor resolución posible, en zonas complejas, como la costa Atlántica de la Península Ibérica que conforma el área de estudio de Atlazul, y posee áreas singulares como las Rías Gallegas, las desembocaduras de los distintos ríos como el Miño, Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir y la interacción de las corrientes oceánicas con las provenientes del Estrecho de Gibraltar. En este caso, el mejor de los productos analizado sería el *MEASURE-Multi-scale Ultra-high Resolution (MUR) Sea Surface Temperature*. Estos se encuentran en el Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California y consisten en imágenes de temperatura superficial del mar de 1 km de resolución espacial y de 8 bits de resolución radiométrica, provenientes de la fusión de datos de los sensores MODIS, AVHRR y de microondas GAC junto con datos *in situ*. Los distintos errores se compensan y como cada misión posee una resolución temporal distinta, en la generación de los datos MUR se emplea el método de Análisis Variacional de Multi-Resolución (MRVA).

Consideraciones para el mantenimiento y gestión de datos

Los datos MUR de temperatura superficial del mar vienen en formato netcdf y son descargados semanalmente de los servidores del JPL. En el proceso de descarga se ha observado cerca de un diez por ciento de ficheros en los que la transmisión falla o no es correcta, invalidando el archivo y debiendo ser descargado nuevamente. Sin embargo, la detección de los errores no se realiza hasta que los archivos se pre-procesan para extraer los datos y aplicar las máscaras correspondientes, retrasando el proceso de comprobación de la calidad de los datos.

Los datos vienen en Kelvin y son expresados en grados centígrados, disponiendo al final de un campo de temperaturas a nivel global con 1 km de resolución espacial. En términos de dimensiones, los campos son matrices de 18000 por 36000 que se comprimen al finalizar el procesamiento inicial. Se almacenan en el servidor QNAP (Figura 22) que se hará disponible a los socios de Atlazul a medida que los datos sean procesados.



Figura 22. Servidor QNAP para el almacenaje de datos satelitales dentro del proyecto Atlazul, localizado en la Universidad de Cádiz.

2.2.2 Plataformas “*in situ*”

Las observaciones oceánicas *in situ* son cruciales para comprender el sistema oceánico, mejorar la calidad de las predicciones y modelos oceánicos y de sus ecosistemas, así como para la validación de datos satelitales y la evaluación del impacto de las estrategias de gestión.

Las observaciones *in situ* son mediciones directas de las propiedades del agua de mar realizadas mediante una combinación de sensores en una amplia gama de plataformas que permiten realizar observaciones autónomas en el mar, como son plataformas fijas, drifters, diferentes vehículos autónomos, buques oceanográficos o incluso buques de oportunidad incluyendo barcos de pesca o de transporte comercial.

A continuación, haremos un repaso sobre las diferentes plataformas de observación “*in situ*” prestando especial atención a aquellas incluidas más directamente dentro del proyecto Atlazul.

2.2.2.1 Buques oceanográficos

Los buques dedicados a la investigación que llevan a cabo estudios globales periódicos y repetidos del océano siguen siendo el único método disponible para medir el conjunto completo de propiedades del agua en las profundidades del océano por debajo de los 2000 metros y en los mares polares cubiertos de hielo.

Los buques de investigación también son el único medio disponible para el muestreo manual discreto de las propiedades del agua, las variables del ecosistema y las muestras biológicas que aún no están automatizadas.

Existen diversas iniciativas para disponibilizar la información obtenida en estas campañas, algunas lideradas internacionalmente por el International Oceanographic Data and Information Exchange (IODE; [Research Cruises](#)), pero la mayor parte de los países mantienen también sus plataformas, como es el caso de la plataforma de la Unidad de Tecnologías Marinas del CSIC que disponibiliza datos de más de 700 campañas realizadas desde 1971 (<http://data.utm.csic.es/>) .

De especial valor, son las campañas oceanográficas recurrentes, que constituyen una contribución fundamental a la base de conocimientos para comprender patrones e identificar tendencias en los procesos biogeoquímicos.

Las series temporales biogeoquímicas obtenidas en campañas oceanográficas, proporcionan mediciones biológicas, físicas y químicas de alta calidad que se necesitan para detectar tendencias impulsadas por el cambio climático en el océano, evaluar impactos en las redes alimentarias marinas y, en última instancia, mejorar nuestra.

Existen iniciativas como las del International Group for Marine Ecological Time Series (IGMETS) que aglutina en su base de datos (<http://igmets.net/mebase>) información sobre más de 340 series temporales recogidas por múltiples instituciones, tanto en tramos costeros como de

océano abierto. Estas series temporales varían en su cobertura temporal, llegando a superar algunas de ellas los 50 años de monitorización continua en algunas estaciones. Esta iniciativa está centrada en variables biogeoquímicas, que divide en (1) Variables Hidrográficas (Oxígeno disuelto, Variables del Sistema del Carbono, Nutrientes, y Clorofila), y (2) Variables Planctónicas (referidas a la abundancia de diferentes grupos funcionales del plancton).

Para entender el funcionamiento de los ecosistemas y establecer prácticas de gestión efectivas se deben considerar las conexiones entre la hidrología y la biota de los ecosistemas acuáticos (Chícharo y Barbosa, 2011).

Como componente importante de la biota, el zooplancton representa un papel fundamental en la red trófica, promoviendo el flujo de energía entre los productores primarios y los consumidores de orden superior (Ferdous y Muktadir, 2009). Por lo tanto, el estudio de las comunidades de zooplancton y la producción secundaria son la base para inferir el flujo global de materia orgánica en los ecosistemas acuáticos y las respuestas específicas de las especies de zooplancton a la variabilidad ambiental (Chícharo y Barbosa, 2011; Lomartire et al. 2021). Debido a su pequeño tamaño y a su corto ciclo de vida, los organismos del zooplancton son especialmente sensibles a los cambios del ecosistema, naturales o antropogénicos, por lo que desempeñan un importante papel como bioindicadores (Li et al. 2000; Chiba et al. 2018). Su desarrollo y dinámica dependen de factores abióticos (por ejemplo, temperatura, salinidad, estratificación, contaminantes) y bióticos (por ejemplo, limitación alimentaria, depredación, competencia). Por lo tanto, pueden ser indicadores de la calidad del agua, de la eutrofización y de la producción del ecosistema.

Además, los organismos del zooplancton pueden tener una gran influencia en el reclutamiento de diversas poblaciones de peces, ya que muchas especies son presas importantes para las fases larvarias de los peces planctónicos. El seguimiento de estos organismos también desempeña un papel importante en la detección temprana de la aparición de especies no autóctonas, tanto en la fase inicial de la vida como en la fase adulta.

Consideraciones para el mantenimiento y gestión de datos

Una de las series temporales incluidas en IGMETS que forma parte del proyecto Atlazul es la del Estuario del Guadiana, en Portugal, en la que se recogen muestras quincenales de fitoplancton, zooplancton y otras variables hidrográficas, y que será la que utilizaremos de ejemplo para profundizar en las consideraciones a tener en cuenta para el mantenimiento de una serie temporal de larga duración y la gestión de los datos resultantes.

Las muestras para el análisis del fitoplancton se recogen en tres estaciones de muestreo a lo largo del gradiente de salinidad del estuario del Guadiana: Alcoutim (estuario superior), Foz de Odeleite (estuario medio) y Vila Real de Santo António (estuario inferior). Los muestreos se realizan quincenalmente, para maximizar la observación de floraciones u otros eventos de corta duración. Las muestras de agua para el análisis del fitoplancton se recogen a medio metro de profundidad aproximadamente, utilizando jarras colectoras. También se miden las variables físico-químicas, es decir, los perfiles verticales de temperatura, salinidad e intensidad luminosa, utilizando sensores portátiles adecuados, y la profundidad del disco de Secchi. A partir del proyecto Atlazul, se han instalado ahora sensores de temperatura y salinidad HOBO U24, que medirán en continuo estas dos variables en cada estación. También se recogen muestras de agua para analizar en laboratorio la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos (nitratos, nitritos, amoníaco, fosfatos y silicatos), la clorofila-a y las partículas en suspensión. Las muestras de agua deben transportarse al laboratorio en condiciones de frío y oscuridad para minimizar la actividad de los organismos. Para este tipo de muestreo y posterior trabajo de laboratorio, se necesitan dos técnicos capacitados.

El análisis del fitoplancton implica la cuantificación (abundancia) y la identificación mediante dos tipos de microscopía (Domingues et al. 2021). La microscopía de inversión se utiliza para la observación de los grupos de fitoplancton más grandes (diatomeas, clorofíceas, dinoflagelados) y la microscopía de epifluorescencia se utiliza para los organismos más pequeños (por ejemplo, criptofíceas, cianobacterias).

Los datos de fitoplancton se analizan para calcular la abundancia por grupos funcionales y por especies/taxones más abundantes. Los datos de concentración de clorofila-a se utilizan como indicador de la biomasa total de fitoplancton, mientras que los datos de concentración de nutrientes y de intensidad luminosa son relevantes para evaluar la posible limitación de nutrientes y/o de luz. El resto de los datos ambientales apoyan la interpretación de los patrones y su variabilidad. La información se disponibiliza finalmente en la base de datos de Series Temporales Ecológicas Marinas, en asociación con las páginas web del Alto Estuario del Guadiana (<https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/pt-30301/>) y del Bajo Estuario del Guadiana (<https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/pt-30201/>).

En cuanto al seguimiento de los organismos del zooplancton, se realizan muestreos mensuales en dos estaciones del estuario del río Guadiana: 1) estuario inferior: Vila Real de Santo António y 2) estuario medio: Foz de Odeleite. Se necesita un mínimo de 2 personas para realizar el muestreo. Lo ideal es que el muestreo se realice a bordo de una pequeña embarcación. En cada estación se realizan 2 redes de arrastre de zooplancton. Para el mesozoplancton, se utiliza una red cónica con malla de 200 μm , área de apertura de 0,13 m^2 , con la que se realiza un arrastre horizontal subsuperficial durante 5 minutos a una velocidad de 2 nudos, con un caudalímetro acoplado para medir el flujo de agua. Para la recogida de microzooplancton, se utiliza una red cónica con malla de 100 μm , área de apertura de 0,05 m^2 , y se realiza un arrastre vertical hasta una profundidad de unos 5 metros. Las muestras se conservan con formaldehído al 4%. También se miden parámetros abióticos (temperatura y salinidad con una sonda multiparamétrica YSI Professional Plus, transparencia del agua con un disco secchi) y bióticos (clorofila-a in vivo con un fluorímetro Turner 10 AU).

En el laboratorio se procesan las muestras para estimar la biomasa y la diversidad. Utilizamos el método del volumen desplazado para estimar el biovolumen, el cual se convierte a peso seco utilizando las ecuaciones adecuadas (Wiebe 1988). En cuanto a la identificación de las especies, se realiza un submuestreo utilizando un divisor Folsom, con el fin de obtener entre 300 y

500 individuos. A continuación, los organismos se visualizan con una lupa (Leica S8 APO), se cuantifican y se identifican con la ayuda de guías de identificación adecuadas.

Después de la cuantificación e identificación de los organismos del zooplancton, la densidad se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Densidad} = (\text{N}^\circ \text{ de individuos} * \text{fraccionamiento}) / \text{Vol. agua filtrada}$$

$$\text{Vol. agua filtrada} = \text{N}^\circ \text{ revoluciones del flujómetro} * \text{Factor de calibración del flujómetro} * \text{Área de apertura de la red}$$

Los valores de densidad de las especies de zooplancton se expresan en nº de individuos/m³. Las series temporales de datos obtenidos se facilitan a algunas plataformas/sitios web de divulgación de series temporales pertenecientes a la NOAA (Marine Ecological Time Series: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/copepod/time-series/pt-30201/>), y también al GOOS BioEco Metadata Portal (<https://bioeco.goosocean.org/>). De este modo, los datos obtenidos están a disposición de toda la comunidad.

2.2.2.2 Buques de oportunidad

Existen iniciativas como el “[Continuous Plankton Recorder](#)” gestionada por la Fundación Sir Alister Hardy para las Ciencias Oceánicas (SAHFOS) que, aprovechando buques en rutas comerciales, lleva tomando muestras de la composición del plancton desde 1931, lo que la convierte en la serie temporal de mayor cobertura espacial (McQuatters-Gollop et al. 2015). Además de la caracterización de la composición de especies de fito- y zooplancton, se han ido incorporando nuevos sensores a este dispositivo, como CTD, fluorómetro, o muestreadores de agua para análisis de la biodiversidad en base a análisis genéticos, como el WaMS (Water and Molecular Sampler)(Edwards, M., Stern, R., y Graham, G. 2019).

Otros programas como el “[Ships Of Opportunity Program](#)” (SOOP) del “Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology” (JCOMM), lleva unos 40 años recogiendo datos oceanográficos desde buques comerciales, principalmente datos de temperatura utilizando sondas de un solo uso (expendable bathythermographs – XBTs) que toman perfiles de

temperatura en los primeros 1.000 m de la columna de agua, aunque cada vez se incorporan un mayor número de sensores y se recolectan periódicamente datos de salinidad, carbono oceánico, fluorescencia y pigmentos, etc. Toda esta información se pone a disposición del público en general a través de la plataforma del [Global Ocean Observing System](#) (GOOS).

Dentro del SOOP hay un subprograma de bioacústica (BASOOP), promovido desde el Integrated Marine Observing System (IMOS) que está recogiendo datos acústicos de buques comerciales (predominantemente pesqueros) y poniéndolos a disposición del público en general ([Acceso al AODN](#)). Los datos acústicos proporcionan información georreferenciada de forma continua tanto en la horizontal como en la vertical de la columna de agua, y permite muestrear hábitats pelágicos con escalas espaciales amplias en un lapso de tiempo relativamente pequeño. Cada vez hay más embarcaciones pesqueras equipadas con ecosondas avanzadas, que se pueden utilizar para recopilar datos acústicos de manera rentable y oportunista con fines científicos. Esto ha impulsado iniciativas para la recopilación de datos acústicos y para estandarizar el postprocesamiento de datos, proporcionando una gran cantidad de información potencialmente valiosa para estudios ecológicos y de modelización. Estos datos pueden ayudar a mapear el fondo marino a una alta resolución, caracterizar hábitats, evaluar poblaciones de animales pelágicos e incluso stocks pesqueros (Haris K. y Kloser R. 2018). Aunque el potencial de estos datos acústicos, es ampliamente reconocido, su utilización en la evaluación de stocks genera cierto escepticismo, principalmente porque los datos acústicos precisan normalmente de ser validados por algún otro tipo de muestreo complementario, como pescas directas o toma de imágenes, que confirme la clasificación de los espectros sonoros registrados (Haris et al. 2021; Melvin, Kloser, y Honkalehto 2016). Sin embargo, el hecho de que cada vez se implementen de modo más rutinario los sistemas electrónicos de seguimiento en los buques pesqueros y se avance hacia una identificación automática y reporte en tiempo real del total de capturas georreferenciadas (van Helmond et al., 2020; Figura 23) , hace que el potencial de los buques pesqueros para actuar como fuentes de monitorización de los ecosistemas se incremente

exponencialmente, permitiendo validar con los datos de las capturas, las mediciones que se hagan mediante otros sensores.



Figura 23. Programas de monitoreo electrónico en fase piloto y completamente implementados en el mundo entre 1999 y 2018. Extraído de (van Helmond et al. 2020).

Así mismo existen diversos programas para aprovechar el lance de las artes de pesca, que atraviesan toda la columna de agua, para la recogida de datos oceanográficos mediante el acople de diferentes sensores a diferentes aparejos (nasas, redes de arrastre, etc.). Algunos ejemplos son la iniciativa italiana de la Fishery and Oceanography Observing System (FOOS) que trabaja con varios tipos de arrastreros y cerqueros para recoger datos oceanográficos y climatológicos junto con información de georreferenciada de las capturas, o el programa Recopesca del IFREMER que equipa redes de arrastre, palangres, nasas y redes de enmalle con CTDs, sensores de oxígeno y de fluorescencia (Van Vranken et al. 2020).

Esta avalancha de información diversa, unida al aumento de la capacidad de procesamiento, contribuirá a que la información recopilada por los buques de pesca, no sólo sea imprescindible para la evaluación y manejo de los stocks pesqueros y para la fiscalización de las regulaciones que se establezcan, sino también para el avance del conocimiento científico sobre el funcionamiento de los ecosistemas (Bradley et al. 2019).

2.2.2.3 Plataformas oceanográficas fijas

Las estaciones oceanográficas fijas, presentan una gran versatilidad en cuanto a la capacidad de sensores que pueden albergar y llevan siendo utilizadas con fines meteorológicos y oceanográficos durante décadas.

Este tipo de plataformas pueden albergar instrumentación pesada, lo que amplía el rango sensores que pueden utilizarse. Aunque en la mayoría de casos, los sensores se instalan a una profundidad fija, los perfiladores verticales se están volviendo cada vez más comunes. Algunos ejemplos comerciales de este tipo de perfiladores son los desarrollados por [McLane](#), o el SeaCycler desarrollado por SCRIPPS (Send et al. 2013), que funcionan como un pequeño ascensor a lo largo de la línea de anclaje de la plataforma, moviendo un conjunto de sensores a través de la columna de agua. Así mismo, los perfiladores acústicos son capaces de realizar mediciones también a lo largo de la columna de agua.

Las estaciones oceanográficas fijas, presentan una gran versatilidad en cuanto a la capacidad de sensores que pueden albergar y llevan siendo utilizadas con fines meteorológicos y oceanográficos durante décadas.

En el momento de seleccionar sensores adecuados a los parámetros que se necesitan medir, además de la precisión, resolución frecuencia, etc con la que el aparato es capaz de recoger los datos, será necesario conocer la capacidad de integración de ese equipo en la instalación o punto en el que se pretende utilizar.

El tamaño del equipo puede ser un limitante importante si se pretende instalar en el interior de una boya de tamaño reducido, o si debe estar sumergido y es necesario adaptar o fabricar algún soporte para el equipo.

El consumo energético, el voltaje nominal y el pico de voltaje máximo que necesita el aparato pueden requerir la instalación de equipamiento adicional o que la lectura de datos se deba realizar en ciclos alternados para ahorrar energía y asegurar el funcionamiento de la estación.

La conectividad del equipamiento también es fundamental si se requiere la recogida de datos y envío a un servidor remoto. En este caso el sensor debe

poder conectarse a algún *datalogger* que se encargue de gestionar la recogida de datos y envío a algún servidor remoto. En este caso el datalogger y el sensor tendrán que estar conectados mediante algún tipo de tecnología cableada como el rs232, rs485, rs422, SDI, I2C, etc o bien mediante algún tipo de comunicación inalámbrica como bluetooth, wifi, zigbee, etc, Otra posibilidad es que el propio sensor tenga integrado algún tipo de tecnología que permita el envío remoto de datos, pero esto es poco común. En estos dos últimos casos de comunicación inalámbrica, los sensores funcionan con baterías internas lo que en caso de fondeos prolongados puede ser un problema.

Aunque no existe un registro exhaustivo de todas las estaciones fijas que existen, el “[Data Buoy Cooperation Panel](#)” (DBCP) de la “Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM)” se encarga de la coordinación y gestión conjunta de los datos de más de 400 estaciones fijas, responsabilidad de 12 países diferentes, permitiendo el acceso en tiempo real a los datos que estas proporcionan.

Consideraciones para el mantenimiento y gestión de datos

Para realizar un mantenimiento adecuado de equipos e instalaciones es necesario establecer protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo tanto para los sensores y equipos instalados como para las estructuras donde se alojan.

En cuanto al **mantenimiento preventivo de los sensores**, será necesario establecer en el caso de los sensores la frecuencia a la que deben ser limpiados del *biofouling* existente que pueda interferir en las medidas, la frecuencia con la que deban ser calibrados, cambiado algún componente o enviados a fábrica a revisión si así se considera, para todo esto es aconsejable consultar con los fabricantes y seguir sus recomendaciones para alargar la vida de los sensores. También es importante tener algún sistema de control de la calidad de los datos recogidos, que alerte de un posible fallo en los sensores que pueda requerir una actuación preventiva o en último caso correctiva.

En el **mantenimiento preventivo de las estructuras flotantes**, hay que tener en cuenta el tipo de fondo marino y el desgaste que sufre el tipo de fondeo utilizado para poder prevenir una rotura del fondeo a tiempo. En

algunos casos puede ser necesaria una revisión con un buzo o ROV del sistema fondeo 1 o 2 veces al año y el cambio del sistema (cadena, elastómero, cabo, grilletes etc), se realizará cuando se estime oportuno. También es importante revisar periódicamente el estado general de la plataforma, boya, cajas, paneles solares, baterías, cableado, etc. para evitar daños mayores que puedan necesitar la retirada de la plataforma a tierra para solucionar la incidencia.

Para el **mantenimiento correctivo de los sensores**, es conveniente disponer de un repuesto del mismo para poder intercambiarlo y enviar el sensor averiado a revisión en fábrica.

En el **mantenimiento correctivo de las estructuras**, en algunos casos se podrá solucionar *in situ* pero en otros requerirá el desfondeo o retirada de parte de la estructura para realizar los arreglos pertinentes. Esto suele ocasionar periodos de tiempo largos sin datos de la estación.

En cuanto a la metodología de post-procesado de datos, tomamos como ejemplo el protocolo del Observatorio Costero de Galicia, que se incluye en el Observatorio Transfronterizo Raia, y que está formado por 6 estaciones oceanográficas, de ellas 4 son boyas, una es una estación fija en el puente de Rande y por último una plataforma flotante en el perímetro de la isla de Cortegada.

En el Observatorio Costero Raia la metodología de limpieza de las series sigue los tratados de buenas prácticas (<https://www.oceanbestpractices.net/handle/11329/387>) sobre el tratamiento de datos marinos dispuesto en OceanSITES (<http://www.oceansites.org/>). Se utiliza un protocolo de validación automático de datos oceanográficos siguiendo las guías proporcionadas por Coriolis, ESEOO y Mersea. Los datos pasan por 4 niveles de control que asignan al finalizar un código de validación al dato. A continuación se exponen el flujograma (Figura 24) y la tabla de códigos de validación (Tabla) que se asignan:

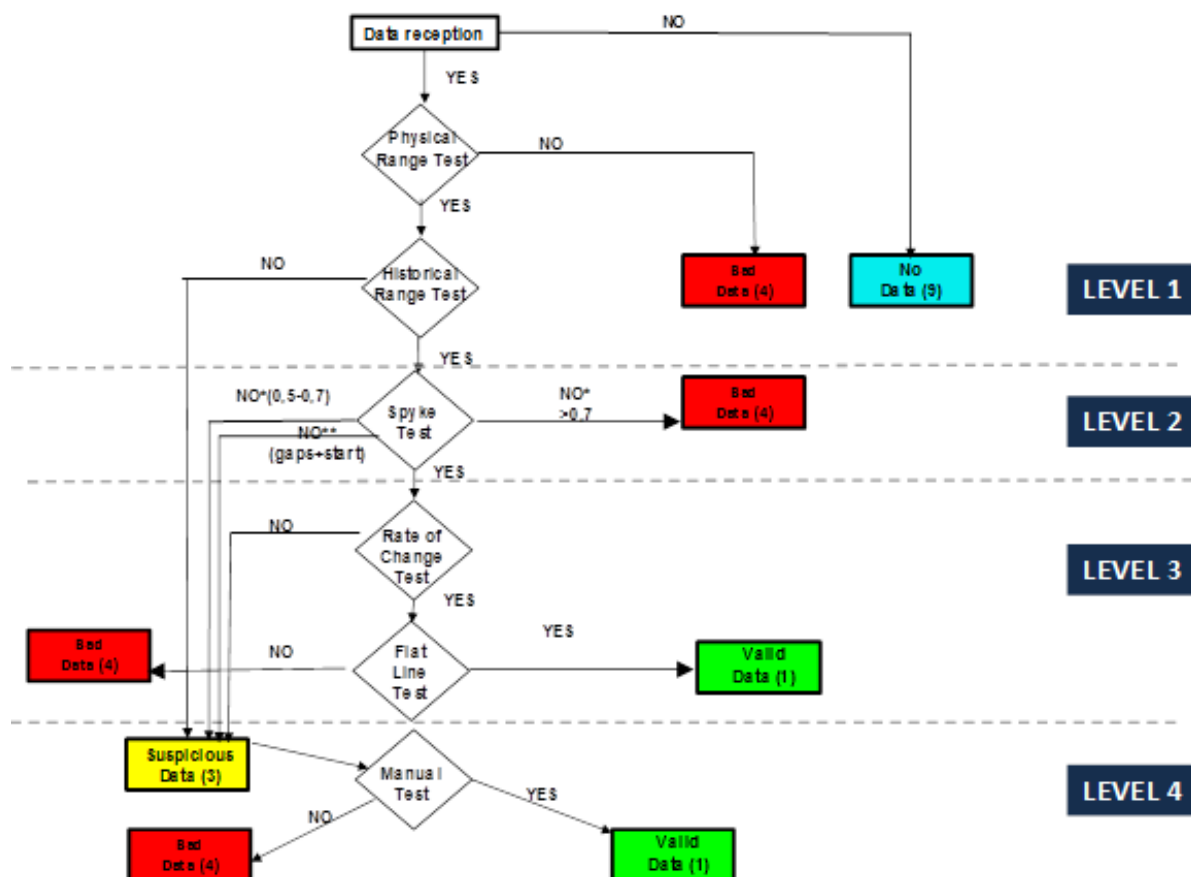


Figura 24. Flujograma del protocolo de validación automático de datos oceanográficos siguiendo las guías proporcionadas por Coriolis, ESEOO y Mersea.

Código de validación	Descripción
1	Dato correcto
3	Dato sospechoso
4	Dato erróneo
9	Dato sin registrar

Tabla 8. Códigos de validación oceanográficos siguiendo el manual QARTOD (Quality Assurance/Quality Control of Real-Time Oceanographic Data) del IOOS (Integrated Ocean Observing System).

Este sistema de validación de datos es la evolución de otro anterior que se había estado usando durante años, durante el proyecto MarRisk se pudo realizar un estudio manual de los datos históricos que permitió realizar ligeras mejoras en los límites flexibles que se estaban utilizando en ciertas variables.

Es importante, si es posible, disponer de un conjunto de efemérides oceanográficas si se desea aplicar un control automático afinado de los datos, en caso contrario, habrá que realizar algún tipo de control manual con una frecuencia adecuada a la cantidad y características de los datos recogidos.

El uso de vocabularios comunes en los metadatos y en los formatos de datos es un requisito previo importante para la coherencia y la interoperabilidad de los mismos. Se utiliza vocabulario seleccionado de SeaDataNet y el British Oceanographic Data Centre (BODC) en concreto de las librerías “P01: BODC Parameter Usage Vocabulary”, “P02: SeaDataNet Parameter Discovery Vocabulary” y “P06: BODC-approved data storage units”.

Para la difusión de los datos se utilizan protocolos estándar alineados con la Directiva Europea INSPIRE, texto plano para los datos y netcdf para los modelos.

2.2.2.4 Plataformas de deriva o drifters

Además de este tipo de boyas estacionarias de gran tamaño que consituyen las redes fijas de observación, existen también pequeñas boyas “inteligentes” de bajo coste, que funcionan con energía solar y que permiten transmitir datos en tiempo real. Un ejemplo de este tipo de boyas son las desarrolladas por [SOFAR](#), que están siendo utilizadas en diversas iniciativas de monitorización ambiental, como por ejemplo la iniciativa de ciencia ciudadana promovida por [AquaLink](#), que consiste en crear una red a nivel mundial de mediciones de temperatura en tiempo real y utilizarlas para calibrar las estimaciones obtenidas a partir de datos de satélite, para lo cual facilitan gratuitamente este equipamiento.

Este tipo de boyas de pequeño tamaño equipadas con ecosondas, también son utilizadas para la localización y seguimiento de objetos flotantes a la deriva (FADs), muy utilizados en la pesca de túnidos, y que permiten además caracterizar la composición de especies de dicha agregación. Destacamos dos

empresas desarrolladoras de este tipo de boyas que se encuentran en Galicia, y que son [Marine Instruments](#) y [Satlink](#). Debido a que el uso de FADs está ampliamente extendido (unos 10.000 FADs se colocan anualmente), se han propuesto diversas alternativas, para aprovechar estas agregaciones a modo de buques de oportunidad, y acceder a la información que las boyas reciben, así como incorporar nuevos sensores como receptores de telemetría acústica, hidrófonos, cámaras, etc., que permitan mejorar el conocimiento sobre la ecología de los atunes y otros animales pelágicos, así como para obtener índices de distribución y abundancia independientes de la pesca (Brehmer et al. 2019; Moreno et al. 2016).

Existen también iniciativas con boyas de deriva de bajo coste, como la de [Ocean of Things](#) (OoT) que pretende desplegar miles de boyas inteligentes, equipadas con una serie de sensores (temperatura, irradiación solar, velocidad de la corriente y un hidrófono), que permitan amplificar la recogida de datos en tiempo real, que estarán disponibles para libre descarga desde su página web. El programa ha desarrollado tres modelos de boyas de materiales bio-inhertes y lo más biodegradables posible para albergar sensores pasivos (Figura 25) con una vida útil de aproximadamente un año, tras lo cual se hundirán directamente al fondo.



Figura 25. Diferentes prototipos de boyas inteligentes desarrollados dentro del proyecto [Ocean of Things](#)

De todos modos, el programa más destacad en cuanto a boyas de deriva, es el [Programa Argo](#), a través del cual se han desplegado unas 4000 boyas durante los últimos 20 años como parte de un esfuerzo internacional al que España contribuye actualmente con 21 boyas. Estas boyas, que se mantienen

en funcionamiento unos tres años, perfilan la columna de agua hasta los 2000 m cada diez días, adquiriendo datos sobre temperatura, salinidad, temperatura y velocidad de la corriente. Algunas de estas boyas incluyen también sensores químicos (pH, pCO₂, oxígeno y nitrato) y ópticos (Clorofila, fluorescencia y turbidez). Al cabo de esos diez días suben a la superficie y transmiten los datos obtenidos, que se disponibilizan inmediatamente y de forma gratuita.

2.2.2.5 Drones aéreos o Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs)

El drástico descenso del coste que está experimentando esta tecnología, junto con el aumento del tiempo de vuelo, el incremento del tipo de sensores adaptables y la simplificación de las operaciones de lanzamiento y recuperación en el mar, están ampliando rápidamente la utilización de UAVs con diferentes aplicaciones para la monitorización.

A medida que se incrementa el número de sensores acoplados a estas plataformas aéreas, se multiplica el número de aplicaciones, pudiendo incorporar receptores de telemetría acústica, cámaras térmicas, infrarrojas, LiDAR, SAR, etc. (Harris et al. 2019), que permiten desde la detección de blooms de fitoplancton (Cheng, Chan, y Lee 2020) a la monitorización del hielo marino, el seguimiento y caracterización de hábitats sensibles (Castellanos-Galindo et al. 2019), como por ejemplo corales (Levy et al. 2018), praderas submarinas o “nurseries” para diferentes especies de peces (Ventura et al. 2017), así como para la monitorización de poblaciones de diferentes organismos marinos, desde pepinos de mar (Kilfoil et al. 2020), mejillones (Gomes et al. 2018), medusas (Rowley et al. 2020), rayas, tiburones (Kiszka et al. 2016) o mamíferos marinos (Aniceto et al. 2018). Esta tecnología avanza rápidamente, llegándose incluso a desarrollar adaptaciones específicas para la toma de muestras de agua con diferentes objetivos como el análisis de e-DNA (Doi et al. 2017), o incluso el [SnotBot](#) que permite la recogida de muestras biológicas de mamíferos marinos desde el aire, al atravesar el drone el soplo de una ballena, permitiendo recoger muestras en placas Petri para la evaluación de la salud y ecología de estos animales (ADN, hormonas del estrés y el embarazo, microbiomas, etc) minimizando las perturbaciones (Centelleghé et al. 2020). Además del uso

potencial para monitorear organismos marinos con drones usando sensores o incluso recogiendo muestras, los UAVs también pueden usarse para fondear diferentes tipos de sistemas de monitoreo autónomos en ubicaciones predeterminadas y de difícil acceso. Por ejemplo, se están desarrollando sistemas para desplegar mediante drones redes de hidrófonos con radio incorporada (ej. [Sonobuoys de Ultra Electronics](#)) que permitirían monitorear acústicamente en busca de cetáceos diferentes zonas y así planificar mejor las campañas de prospección sísmica, previniendo el desplazamiento del buque a zonas con alta densidad de cetáceos (U. K. Verfuss et al. 2016).

2.2.2.6 Drones superficiales o Vehículos superficiales no tripulados (Unmanned Surface Vehicles – USVs)

Los drones superficiales operan en la interfaz entre el océano y la atmósfera, permitiendo tomar medidas de ambos medios y estudiar los intercambios atmósfera-océano, además de otras dinámicas oceanográficas y relativas a la dinámica poblacional de diferentes especies. Al estar en la superficie, permiten una transmisión de datos más rápida y eficaz que los drones submarinos, además de tener acceso a una fuente constante de energía solar, lo que permite que se esté avanzando rápidamente a modelos con un auto-abastecimiento de energía total. Por ejemplo, el [Wave Glider](#) de Liquid Robotics usa una combinación de paneles solares para abastecer de energía a sus sensores y energía undimotriz para propulsarse en el agua, lo que le permite en condiciones ideales una autonomía de hasta un año recogiendo y transmitiendo activamente datos en tiempo real (vía satélite, móvil o banda ancha). Otro modelo que utiliza la energía undimotriz para desplazarse es el [AutoNaut](#) de AutoNaut Ltd., con el que se han realizado seguimientos con hidrófonos y receptores de telemetría acústica de distintas especies de peces en torno a Áreas Marinas Protegidas (AMPs).

Este tipo de plataformas se están utilizando ya para la evaluación de stocks pesqueros (Greene et al. 2014), por ejemplo, el USV de [Saildrone](#) ha demostrado sus capacidades en la evaluación del stock de Abadejo de Alaska (*Gadus chalcogramus*) en el mar de Bering, la pesquería más grande de los EEUU (De Robertis et al. 2021). Tres vehículos Saildrone, equipados con

ecosondas para la detección y cuantificación de *G. chalcogramus*, así como con otra serie de sensores (intensidad y dirección del viento, radiación solar, salinidad y temperatura superficial del océano), fueron desplegados en mayo de 2020 en San Francisco, para compensar la falta del muestreo habitual en el mar de Bering, debido a la pandemia del COVID-19. Tras completar un viaje de 6000 millas náuticas, en unos cuatro meses, está es la primera vez que se utilizan únicamente datos recogidos por un vehículo autónomo en una evaluación oficial de un stock pesquero (De Robertis et al. 2021). Recientemente, el Saildrone ha batido un nuevo record de distancia al completar un viaje de 15000 millas náuticas en 274 días entre Cabo Verde y Trieste, atravesando del océano Atlántico al Mediterráneo recogiendo datos sobre la concentración de carbono y otras variables oceanográficas. Este vehículo se desplaza a vela, y alimenta los sensores que transporta gracias a varias placas solares acopladas al mismo.

Otro drone superficiales, que utilizan también la propulsión por viento es el [Sailbuoy](#) the Offshore Sensing AS que está diseñado para despliegues de varios meses en el mar, y preparado para las condiciones adversas del antártico. De hecho, este tipo de USV, equipado con ecosondas y otros sensores oceanográficos está siendo utilizado por la compañía [Aker BioMarine](#) para localizar bancos de krill y optimizar así sus operaciones de pesca.

También con un sistema de propulsión a vela pero con un casco tipo catamarán que le proporciona una mayor estabilidad, cabe destacar el [Datamaran](#) de Autonomous Marine Systems Inc., que además de permitir largos despliegues para la recogida de datos, está pensado como una plataforma nodriza para el transporte, despliegue y recarga de otros vehículos autónomos aéreos o submarinos. Este vehículo se encuentra todavía en fase de demostración en el entorno de la costa Este de EEUU.

Además de los USVs autopropulsados, existen también modelos que utilizan combustible, como por ejemplo el USV de [Kongsberg](#), que permite una autonomía de hasta 20 días y está equipado con sónares y ecosondas que permiten la detección y clasificación de diferentes especies de peces. En particular este sistema ha sido adquirido hace poco por la compañía pesquera

[Tasa](#), con base en Perú, para optimizar las operaciones de pesca de sus 48 buques, que se dedican principalmente a la captura de anchoa.

Navantia, está también empezando a comercializar su modelo de USV “[Vendabal](#)”, que incorpora diferentes sensores y accesorios para responder a labores de rescate y control medioambiental, como por ejemplo un fluorímetro una estación meteorológica, un gancho de remolque, un lanzador de bengalas, o una balsa salvavidas.

Además de este tipo de USVs de gran tamaño y preparados para misiones de larga duración, existen también soluciones en el mercado del tipo del [Sonobot](#) de EvoLogics o el [SB100PRO](#) de GPASeabots que pesan unos 30 kgs y se alimenta con baterías eléctricas que le proporcionan una autonomía de hasta 10 horas pudiendo incorporar diferentes opciones de sonar, cámaras de alta definición y sistemas de comunicación y posicionamiento de alta precisión, para estudios a pequeña escala. Algunas compañías como [Seafloor](#) ofrecen toda una variedad de tamaños y capacidades de USVs, con vehículos que van desde los 15 a los 300 kgs. Otros ejemplos de diferentes desarrollos en USVs han sido revisados recientemente (U. K. Verfuss et al. 2016; Ursula K. Verfuss et al. 2019) y se resumen en la Tabla 9.

Unmanned vehicle type		System name	Manufacturer, designer, originating university	Technology readiness level
Autonomous Surface Vehicles	Powered	ASV-6300	ASV, UK	Prototype system
		C-Cat 2, C-Worker 4, C-Worker 7, C-Worker Hydro		First of a kind commercial system
		C-Enduro, C-Stat, C-Target 3, C-Worker 6		Full commercial application
		Delfim	Institute for Systems and Robotics, Portugal	Applied Research
		Mariner	NTNU and Maritime Robotics, Norway	Full commercial application
	Unpowered	Measuring Dolphin (MESSIN)	University of Rostock, Germany	First of a kind commercial system
		ROAZ I, ROAZ II	Laboratório de Sistemas Autónomos, Portugal	Prototype system
		RTSYS USV	RTSYS, France	Demonstration system
		AutoNaut 2, AutoNaut 3, AutoNaut 5, AutoNaut 7	MOST (Autonomous Vessels) Ltd., UK	Demonstration system
		Saildrone	Saildrone Inc., USA	First of a kind commercial system
		Submaran	OCEANAERO, USA	n. p.
		Waveglider SV2, Waveglider SV3	Liquid Robotics, USA	Full commercial application

Tabla 9 Resumen de los principales modelos de ASV desarrollados hasta el momento. Extraída de (Ursula K. Verfuss et al. 2019)

2.2.2.7 Vehículos submarinos operados remotamente (Remotely Operated Vehicles- ROVs)

Los vehículos operados a distancia (ROV) son dispositivos robóticos que se utilizan para la exploración, inspección y ejecución de tareas específicas bajo el agua, pero que siempre se mantienen unidos al buque nodriza por un cable que le proporciona suministro energético y por el que transmite información en tiempo real. Un ROV estándar (Figura 26) consta de un marco robusto, una unidad de flotación para proporcionar flotabilidad, una serie de propulsores para permitir la maniobrabilidad en tres dimensiones y el cable que conecta el sistema al barco (Huvenne et al. 2018).

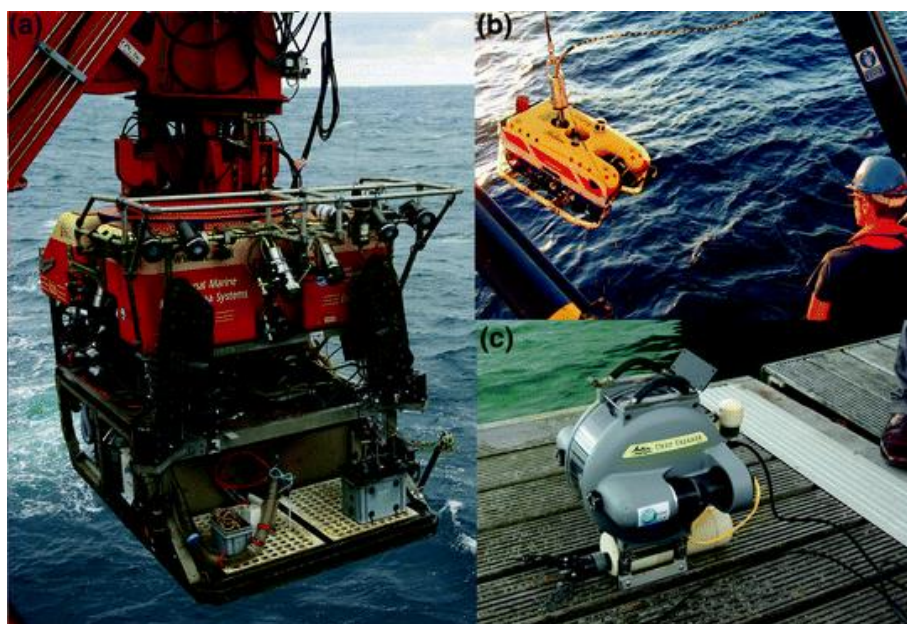


Figura 26. A) ROV tipo clase de trabajo, Isis del National Oceanography Centre of the UK (NOC), B) ROV tipo inspección, modelo Falcon de la Plymouth University c) ROV tipo mini-ROV, Deep Trekker del NOC Extraído de (Huvenne et al. 2018)

Los ROVs comenzaron a desarrollarse en la década de los 60's para uso militar, y a partir de los 70-80s se introdujo en el ámbito industrial para realizar tareas a profundidades superiores a las que podían acceder buceadores con escafandra autónoma. Hoy en día son utilizados principalmente por el sector del petróleo y gas (60% del total de ROVs a nivel mundial), pero también se utilizan para investigación científica y operaciones de salvamento y se está intentando implicar a las diferentes industrias para que permitan utilizar sus

ROVs como buques de oportunidad, con los que recabar también información científica (McLean et al. 2020).

La variedad de sensores, instrumentos y herramientas con que se puede equipar un ROV varía en función de su tamaño y la profundidad que puede alcanzar. En la configuración más básica, un ROV llevará una o más cámaras de video, cuyos datos se transfieren al operador de a bordo en tiempo real. Además, puede haber uno o dos brazos manipuladores con varios niveles de funcionalidad y una "cesta" o dispositivo de almacenamiento para almacenar muestras o herramientas. En configuraciones más avanzadas, se pueden integrar otros sensores o equipos en el sistema, que van desde pequeños CTD, sensores ópticos o sensores químicos hasta cámaras HD, sonares de barrido sectorial, ecosondas multihaz o muestreadores de succión (Huvenne et al. 2018). El hecho de estar siempre equipados con cámaras de video, ha hecho que este sistema se emplee habitualmente para la observación *in situ* de especies, su distribución, comportamiento y asociaciones con el hábitat, especialmente en zonas profundas de muy difícil acceso (Sward, Monk, y Barrett 2019).

En cuanto a la clasificación por tamaño, se acostumbra a hablar de 3 categorías de ROV:

- (1) Los ROV de clase de trabajo son vehículos grandes y potentes (hasta 2 m de alto por 4 m de longitud), que pueden usarse para operaciones complejas y en la mayoría de los casos, están equipados con dos brazos manipuladores con múltiples funciones.
- (2) Los ROV de clase de inspección u observación son más pequeños ($\approx$ 1 m), a menudo tienen un solo brazo manipulador y se utilizan principalmente para estudios de video. Aunque son más compactos que los vehículos de la clase de trabajo, todavía tienen la potencia suficiente para trabajar en condiciones marinas completas.
- (3) Los mini- y micro-ROV que son aún más pequeños. A menudo, pueden plegarse en una sola maleta y ser manipulados por una sola persona. Están contruidos específicamente para trabajos de inspección, generalmente en aguas relativamente tranquilas y poco

profundas (<200 m), y su uso se está generalizando cada vez más, por su bajo costo.

2.2.2.8 Vehículos submarinos autónomos propulsados (Autonomous Underwater Vehicles - AUVs)

Los vehículos submarinos autónomos (AUV) son vehículos autopropulsados no tripulados que normalmente se despliegan desde una embarcación de superficie y pueden operar independientemente de esa embarcación durante períodos de unas pocas horas a varios días, aunque los rápidos desarrollos tecnológicos ahora permiten realizar operaciones de largo alcance, con duraciones que se extienden a varios meses y miles de kilómetros, como por ejemplo el modelo [Autosub Long Range](#) del NOC o el [Tethys](#) de MBARI, que tiene una independencia de más de 1000 kms (Huvenne et al. 2018).

Las profundidades operativas varían desde unos pocos cientos de metros para los vehículos más pequeños hasta más de 6000 metros para los modelos más grandes. En el WHOI están desarrollando un modelo capaz de superar dicha profundidad, el [Orpheus](#), que puede llegar a los 11.000 m.

A diferencia de los *gliders*, que se propulsan con un motor de flotabilidad y describen una trayectoria ondulada, los AUV pueden mantener una trayectoria recta a través del agua y, por lo tanto, son adecuados para aplicaciones de geociencias que requieren una altitud constante, como el mapeo del fondo marino y la elaboración de perfiles batimétricos (Wynn et al. 2014).

Dependiendo de su tamaño y de la profundidad máxima a la que operen, pueden equiparse con una variedad de sensores (CTD, ADCP, sensores químicos, cámaras fotográficas, sonares, magnetómetros, gravímetros, etc.) e incluso se ha conseguido la toma de muestras de agua.

Los AUV más comunes, tienen forma de torpedo, son impulsados por una sola hélice y están optimizados para cubrir grandes distancias. Algunos de los ejemplos con finalidad científica más reconocidos incluyen la serie [Autosub](#) de NOC (Figura 21), la serie [REMUS](#) de WHOI y la serie Dorado de [MBARI](#), con

modelos de diferentes tamaños y funcionalidades para abarcar desde la exploración costera a profundidades en torno a los 6000 m. diseñados para la inspección costera, así como los modelos [REMUS Sharkcam](#) y [REMUS Turtlecam](#), que están preparados para localizar y seguir a individuos marcados con etiquetas telemétricas. Entre los diseños comerciales, destacan los modelos de la serie [Hugin](#)s de Kongsberg, aunque recientemente (Ursula K. Verfuss et al. 2019) hace una revisión de los principales modelos, cuyo resumen puede consultarse en la Tabla 10.

Este tipo de AUVs, al tener una única hélice se mueven únicamente hacia delante. Existe también otro tipo de AUVs, que tienen varias hélices, lo que les permiten moverse en cualquier dirección y les proporcionan una alta maniobrabilidad, parecido a un ROV. Están diseñados para operaciones de precisión, estudios en cámara lenta (por ejemplo, fotografía de los fondos marinos) y funcionan en terrenos claramente tridimensionales, como arrecifes de coral (Huvenne et al. 2018). Un ejemplo es el [Sentry](#) de WHOI (Figura 27).

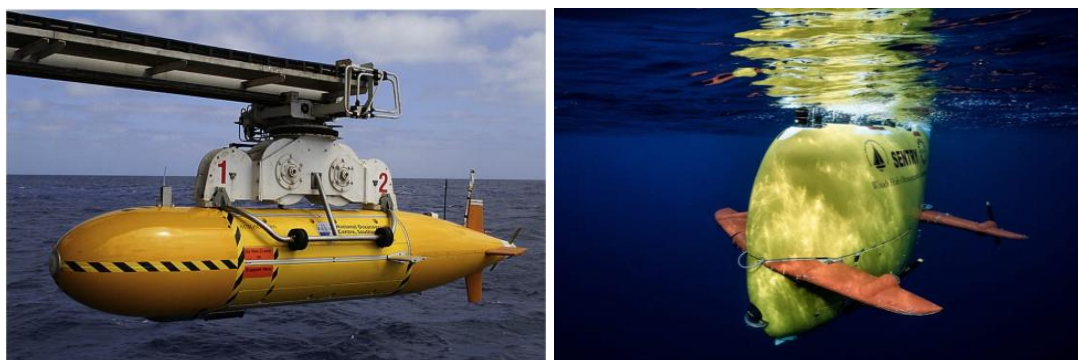


Figura 27. A) Autosub6000 del NOC Foto de (Huvenne et al. 2018) B) [Sentry](#) del Woods Hole Oceanographic Institute (WHOI). Imagen de la página web del WHOI.

Unmanned vehicle type		System name	Manufacturer, designer, originating university	Technology readiness level
Autonomous Underwater Vehicles	Glider	ALBAC Coastal glider	Tokai University, Japan Exocetus, Alaska Native Technologies, USA	Small scale prototype Full commercial application
		Deepglider eFòlaga III	University of Washington, USA Graal-Tech, IMEDEA Institute, Italy	Demonstration system First of a kind commercial system
		Liberdade Xwing/Zray	SCRIPPS, USA	Prototype system
		Petrel	Tianjin University, China	n. p.
		SeaBird	Kyushu Institute of Technology, Japan	Prototype system
		SeaExplorer	ACSA, France	Full commercial application
		Seaglider (ogive)	Kongsberg, University of Washington, USA	Full commercial application
		Slocum G2 hybrid, Slocum G2 glider	Teledyne Webb, Webb/WHOI, USA	Full commercial application
		Slocum G2 thermal		Demonstration system
		Spray	SCRIPPS, USA	Full commercial application
		Sterne glider	Ecole Nationale Supérieure D'Ingenieurs Brest, France	n. p.
		TONAI; Twilight Ocean-Zonal Natural Resources and Animal Investigator	Osaka Prefecture University, Japan Taiji Whale Museum, Japan Cetus, Japan	Basic research
	Powered	A18-D, A9-M	ECA Group, France	Full commercial application
		Bluefin-12D, Bluefin-12S, Bluefin-21, Bluefin-9, Bluefin-9M	Bluefin Robotics, USA	Full commercial application
		HUGIN 1000 (1000 m version), HUGIN 1000 (3000 m version), HUGIN 3000, HUGIN 4500	Kongsberg Maritime, Norway	Full commercial application
		MUNIN		n. p.
		REMUS 100, REMUS 3000, REMUS 600, REMUS 6000	Hydroid (Kongsberg Maritime, Norway) + OSL (WHOI, USA)	Full commercial application
		RTSYS AUV	RTSYS, France	Demonstration system

Tabla 10 Resumen de los principales modelos de vehículos autónomos submarinos desarrollados hasta el momento, incluyendo los propulsados (AUVs) y los gliders de los que hablaremos en la siguiente sección. Extraída de (Ursula K. Verfuss et al. 2019)

2.2.2.9 Gliders

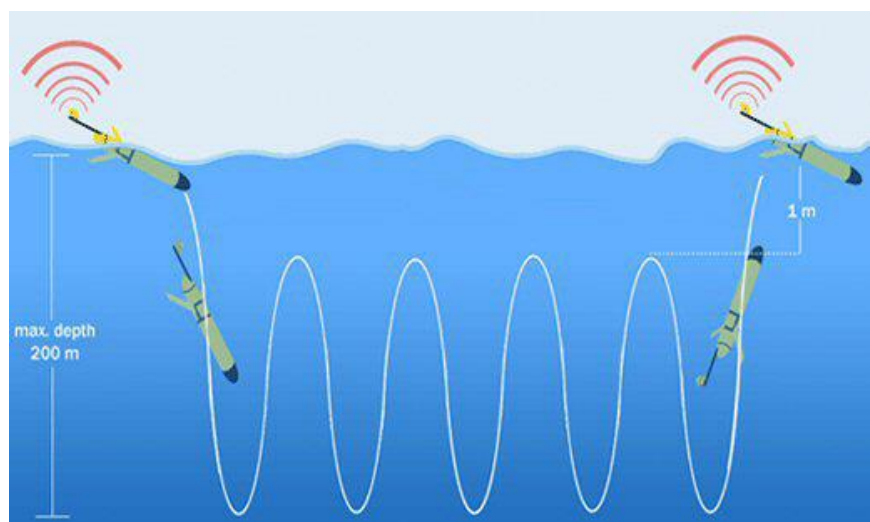
Los gliders o planeadores son vehículos no propulsados, que utilizan una bomba interna o motor de flotación para cambiar su flotabilidad, permitiéndoles moverse hacia arriba y abajo, transformando ese movimiento vertical, en un movimiento horizontal ondulatorio, (Figura 28). Para moverse hacia arriba y hacia abajo, bombean aceite desde un depósito interno a una vejiga flexible externa, para que pueda aumentar su volumen. Al bombear aceite dentro y fuera de la vejiga, el glider puede alterar su posición en la vertical de acuerdo a las profundidades pre-programadas con lo que consiguen moverse hacia adelante describiendo hondas en la columna de agua.

Los gliders transmiten datos de sus sensores y su posición por satélite cada vez que suben a la superficie, permitiendo hacer un seguimiento de la misión y hacer alteraciones en su trayectoria.

Los gliders no alcanzan grandes velocidades, pero son capaces de mantener una velocidad constante durante meses, permitiéndoles realizar misiones de larga distancia. En los últimos años se están desarrollando diseños más hidrodinámicos, como los “Blended-Wing-Body Underwater Gliders” (BWBUG) (Figura 28), como por ejemplo el Liberdade XRay o el Liberdade ZRay (Sun et al. 2017).

Otros avances en los que se está trabajando es en incrementar la profundidad de trabajo de los gliders. Normalmente los gliders realizan misiones hasta los 1000 m de profundidad, mientras que nuevos modelos como el Deepglider de la Universidad de Whasignton, puede alcanzar los 6000 m.

A



B



C



Figura 28. Esquema ilustrativo del funcionamiento de un glider. Extraído de la web de [NOC](#) B) Glider tipo torpedo Slocum Seaglider C) Glider tipo Blended-Wing-Body Underwater Gliders Liberdade XRay. Extraído de (Sun et al. 2017)

Los gliders se han estado utilizando durante más de 20 años, siendo diseñados y contruidos principalmente por instituciones de investigación, aunque hoy en día existe un importante mercado comercial. Entre los modelos más populares destacan el Slocum de Teledyne Webb Research Corporation y los Seagliders de Kongsberg, aunque en la Tabla 10 se detallan otra serie de vehículos revisados recientemente por (Ursula K. Verfuss et al. 2019)

Aunque originalmente se diseñaron para medir ciertas características físicas del océano, pueden equiparse con gran variedad de sensores, si bien el número y tipo de sensores que incluya condicionará la duración de su batería y por tanto la duración de las misiones.

Se han probado diferentes configuraciones de sensores, que demuestran su utilidad en la monitorización de poblaciones de peces, integrando tecnologías acústicas complementarias como un receptor de telemetría acústica, un hidrófono o receptor pasivo y una ecosonda de pesca (Lembke et al. 2018). Los resultados preliminares en estudios de evaluación de stocks pesqueros con gliders, o de identificación de hábitats relevantes y zonas de puesta, indican que pueden ser un sustituto potencial en un breve periodo de tiempo a las campañas tradicionales de evaluación en buques, especialmente para algunas especies (Reiss et al. 2021; Zemeckis et al. 2019).

La elevada implantación en el uso de gliders y el alto potencial de los datos con ellos obtenidos, ha motivado la creación del programa OceanGliders como una parte fundamental del Global Ocean Observing System (Testor et al. 2019). El objetivo de este programa es monitorizar la actividad glider a nivel mundial y apoyar la diseminación de los datos obtenidos en bases de datos globales que permitan el acceso a la información bien en tiempo real o con cierto desfase a través de su página web (<https://www.oceangliders.org/>).

3. Conclusiones y recomendaciones finales

La observación de los océanos es una tarea compleja y costosa que requiere una inversión significativa en recursos humanos, técnicos y financieros. Para obtener una comprensión completa de los océanos y el clima, se necesita una gran cantidad de datos y mediciones precisas a lo largo del

tiempo. Además, estas mediciones deben ser consistentes, comparables y estandarizadas para ser útiles en la investigación y la toma de decisiones.

Es por eso que la cooperación y el intercambio de información son cruciales para avanzar en la observación oceanográfica, más aún entre países fronterizos, que pueden beneficiarse del desarrollo de iniciativas de observación regionales complementarias. A través del proyecto Atlazul, se ha fomentado ese diálogo y conocimiento mutuo entre actores relevantes de la costa Atlántica de la Península Ibérica. Al compartir datos y metodologías, se reduce la duplicación de esfuerzos, se mejoran las técnicas de medición y se aumenta el alcance de la investigación y la toma de decisiones.

En este entregable se ha elaborado una revisión del estado del arte de las tecnologías de observación, y se han puesto en común diferentes prácticas para el mantenimiento de redes de observación operacionales muy heterogéneas.

Así mismo se ha resaltado la relevancia de disponibilizar los datos resultantes en los repositorios correspondientes, siguiendo los principios de FAIR, que significa que los datos deben ser:

- Findable (encontrables): los datos deben estar disponibles en un lugar donde sean fácilmente accesibles y se puedan encontrar por otros investigadores.
- Accessible (accesibles): los datos deben estar disponibles en un formato que pueda ser leído por máquinas y deben ser accesibles sin restricciones innecesarias.
- Interoperable (interoperables): los datos deben ser compatibles con otros conjuntos de datos y sistemas de información, de modo que se puedan combinar y utilizar para análisis más amplios.
- Reusable (reutilizables): los datos deben ser publicados con licencias y metadatos claros, de modo que puedan ser utilizados y citados por otros investigadores.

Aunque existen repositorios específicos para diferentes fuentes de datos, que se han ido mencionando a lo largo de este entregable, existen dos

iniciativas a nivel europeo que han sido fundamentales para hacer que los datos de observación oceanográfica estén más accesibles y sean más fácilmente reutilizables: EMODnet (European Marine Observation and Data Network) y Copernicus. EMODnet es una red europea que recopila y armoniza datos marinos de toda Europa para apoyar la toma de decisiones en materia de gestión marina y la investigación científica. Copernicus, por su parte, es un programa europeo de observación de la Tierra que además de datos “in situ”, utiliza datos de satélites y modelos, con una vocación más operacional. Ambos, comparten el mismo sistema de ingestión de datos “in situ”, y a través de numerosos tutoriales y herramientas, facilitan la armonización, estandarización e integración de datos de fuentes muy diversas (<https://www.emodnet-ingestion.eu/>).

Compartir datos permite una mayor colaboración entre diferentes disciplinas y países, lo que conduce a una comprensión más completa de los océanos y el clima. Esto a su vez permite una mejor planificación y gestión de los recursos marinos y costeros, lo que es esencial para el desarrollo sostenible de la economía azul y la protección del medio ambiente marino.

Esta relación entre los datos observacionales y las necesidades de información para una economía azul sostenible, está reflejada en ambos repositorios, que clasifican los productos de información que sirven bajo diferentes categorías de “[Human Activities](#)” en Emodnet y “[Blue Markets](#)” en Copernicus.

De todos modos, esta información debe ser adaptada a las necesidades de cada región y es por ello que iniciativas como Atlazul, permiten no sólo mejorar las redes de observación existentes a nivel regional, sino diseñar sistemas más cooperativos y específicos para los sectores de la economía azul más relevantes de la fachada Atlántica de la península ibérica, adecuándolos a sus particularidades y necesidades más acuciantes, siendo estos resultado sin duda cruciales para el desarrollo de la economía azul en estas regiones, y para contribuir a su sostenibilidad a nivel europeo y global.

4. Bibliografía

- Andrade, Hector, Jean-Charles Massabuau, Sabine Cochrane, Pierre Ciret, Damien Tran, Mohamedou Sow, y Lionel Camus. 2016. «High Frequency Non-invasive (HFNI) Bio-Sensors As a Potential Tool for Marine Monitoring and Assessments». *Frontiers in Marine Science* 3: 187. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00187>.
- Aniceto, Ana S., Martin Biuw, Ulf Lindstrøm, Stian A. Solbø, Fredrik Broms, y JoLynn Carroll. 2018. «Monitoring Marine Mammals Using Unmanned Aerial Vehicles: Quantifying Detection Certainty». *Ecosphere* 9 (3): e02122. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2122>.
- Aspillaga, Eneko, Robert Arlinghaus, Martina Martorell-Barceló, Guillermo Follana-Berná, Arancha Lana, Andrea Campos-Candela, y Josep Alós. 2021. «Performance of a novel system for high-resolution tracking of marine fish societies». *Animal Biotelemetry* 9 (1): 1. <https://doi.org/10.1186/s40317-020-00224-w>.
- Axler, Kelia E., Su Sponaugle, Christian Briseño-Avena, Frank Hernandez Jr, Sally J. Warner, Brian Dzwonkowski, Steven L. Dykstra, y Robert K. Cowen. 2020. «Fine-Scale Larval Fish Distributions and Predator-Prey Dynamics in a Coastal River-Dominated Ecosystem». *Marine Ecology Progress Series* 650 (septiembre): 37-61. <https://doi.org/10.3354/meps13397>.
- Behrenfeld, Michael J., Peter Gaube, Alice Della Penna, Robert T. O'Malley, William J. Burt, Yongxiang Hu, Paula S. Bontempi, et al. 2019. «Global Satellite-Observed Daily Vertical Migrations of Ocean Animals». *Nature* 576 (7786): 257-61. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1796-9>.
- Benoit-Bird, Kelly J., y Chad M. Waluk. 2020. «Exploring the promise of broadband fisheries echosounders for species discrimination with quantitative assessment of data processing effects». *The Journal of the Acoustical Society of America* 147 (1): 411-27. <https://doi.org/10.1121/10.0000594>.
- Bertani, Paul, y Wu Lu. 2021. «Cyanobacterial Toxin Biosensors for Environmental Monitoring and Protection». *Medicine in Novel Technology and Devices* 10 (junio): 100059. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100059>.
- Bicknell, Anthony WJ, Brendan J Godley, Emma V Sheehan, Stephen C Votier, y Matthew J Witt. 2016. «Camera Technology for Monitoring Marine Biodiversity and Human Impact». *Frontiers in Ecology and the Environment* 14 (8): 424-32. <https://doi.org/10.1002/fee.1322>.
- Black, K. P., y M. A. Rosenberg. 1994. «Suspended Sand Measurements in a Turbulent Environment: Field Comparison of Optical and Pump Sampling Techniques». *Coastal Engineering* 24 (1): 137-50. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)90030-2).
- Bradley, Darcy, Matt Merrifield, Karly M. Miller, Serena Lomonico, Jono R. Wilson, y Mary G. Gleason. 2019. «Opportunities to Improve Fisheries Management through Innovative Technology and Advanced Data Systems». *Fish and Fisheries* 20 (3): 564-83. <https://doi.org/10.1111/faf.12361>.
- Brehmer, Patrice, Gorka Sancho, Vasilis Trygonis, David Itano, John Dalen, Ariel Fuchs, Abdelmalek Faraj, y Marc Taquet. 2019. «Towards an Autonomous Pelagic Observatory: Experiences from Monitoring Fish Communities around Drifting FADs». *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences* 35 (1): 177-89. <https://doi.org/10.1007/s41208-018-0107-9>.
- Brett, Annie, Jim Leape, Mark Abbott, Hide Sakaguchi, Ling Cao, Kevin Chand, Yimnang Golbuu, Tara J. Martin, Juan Mayorga, y Mari S. Myksovoll. 2020. «Ocean Data Need a Sea Change to Help

- Navigate the Warming World». *Nature* 582 (7811): 181-83. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01668-z>.
- Browning, Ella, Rory Gibb, Paul Glover-Kapfer, y Kate E Jones. 2017. «Passive Acoustic Monitoring in Ecology and Conservation». Ecosystem Technology. WWF Conservation Technology Series. WWF-UK.
- Burnett, William C., Henry Bokuniewicz, Markus Huettel, Willard S. Moore, y Makoto Taniguchi. 2003. «Groundwater and Pore Water Inputs to the Coastal Zone». *Biogeochemistry* 66 (1): 3-33. <https://doi.org/10.1023/B:BIOG.0000006066.21240.53>.
- Castellanos-Galindo, Gustavo A., Elisa Casella, Juan Carlos Mejía-Rentería, y Alessio Rovere. 2019. «Habitat Mapping of Remote Coasts: Evaluating the Usefulness of Lightweight Unmanned Aerial Vehicles for Conservation and Monitoring». *Biological Conservation* 239 (noviembre): 108282. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108282>.
- Centelleghé, Cinzia, Lisa Carraro, Joan Gonzalvo, Massimiliano Rosso, Erika Esposti, Claudia Gili, Marco Bonato, et al. 2020. «The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to Sample the Blow Microbiome of Small Cetaceans». *PLOS ONE* 15 (7): e0235537. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235537>.
- Cheng, K. H., S. N. Chan, y Joseph H. W. Lee. 2020. «Remote Sensing of Coastal Algal Blooms Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)». *Marine Pollution Bulletin* 152 (marzo): 110889. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110889>.
- Cho, Hyung-Mi, Guebuem Kim, Eun Young Kwon, Nils Moosdorf, Jordi Garcia-Orellana, y Isaac R. Santos. 2018. «Radium Tracing Nutrient Inputs through Submarine Groundwater Discharge in the Global Ocean». *Scientific Reports* 8 (1): 2439. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20806-2>.
- Chua, Emily J., William Savidge, R. Timothy Short, Andres M. Cardenas-Valencia, y Robinson W. Fulweiler. 2016. «A Review of the Emerging Field of Underwater Mass Spectrometry». *Frontiers in Marine Science* 3: 209. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00209>.
- Coffey, Daniel M., y Kim N. Holland. 2015. «First autonomous recording of in situ dissolved oxygen from free-ranging fish». *Animal Biotelemetry* 3 (1): 47. <https://doi.org/10.1186/s40317-015-0088-x>.
- Coffin, Michael R. S., Simon C. Courtenay, Christina C. Pater, y Michael R. van den Heuvel. 2018. «An Empirical Model Using Dissolved Oxygen as an Indicator for Eutrophication at a Regional Scale». *Marine Pollution Bulletin* 133 (agosto): 261-70. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.041>.
- Colas, F., M. Tardivel, J. Perchoc, M. Lunven, B. Forest, G. Guyader, M. M. Danielou, et al. 2018. «The ZooCAM, a New in-Flow Imaging System for Fast Onboard Counting, Sizing and Classification of Fish Eggs and Metazooplankton». *Progress in Oceanography*, Multidisciplinary integrated surveys, 166 (septiembre): 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.10.014>.
- Cusack, Christopher, Omisha Manglani, Shems Jud, Katie Westfall, Rod Fujita, Nicole Sarto, Poppy Brittingham, y Huff McGonigal. 2021. *A Comprehensive Landscape Analysis*. Environmental Defense Fund.
- Cyr, Frédéric, Marc Tedetti, Florent Besson, Nagib Bhairy, y Madeleine Goutx. 2019. «A Glider-Compatible Optical Sensor for the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Marine Environment». *Frontiers in Marine Science* 6: 110. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00110>.
- Demer, D. A., Andersen, L., Bassett, C., Berger, L., Chu, D., Condiotty, J., Cutter, G. R., et al. 2017. «2016 USA–Norway EK80 Workshop Report: Evaluation of a Wideband Echosounder for

- Fisheries and Marine Ecosystem Science». 336. ICES Cooperative Research Report. ICES. <http://www.ices.dk/sites/pub/Publication Reports/Forms/DispForm.aspx?ID=36003>.
- De Robertis, Alex, Mike Levine, Nathan Lauffenburger, Taina Honkalehto, James Ianelli, Cole C Monnahan, Rick Towler, Darin Jones, Sarah Stienessen, y Denise McKelvey. 2021. «Uncrewed surface vehicle (USV) survey of walleye pollock, *Gadus chalcogrammus*, in response to the cancellation of ship-based surveys». *ICES Journal of Marine Science* 78 (8): 2797-2808. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab155>.
- Doi, Hideyuki, Yoshihisa Akamatsu, Yutaka Watanabe, Masuji Goto, Ryutei Inui, Izumi Katano, Mariko Nagano, Teruhiko Takahara, y Toshifumi Minamoto. 2017. «Water Sampling for Environmental DNA Surveys by Using an Unmanned Aerial Vehicle». *Limnology and Oceanography: Methods* 15 (11): 939-44. <https://doi.org/10.1002/lom3.10214>.
- Domingues, Rita B., Marcelle Barreto, Vanda Brotas, Helena M. Galvão, y Ana B. Barbosa. 2021. «Short-Term Effects of Winter Warming and Acidification on Phytoplankton Growth and Mortality: More Losers than Winners in a Temperate Coastal Lagoon». *Hydrobiologia* 848 (20): 4763-85. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04672-0>.
- Dyomin, Victor, Alexandra Davydova, Igor Polovtsev, Alexey Olshukov, Nikolay Kirillov, y Sergey Davydov. 2021. «Underwater Holographic Sensor for Plankton Studies In Situ Including Accompanying Measurements». *Sensors* 21 (14): 4863. <https://doi.org/10.3390/s21144863>.
- Edwards, M., Stern, R., y Graham, G. 2019. «A report on additional and add-on enhancements for the Continuous Plankton Recorder Survey programme including add-on variables and molecular analysis.» Deliverable from EU project ATLANTOS 2.9.
- Fernandez Garcia, Guglielmo, François Martignac, Marie Nevoux, Laurent Beaulaton, y Thomas Corpetti. 2021. «A deep neural network for multi-species fish detection using multiple acoustic cameras». <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03350565>.
- Friedlingstein, Pierre, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Are Olsen, Glen P. Peters, et al. 2020. «Global Carbon Budget 2020». *Earth System Science Data* 12 (4): 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- García-Soto, Carlos, Lijing Cheng, Levke Caesar, S. Schmidtke, Elizabeth B. Jewett, Alicia Cheripka, Ignatius Rigor, et al. 2021. «An Overview of Ocean Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature, Ocean Heat Content, Ocean pH, Dissolved Oxygen Concentration, Arctic Sea Ice Extent, Thickness and Volume, Sea Level and Strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation)». *Frontiers in Marine Science* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.642372>.
- Garel, Erwan, y Óscar Ferreira. 2011. «Monitoring Estuaries Using Non-Permanent Stations: Practical Aspects and Data Examples». *Ocean Dynamics* 61 (7): 891-902. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0417-4>.
- Garel, Erwan, Susana Nunes, João Magalhães Neto, Rodrigo Fernandes, Ramiro Neves, João Carlos Marques, y Óscar Ferreira. 2009. «The Autonomous Simpatico System for Real-Time Continuous Water-Quality and Current Velocity Monitoring: Examples of Application in Three Portuguese Estuaries». *Geo-Marine Letters* 29 (5): 331-41. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0147-5>.
- Glud, Ronnie Nøhr, Ingo Klimant, Gerhard Holst, Oliver Kohls, Volker Meyer, Michael Kühl, y Jens Kristian Gundersen. 1999. «Adaptation, Test and in Situ Measurements with O2 Microopt(r)odes on Benthic Landers». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 46 (1): 171-83. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00068-5).

- Gomes, Inês, Laura Peteiro, Juan Bueno-Pardo, Rui Albuquerque, Sergi Pérez-Jorge, Eduardo R. Oliveira, Fátima L. Alves, y Henrique Queiroga. 2018. «What's a Picture Really Worth? On the Use of Drone Aerial Imagery to Estimate Intertidal Rocky Shore Mussel Demographic Parameters». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 213: 185-98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.020>.
- Greene, Charles, Erin Meyer-Gutbrod, Louise McGarry, Lawrence Hufnagle, Dezhang Chu, Sam McClatchie, Asa Packer, et al. 2014. «A Wave Glider Approach to Fisheries Acoustics: Transforming How We Monitor the Nation's Commercial Fisheries in the 21st Century». *Oceanography* 27 (4). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.82>.
- Gruber, Nicolas. 2011. «Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369 (1943): 1980-96. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0003>.
- Hansen, Brian Klitgaard, Dorte Bekkevold, Lotte Worsøe Clausen, y Einar Eg Nielsen. 2018. «The Sceptical Optimist: Challenges and Perspectives for the Application of Environmental DNA in Marine Fisheries». *Fish and Fisheries* 19 (5): 751-68. <https://doi.org/10.1111/faf.12286>.
- Hara, Tony O, y Baljit Singh. 2021. «Electrochemical Biosensors for Detection of Pesticides and Heavy Metal Toxicants in Water: Recent Trends and Progress». *ACS ES&T Water* 1 (3): 462-78. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00125>.
- Haris K. y Kloser R. 2018. «Acoustic Data from Vessels of Opportunity». Report from the EU-H2020 MESOPP project.
- Haris, K., Rudy J. Kloser, Tim E. Ryan, Ryan A. Downie, Gordon Keith, y Amy W. Nau. 2021. «Sounding out Life in the Deep Using Acoustic Data from Ships of Opportunity». *Scientific Data* 8 (1): 23. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00785-8>.
- Harris, J. Mason, James A. Nelson, Guillaume Rieucan, y Whitney P. Broussard III. 2019. «Use of Drones in Fishery Science». *Transactions of the American Fisheries Society* 148 (4): 687-97. <https://doi.org/10.1002/tafs.10168>.
- Helmond, Aloysius T.M. van, Lars O. Mortensen, Kristian S. Plet-Hansen, Clara Ulrich, Coby L. Needle, Daniel Oesterwind, Lotte Kindt-Larsen, et al. 2020. «Electronic Monitoring in Fisheries: Lessons from Global Experiences and Future Opportunities». *Fish and Fisheries* 21 (1): 162-89. <https://doi.org/10.1111/faf.12425>.
- Herman, A. W., B. Beanlands, y E. F. Phillips. 2004. «The next generation of Optical Plankton Counter: the Laser-OPC». *Journal of Plankton Research* 26 (10): 1135-45. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbh095>.
- Howe, Bruce M., Jennifer Miksis-Olds, Eric Rehm, Hanne Sagen, Peter F. Worcester, y Georgios Haralabus. 2019. «Observing the Oceans Acoustically». *Frontiers in Marine Science* 6: 426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00426>.
- Hussey, Nigel E., Steven T. Kessel, Kim Aarestrup, Steven J. Cooke, Paul D. Cowley, Aaron T. Fisk, Robert G. Harcourt, et al. 2015. «Aquatic animal telemetry: A panoramic window into the underwater world». *Science* 348 (6240): 1255642. <https://doi.org/10.1126/science.1255642>.
- Huvenne, Veerle A.I., Kathleen Robert, Leigh Marsh, Claudio Lo Iacono, Tim Le Bas, y Russell B. Wynn. 2018. «ROVs and AUVs». En *Submarine Geomorphology*, editado por Aaron Micallef, Sebastian Krastel, y Alessandra Savini, 93-108. Springer Geology. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1_7.
- Jiang, Li-Qing, Denis Pierrot, Rik Wanninkhof, Richard A. Feely, Bronte Tilbrook, Simone Alin, Leticia Barbero, et al. 2022. «Best Practice Data Standards for Discrete Chemical Oceanographic

- Observations». *Frontiers in Marine Science* 8.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.705638>.
- Kilfoil, James P, Ivan Rodriguez-Pinto, Jeremy J Kiszka, Michael R Heithaus, Yuying Zhang, Camilo C Roa, Lisa E Ailloud, Matthew D Campbell, y Aaron J Wirsing. 2020. «Using unmanned aerial vehicles and machine learning to improve sea cucumber density estimation in shallow habitats». *ICES Journal of Marine Science* 77 (7-8): 2882-89.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa161>.
- Kiszka, Jeremy J., Johann Mourier, Kirk Gastrich, y Michael R. Heithaus. 2016. «Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to Investigate Shark and Ray Densities in a Shallow Coral Lagoon». *Marine Ecology Progress Series* 560 (noviembre): 237-42.
<https://doi.org/10.3354/meps11945>.
- Klemas, Victor. 2013. «Fisheries Applications of Remote Sensing: An Overview». *Fisheries Research* 148 (noviembre): 124-36. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.027>.
- Klimant, Ingo, Volker Meyer, y Michael Köhl. 1995. «Fiber-Optic Oxygen Microsensors, a New Tool in Aquatic Biology». *Limnology and Oceanography* 40 (6): 1159-65.
<https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.6.1159>.
- Kröger, Silke, y Robin J. Law. 2005. «Biosensors for Marine Applications». *Biosensors and Bioelectronics* 20 (10): 1903-13. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2004.08.036>.
- Leape, Jim, Mark Abbott, y Hide Sakaguchi. 2020. «Technology, Data and New Models for Sustainably Managing Ocean Resources». Blue Paper. High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy.
- Leeuw, Thomas, Emmanuel S. Boss, y Dana L. Wright. 2013. «In Situ Measurements of Phytoplankton Fluorescence Using Low Cost Electronics». *Sensors* 13 (6): 7872-83.
<https://doi.org/10.3390/s130607872>.
- Lembke, Chad, Susan Lowerre-Barbieri, David Mann, y J. Christopher Taylor. 2018. «Using Three Acoustic Technologies on Underwater Gliders to Survey Fish». *Marine Technology Society Journal* 52 (6): 39-52. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.52.6.1>.
- Levy, Joshua, Cynthia Hunter, Trent Lukaczyk, y Erik C. Franklin. 2018. «Assessing the Spatial Distribution of Coral Bleaching Using Small Unmanned Aerial Systems». *Coral Reefs* 37 (2): 373-87. <https://doi.org/10.1007/s00338-018-1662-5>.
- Lombard, Fabien, Emmanuel Boss, Anya M. Waite, Meike Vogt, Julia Uitz, Lars Stemann, Heidi M. Sosik, et al. 2019. «Globally Consistent Quantitative Observations of Planktonic Ecosystems». *Frontiers in Marine Science* 6: 196.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00196>.
- MacNeil, M. Aaron, Demian D. Chapman, Michelle Heupel, Colin A. Simpfendorfer, Michael Heithaus, Mark Meekan, Euan Harvey, et al. 2020. «Global Status and Conservation Potential of Reef Sharks». *Nature* 583 (7818): 801-6. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2519-y>.
- Mallet, Delphine, y Dominique Pelletier. 2014. «Underwater Video Techniques for Observing Coastal Marine Biodiversity: A Review of Sixty Years of Publications (1952–2012)». *Fisheries Research* 154 (junio): 44-62. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.019>.
- Marcelli, Marco, Viviana Piermattei, Alice Madonna, y Umberto Mainardi. 2014. «Design and Application of New Low-Cost Instruments for Marine Environmental Research». *Sensors* 14 (12): 23348-64. <https://doi.org/10.3390/s141223348>.

- Marshall, S., y M. Elliott. 1998. «Environmental Influences on the Fish Assemblage of the Humber Estuary, U.K.». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46 (2): 175-84. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0268>.
- McLean, Dianne L., Miles J. G. Parsons, Andrew R. Gates, Mark C. Benfield, Todd Bond, David J. Booth, Michael Bunce, et al. 2020. «Enhancing the Scientific Value of Industry Remotely Operated Vehicles (ROVs) in Our Oceans». *Frontiers in Marine Science* 7: 220. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00220>.
- McQuatters-Gollop, Abigail, Martin Edwards, Pierre Helaouët, David G. Johns, Nicholas J. P. Owens, Dionysios E. Raitsos, Declan Schroeder, Jennifer Skinner, y Rowena F. Stern. 2015. «The Continuous Plankton Recorder Survey: How Can Long-Term Phytoplankton Datasets Contribute to the Assessment of Good Environmental Status?» *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Special Issue: Global Patterns of Phytoplankton Dynamics in Coastal Ecosystems, 162 (septiembre): 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.010>.
- Melvin, Gary D., Rudy Kloser, y Taina Honkalehto. 2016. «The Adaptation of Acoustic Data from Commercial Fishing Vessels in Resource Assessment and Ecosystem Monitoring». *Fisheries Research* 178 (junio): 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.09.010>.
- Moreno, G., L. Dagorn, M. Capello, J. Lopez, J. Filmalter, F. Forget, I. Sancristobal, y K. Holland. 2016. «Fish Aggregating Devices (FADs) as Scientific Platforms». *Fisheries Research*, The use of fishing vessels as scientific platforms, 178 (junio): 122-29. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.09.021>.
- Moustahfid, Hassan, William Michaels, Brett Alger, Avijit Gangopadhyay, y Patrice Brehmer. 2020. «Advances in Fisheries Science through Emerging Observing Technologies». En *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast*, 1-10. Biloxi, MS, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF38699.2020.9389452>.
- Nagai, Kiyohito, Tsuneo Honjo, Jyoji Go, Hiroyasu Yamashita, y Seok Jin Oh. 2006. «Detecting the Shellfish Killer *Heterocapsa Circularisquama* (Dinophyceae) by Measuring Bivalve Valve Activity with a Hall Element Sensor». *Aquaculture* 255 (1): 395-401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.12.018>.
- Oozeki, Yoshioki, Denzou Inagake, Tsutomu Saito, Makoto Okazaki, Ippei Fusejima, Makoto Hotai, Tomowo Watanabe, Hiroya Sugisaki, y Masanori Miyahara. 2018. «Reliable Estimation of IUU Fishing Catch Amounts in the Northwestern Pacific Adjacent to the Japanese EEZ: Potential for Usage of Satellite Remote Sensing Images». *Marine Policy* 88 (febrero): 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.11.009>.
- Padin, X.A., A. Velo, y F.F. Pérez. 2020. «ARIOS: An Acidification Ocean Database for the Iberian Upwelling Ecosystem (1976–2018)». *Earth Syst Sci Data* 12: 2647-2663. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2647-2020>.
- Pelletier, Dominique, Kévin Leleu, Delphine Mallet, Gérard Mou-Tham, Gilles Hervé, Matthieu Boureau, y Nicolas Guilpart. 2012. «Remote High-Definition Rotating Video Enables Fast Spatial Survey of Marine Underwater Macrofauna and Habitats». *PLOS ONE* 7 (2): e30536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030536>.
- Pereira, Tadeu J., Pedro R. Almeida, Bernardo R. Quintella, Aage Gronningsaeter, Maria J. Costa, João P. Marques, y José L. Costa. 2021. «Fine-scale behaviour of the Lusitanian toadfish assessed in situ with the AccelTag». *Animal Biotelemetry* 9 (1): 10. <https://doi.org/10.1186/s40317-021-00231-5>.

- Rabalais, Nancy N. 2015. «Human impacts on fisheries across the land–sea interface». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (26): 7892-93. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508766112>.
- Reiss, Christian S., Anthony M. Cossio, Jennifer Walsh, George R. Cutter, y George M. Watters. 2021. «Glider-Based Estimates of Meso-Zooplankton Biomass Density: A Fisheries Case Study on Antarctic Krill (*Euphausia superba*) Around the Northern Antarctic Peninsula». *Frontiers in Marine Science* 8: 256. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.604043>.
- Rezvanifar, Alireza, Tunai Porto Marques, Melissa Cote, Alexandra Branzan Albu, Alex Slonimer, Thomas Tolhurst, Kaan Ersahin, Todd Mudge, y Stephane Gauthier. 2019. «A Deep Learning-based Framework for the Detection of Schools of Herring in Echograms». *arXiv:1910.08215 [cs, eess, stat]*, octubre. <http://arxiv.org/abs/1910.08215>.
- Rowley, Olivia C., Robert L. Courtney, Sally A. Browning, y Jamie E. Seymour. 2020. «Bay Watch: Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) to Survey the Box Jellyfish *Chironex Fleckeri*». *PLOS ONE* 15 (10): e0241410. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241410>.
- Ruiz, Javier, Isabel Caballero, y Gabriel Navarro. 2020. «Sensing the Same Fishing Fleet with AIS and VIIRS: A Seven-Year Assessment of Squid Jiggers in FAO Major Fishing Area 41». *Remote Sensing* 12 (1): 32. <https://doi.org/10.3390/rs12010032>.
- Santos, Isaac R., Bradley D. Eyre, y Markus Huettel. 2012. «The Driving Forces of Porewater and Groundwater Flow in Permeable Coastal Sediments: A Review». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 98 (febrero): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.024>.
- Schmid, Moritz Sebastian, Cyril Aubry, Jordan Grigor, y Louis Fortier. 2016. «The LOKI Underwater Imaging System and an Automatic Identification Model for the Detection of Zooplankton Taxa in the Arctic Ocean». *Methods in Oceanography, Computer Vision in Oceanography*, 15-16 (abril): 129-60. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.03.003>.
- Schmidt, Jörn O., Steven J. Bograd, Haritz Arrizabalaga, José L. Azevedo, Steven J. Barbeaux, John A. Barth, Tim Boyer, et al. 2019. «Future Ocean Observations to Connect Climate, Fisheries and Marine Ecosystems». *Frontiers in Marine Science* 6: 550. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00550>.
- Schmidtko, Sunke, Lothar Stramma, y Martin Visbeck. 2017. «Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades». *Nature* 542 (7641): 335-39. <https://doi.org/10.1038/nature21399>.
- Scholin, Christopher, James Birch, Scott Jensen, Roman Marin III, Eugene Massion, Douglas Pargett, Christina Preston, Brent Roman, y William Ussler III. 2017. «The Quest to Develop Ecogenomic Sensors: A 25-Year History of the Environmental Sample Processor (ESP) as a Case Study». *Oceanography* 30 (4): 100-113. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2017.427>.
- Send, Uwe, George Fowler, Greg Siddall, Brian Beanlands, Merle Pittman, Christoph Waldmann, Johannes Karstensen, y Richard Lampitt. 2013. «SeaCycler: A Moored Open-Ocean Profiling System for the Upper Ocean in Extended Self-Contained Deployments». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (7): 1555-65. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00168.1>.
- Siddiqui, Shoaib Ahmed, Ahmad Salman, Muhammad Imran Malik, Faisal Shafait, Ajmal Mian, Mark R Shortis, y Euan S Harvey. 2018. «Automatic fish species classification in underwater videos: exploiting pre-trained deep neural network models to compensate for limited labelled data». *ICES Journal of Marine Science* 75 (1): 374-89. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx109>.

- Sun, Chunya, Baowei Song, Peng Wang, y Xinjing Wang. 2017. «Shape Optimization of Blended-Wing-Body Underwater Glider by Using Gliding Range as the Optimization Target». *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9 (6): 693-704. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.12.003>.
- Sward, Darryn, Jacquomo Monk, y Neville Barrett. 2019. «A Systematic Review of Remotely Operated Vehicle Surveys for Visually Assessing Fish Assemblages». *Frontiers in Marine Science* 6: 134. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00134>.
- Testor, Pierre, Brad de Young, Daniel L. Rudnick, Scott Glenn, Daniel Hayes, Craig M. Lee, Charitha Pattiaratchi, et al. 2019. «OceanGliders: A Component of the Integrated GOOS». *Frontiers in Marine Science* 6: 422. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00422>.
- Thiel, R., A. Sepúlveda, R. Kafemann, y W. Nellen. 1995. «Environmental Factors as Forces Structuring the Fish Community of the Elbe Estuary». *Journal of Fish Biology* 46 (1): 47-69. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1995.tb05946.x>.
- Thomsen, Frank, Sonia Mendes, Frederic Bertucci, Monika Breitzke, Elena Ciappi, Alessandro Cresci, Elisabeth Debusschere, et al. 2021. «Addressing Underwater Noise in Europe: Current State of Knowledge and Future Priorities». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5534224>.
- Thomsen, Philip Francis, Jos Kielgast, Lars Lønsmann Iversen, Peter Rask Møller, Morten Rasmussen, y Eske Willerslev. 2012. «Detection of a Diverse Marine Fish Fauna Using Environmental DNA from Seawater Samples». *PLOS ONE* 7 (8): e41732. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041732>.
- Thomsen, Philip Francis, Peter Rask Møller, Eva Egelyng Sigsgaard, Steen Wilhelm Knudsen, Ole Ankjær Jørgensen, y Eske Willerslev. 2016. «Environmental DNA from Seawater Samples Correlate with Trawl Catches of Subarctic, Deepwater Fishes». *PLOS ONE* 11 (11): e0165252. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165252>.
- Torres, Agusti, Ana-Maria Abril, y Eric E. G. Clua. 2020. «A Time-Extended (24 h) Baited Remote Underwater Video (BRUV) for Monitoring Pelagic and Nocturnal Marine Species». *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (3): 208. <https://doi.org/10.3390/jmse8030208>.
- Tran, Damien, Elodie Fournier, Gilles Durrieu, y Jean-Charles Massabau. 2004. «Copper Detection in the Asiatic Clam Corbicula Fluminea: Optimum Valve Closure Response». *Aquatic Toxicology* 66 (3): 333-43. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2004.01.006>.
- Uhlmann, Sven Sebastian, Clara Ulrich, y Steven J. Kennelly, eds. 2019. *The European Landing Obligation: Reducing Discards in Complex, Multi-Species and Multi-Jurisdictional Fisheries*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03308-8>.
- Van Vranken, Cooper, Berthe M. J. Vastenhou, James P. Manning, Kristian S. Plet-Hansen, Julie Jakoboski, Patrick Gorrige, y Michela Martinelli. 2020. «Fishing Gear as a Data Collection Platform: Opportunities to Fill Spatial and Temporal Gaps in Operational Sub-Surface Observation Networks». *Frontiers in Marine Science* 7: 864. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.485512>.
- Ventura, Daniele, Andrea Bonifazi, Maria Flavia Gravina, y Gian Ardizzone. 2017. «Unmanned Aerial Systems (UASs) for Environmental Monitoring: A Review with Applications in Coastal Habitats». En , 165-84. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69598>.
- Verfuss, U. K., A. S. Aniceto, Biuw, M., S. Fielding, D. GILLESPIE, Harris, D., G. Jimenez, et al. 2016. «Literature review: Understanding the current state of autonomous technologies to improve/expand observation and detection of marine species». Report Number SMRUC-OGP2015-015 Provided to IOGP. SMRU Consulting.

- Verfuss, Ursula K., Ana Sofia Aniceto, Danielle V. Harris, Douglas Gillespie, Sophie Fielding, Guillermo Jiménez, Phil Johnston, et al. 2019. «A Review of Unmanned Vehicles for the Detection and Monitoring of Marine Fauna». *Marine Pollution Bulletin* 140 (marzo): 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.009>.
- Villegas-Ríos, David, Carla Freitas, Even Moland, Susanna Huneide Thorbjørnsen, y Esben M. Olsen. 2020. «Inferring Individual Fate from Aquatic Acoustic Telemetry Data». *Methods in Ecology and Evolution* 11 (10): 1186-98. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13446>.
- Wang, Zhaohui Aleck, Hassan Moustahfid, Amy V. Mueller, Anna P. M. Michel, Matthew Mowlem, Brian T. Glazer, T. Aran Mooney, et al. 2019. «Advancing Observation of Ocean Biogeochemistry, Biology, and Ecosystems With Cost-Effective in situ Sensing Technologies». *Frontiers in Marine Science* 6: 519. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00519>.
- Wenzhöfer, Frank, Ola Holby, y Oliver Kohls. 2001. «Deep Penetrating Benthic Oxygen Profiles Measured in Situ by Oxygen Optodes». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48 (7): 1741-55. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00108-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00108-4).
- Wiebe, P. 1988. «Functional regression equations for zooplankton displacement volume, wet weight, dry weight, and carbon: a correction». *Fishery Bulletin*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Functional-regression-equations-for-zooplankton-wet-Wiebe/caae8a05e86a0aef2888d6fdf159fd006d8478f4>.
- Williams, Kresimir, Alex De Robertis, Zachary Berkowitz, Chris Rooper, y Rick Towler. 2014. «An Underwater Stereo-Camera Trap». *Methods in Oceanography* 11 (diciembre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2015.01.003>.
- Williamson, Michael J., Emma J. Tebbs, Terence P. Dawson, y David M. P. Jacoby. 2019. «Satellite Remote Sensing in Shark and Ray Ecology, Conservation and Management». *Frontiers in Marine Science* 6: 135. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00135>.
- Winkler, LW. 1888. «Die Bestimmung des in Wasser gelösten Sauerstoffes». *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 1888.
- Wynn, Russell B., Veerle A. I. Huvenne, Timothy P. Le Bas, Bramley J. Murton, Douglas P. Connelly, Brian J. Bett, Henry A. Ruhl, et al. 2014. «Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their Past, Present and Future Contributions to the Advancement of Marine Geoscience». *Marine Geology*, 50th Anniversary Special Issue, 352 (junio): 451-68. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012>.
- Yang, Xingbang, Tianmiao Wang, Jianhong Liang, Guocai Yao, y Miao Liu. 2015. «Survey on the Novel Hybrid Aquatic-Aerial Amphibious Aircraft: Aquatic Unmanned Aerial Vehicle (AquaUAV)». *Progress in Aerospace Sciences* 74 (abril): 131-51. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.12.005>.
- Yin, Kedong, Zhifeng Lin, y Zhiyuan Ke. 2004. «Temporal and Spatial Distribution of Dissolved Oxygen in the Pearl River Estuary and Adjacent Coastal Waters». *Continental Shelf Research, Pearl River Estuary Study*, 24 (16): 1935-48. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.06.017>.
- Zemeckis, Douglas R, Micah J Dean, Annamaria I DeAngelis, Sofie M Van Parijs, William S Hoffman, Mark F Baumgartner, Leila T Hatch, Steven X Cadrin, y Christopher H McGuire. 2019. «Identifying the distribution of Atlantic cod spawning using multiple fixed and glider-mounted acoustic technologies». *ICES Journal of Marine Science* 76 (6): 1610-25. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz064>.