

Base de datos de medidas contemporáneas del sistema del carbono disuelto

Código: E.2.1

Acción: A.2.1

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal

CAPTA

Cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027. Las opiniones son de exclusiva responsabilidad del autor que las emite.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
1.INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.Objetivo general.....	4
1.2.Alcance.....	4
2. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	5
2.1. Descripción de los sensores.....	7
2.2. Mantenimiento de los sensores	8
3. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS.....	8
4. ACCESO A LOS DATOS.....	9
5. REFERENCIAS.....	9

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización precisa y sostenida de la presión parcial de CO₂ (pCO₂) en la superficie marina es imprescindible para poder estimar con precisión la captación oceánica de CO₂ atmosférico, ya que esta variable determina el gradiente gaseoso que impulsa dicho intercambio. Desde la Revolución Industrial, el océano ha absorbido aproximadamente el 25% del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera (Friedlingstein et al., 2022), amortiguando parcialmente el calentamiento global. Esta captación de CO₂ está estrechamente vinculada a otro de los impactos clave del cambio climático: la disminución del pH superficial y la acidificación oceánica (Orr et al., 2005; Doney et al., 2020; IPCC, 2021). La absorción oceánica de CO₂ presenta una marcada variabilidad espacial y temporal controlada por procesos físicos, biogeoquímicos y ecológicos que operan desde escalas locales hasta globales (Takahashi et al., 2009; Landschützer et al., 2016). Caracterizar adecuadamente esta variabilidad exige observaciones directas, de alta calidad, comparables y estandarizadas (Bakker et al., 2023). Además, estas mediciones son indispensables para validar modelos biogeoquímicos y reconstrucciones basadas en aprendizaje automático (Gregor et al., 2019), proporcionando referencias fundamentales para el Global Carbon Budget, anticipando cambios en los ecosistemas marinos, mejorando la gestión costera y apoyando políticas climáticas basadas en evidencia científica.

Las zonas costeras presentan una complejidad aún mayor, al estar influenciadas por aportes continentales, procesos de mezcla, elevada productividad y presiones antropogénicas. En estos entornos, disponer de observaciones continuas es crucial para describir su variabilidad y tendencias (Cai et al., 2020). Este desafío es especialmente relevante en la costa de Galicia, una región de afloramiento cuya evolución futura bajo escenarios de cambio global es incierta. Mientras algunas proyecciones climáticas apuntan a una intensificación de los vientos favorables al afloramiento (Álvarez et al., 2017), las observaciones in situ muestran resultados aún contradictorios (Pérez et al., 2010; Barton et al., 2013; Otero et al., 2023). La dirección de estos cambios y su influencia sobre los factores físico-químicos, como la temperatura, la producción primaria o la salinidad, que controlan la captación de CO₂ determinarán si las aguas costeras funcionan como sumidero o fuente neta de CO₂ hacia la atmósfera.

En un contexto marcado por el preocupante descenso de las observaciones de pCO₂ en mar abierto desde 2017, reforzar y ampliar la monitorización del CO₂ oceánico constituye una prioridad estratégica reconocida por múltiples programas internacionales y marcos legislativos. La Agenda 2030 de Naciones Unidas, el Reglamento Europeo de Clima (2021/1119), la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021–2027 y la futura Ley del Clima de Galicia subrayan la necesidad de disponer de observaciones precisas, continuas y sostenidas del sistema océano-atmósfera para cuantificar la captación neta de CO₂ y avanzar hacia la neutralidad climática en las próximas décadas.

Con el fin de contribuir a ampliar las observaciones de pCO₂ en aguas costeras, el Grupo de Procesos Oceánicos en Cambio Global del Departamento de Oceanografía del IIM-CSIC ha desarrollado un sistema portátil autocontenido equipado con múltiples sensores biogeoquímicos, que, junto con un analizador de pCO₂ adquirido en el marco del proyecto CAPTA, ha sido desplegado en diversas campañas oceanográficas en la costa de Galicia. Este conjunto de datos contemporáneos constituye la base para la modelización de flujos de CO₂ y para avanzar en el conocimiento y cuantificación de la capacidad de las aguas costeras gallegas de actuar como sumidero de carbono y en la conservación de sus ecosistemas.

En concreto, el proyecto CAPTA tiene entre sus objetivos:

- Identificar e implementar indicadores ambientales que funcionen como sistemas de alerta temprana ante amenazas climáticas y alteraciones del estado de las masas de agua y ecosistemas marinos, incluyendo su contribución a la neutralidad climática.

- Incorporar en los programas de monitorización operacional la obtención de las variables necesarias para alimentar dichos indicadores ambientales.

1.1 Objetivo general

El proyecto CAPTA tiene por objeto establecer las bases para el desarrollo de políticas e instrumentos de planificación conjuntas que faciliten alcanzar la neutralidad climática y permitan fortalecer los servicios ecosistémicos del litoral, mejorando su resiliencia.

En este contexto, la implementación de un protocolo de control de calidad de datos oceanográficos se vuelve indispensable. Dicho protocolo tiene como objetivo específico garantizar la fiabilidad y comparabilidad de los datos, facilitando la integración de información procedente de la red de estaciones de medida en aguas somera y promoviendo la coherencia en las evaluaciones de los servicios ecosistémicos proporcionados por los ecosistemas de carbono azul (en adelante BCEs)

1.2 Alcance

Mediante lo dispuesto en este documento, se presenta la base de datos obtenidos desde el inicio del proyecto CAPTA a finales de 2023 hasta la actualidad (mediados de 2025) a bordo del buque B/O Mytilus del CSIC. Se trata de un conjunto de datos fiables que permitirán evaluar el intercambio de CO₂ entre las aguas costeras de Galicia y la atmósfera.

2. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS

El conjunto de datos reúne observaciones costeras de presión parcial de dióxido de carbono ($p\text{CO}_2$) en superficie, junto con mediciones simultáneas de temperatura y salinidad del agua de mar. Estos parámetros fueron obtenidos durante distintos transectos del buque oceanográfico B/O Mytilus en el marco de diversos proyectos realizados en las Rías Baixas y la plataforma continental gallega. Aunque algunos de estos proyectos no tenían entre sus objetivos principales la caracterización biogeoquímica de las aguas costeras, el B/O Mytilus se utilizó también como buque de oportunidad (*VOS, Voluntary Observing Ship*) gracias a la colaboración de los distintos investigadores principales responsables del trabajo de campo. Esta estrategia en el uso de diferentes tipos de embarcaciones resulta clave en los sistemas modernos de monitorización continua de variables atmosféricas y oceanográficas superficiales, ya que permite registrar datos de alta calidad aprovechando las rutas de estas plataformas. Entre sus ventajas destacan el bajo coste, la alta resolución espacial y temporal de las observaciones, especialmente valiosa cuando un mismo buque repite trayectorias con frecuencia. Esta capacidad de muestreo facilita la detección y caracterización de eventos de corta duración que pueden no ser caracterizados en campañas oceanográficas planificadas y que son especialmente relevantes en ecosistemas dinámicos como las zonas costeras (afloramientos costeros, olas de calor marinas, entradas de agua dulce...). Este elevado volumen de datos constituye actualmente una parte fundamental para bases de datos globales como SOCAT, esenciales para estimar el balance global de carbono y seguir la evolución del CO_2 oceánico.

Entre los proyectos que tenían explícitamente en su diseño la obtención de medidas de $p\text{CO}_2$ en continuo y que son incluidas en la base de datos del presente entregable:

REDEIRA. “Research, development and innovation of a Coastal Observation network: Ría de Arousa”. Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2021-2023. Duración: 09/2022-09/2025. Financiación: 244.950 €. IPs : XA Padín y Antón Velo.

BOGAR. “Observación de variables biogeoquímicas de relevancia climática con buques de oportunidad en la costa gallega y rías”. Ref : PTA2022-021307-I. Duración: 12/2023-12/2026. Funding: 131.400 €. Project endorsed by the UN Decade of Ocean Science. IP: Marcos Fontela.

Otras iniciativas que nos brindaron la oportunidad de utilizar el B/O Mytilus como una plataforma VOS coordinadas por el proyecto BOGAR fueron:

NENUMO. “Metabolismo del ecosistema de una región de afloramiento costero: integración de los dominios pelágico y bentónico”. Investigadora principal: Castro, C.G. (PID2021-122238OB-I00). Convocatoria: Ministerio de Ciencia e Innovación. Financiación IIM-CSIC: 254.000 €. Duración: 06/2022 - 05/2026. IP: CG Castro

MOVE: Movescapes, connectivity hotspots and eco-evolutionary dynamics: protecting the functional role of predatory coastal fishes Referencia: PCI2022-134970-2 Financiación para el IIM-CSIC: 173.700€ Institución financiadora: Agencia Estatal de Investigación (AEI - Biodiversa+). Proyectos de colaboración Internacional 2022-2. Programa Estatal para Afrontar las Prioridades de Nuestro Entorno. Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2021-2023. Duración: 12/2022 - 12/2025. IP: Alexandre Alonso Fernández.

BIODIV: “Asesoramiento científico-técnico para el seguimiento de la biodiversidad marina: espacios y especies marinos protegidos de competencia estatal (2023-2026)”. Campaña Maërlgal2024. Subactividad A5.3 "Mejora de conocimiento, incluyendo la distribución cartográfica y el estado de

conservación, de comunidades de maërl. Proyecto financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia; y financiado por la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y CSIC, a través del Instituto Español de Oceanografía (IEO). IP: Enric Massutí.

Prácticas de Grado en Ciencias del Mar da Universidade de Vigo. Curso 2024-2025.

El conjunto de datos incluido en este entregable fue recopilado entre el 12 de diciembre de 2023 y el 6 de junio de 2025 en la Ría de Vigo, Ría de Pontevedra, Ría de Arousa, Ría de Muros y en la plataforma continental gallega. En total se obtuvieron 15.142 observaciones minutas, correspondientes a 61 días efectivos de trabajo de campo, lo que representa aproximadamente un 11 % del periodo total monitorizado. Si bien todos los meses del año cuentan con datos, las condiciones meteorológicas favorables que facilitaron la realización de las campañas generaron un sesgo hacia una mayor intensidad de muestreo en los meses de primavera y verano.

La base de datos incluye posición geográfica, fecha y mediciones de temperatura, salinidad y pCO₂ superficial, variables clave para evaluar el intercambio de CO₂ océano–atmósfera en las aguas costeras de Galicia. Asimismo, estos datos permiten caracterizar la variabilidad espacio–temporal de estos parámetros a lo largo del eje longitudinal de los estuarios que conforman las Rías Baixas, así como identificar patrones asociados a eventos oceanográficos de corta duración tales como intrusiones de afloramiento, pulsos fluviales o episodios de calentamiento superficial.

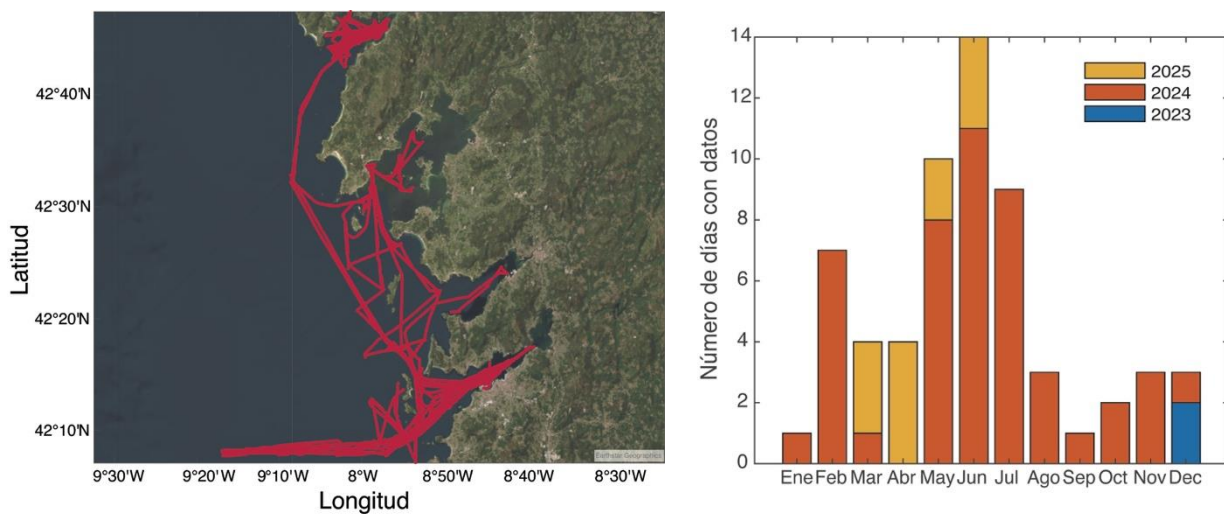


Figura 1.- Mapa de las medidas contemporáneas de pCO₂ incluidas en el presente entregable (*izquierda*). Histograma con la distribución de los días con medidas incluidas en el presente entregable (*derecha*).

En comparación con la base de datos del Instituto de Investigaciones Mariñas (CSIC) antes del proyecto CAPTA en las aguas costeras de las Rías Baixas, este nuevo conjunto de datos supone un incremento del número de días muestreados del 21%, ampliando notablemente la resolución temporal y la capacidad de análisis. Esta información resulta esencial para el estudio del sistema océano–atmósfera en una región tan singular como las costas de Galicia y para avanzar en la comprensión de los procesos que controlan la dinámica del carbono inorgánico disuelto en entornos costeros sometidos a alta variabilidad físico-biogeoquímica.

2.1 Descripción de los equipos

El equipo multiparamétrico instalado en el Mytilus durante el proyecto CAPTA es un diseño propio del grupo de Procesos Oceánicos en Cambio Global del Departamento de Oceanografía del Instituto de Investigaciones Mariñas.

SBE45 MicroTSG de Sea-Bird. Termosalinógrafo diseñado para su instalación en buques, que mide de forma continua la temperatura y la conductividad del agua de mar bombeada desde la superficie, proporcionando un control fiable de las condiciones del agua superficial durante la navegación. Trabaja en un rango de conductividad de 0 a 7 S/m y de temperatura de -5 a $+35$ °C (incluyendo soporte para SBE 38 remoto), con alta precisión y estabilidad: resolución de conductividad de 0,00001 S/m, precisión inicial de $\pm 0,0003$ S/m y precisión térmica de hasta $\pm 0,002$ °C, manteniendo una deriva típica baja (p. ej., 0,0003 S/m/mes). Permite configurar el intervalo de muestreo entre 1 segundo y 9 horas, se alimenta a 8–30 VDC y mantiene un consumo reducido (30–34 mA en adquisición y 10 μ A en reposo). Para un funcionamiento óptimo requiere un caudal recomendado de 10–30 ml/s, soporta hasta 34,5 dbar (50 psi) y se presenta en una carcasa de PVC robusta, pensada para uso continuo, con un peso aproximado de 4,6 kg.

CONTROS HydroC® CO₂ FT. El CONTROS HydroC® CO₂ FT es un sensor de alta precisión para medir pCO₂ en aguas superficiales, pensado tanto para plataformas en movimiento (p. ej., FerryBox) como para laboratorio, y muy usado en estudios de acidificación oceánica, clima, flujos aire-mar, limnología, acuicultura y monitorización de sistemas de captura/almacenamiento de carbono. Su medida se basa en TDLAS (espectroscopía de absorción láser de diodo sintonizable): el agua se bombea a través del cabezal de flujo y el CO₂ disuelto difunde a un circuito interno de gas que alimenta la cámara de detección, generando una señal robusta y reproducible incluso en condiciones dinámicas. Ofrece un rango de medida de 0 a 40.000 μ atm, límite de detección < 1 μ atm y una exactitud de ± 2 μ atm o $\pm 3\%$ (lo que sea mayor), trabajando entre -2 y $+30$ °C con caudal de 2 a 15 L/min (recomendado 5 L/min) y alimentación de 12–30 V. La comunicación es RS232 (versiones FT), con salida en ASCII y protocolo NMEA, en un equipo compacto de 8,5 kg.

Este conjunto de sensores está integrado utilizando una placa microcontroladora versátil y potente (Arduino Mega 2560 Rev3) diseñada para aplicaciones avanzadas como sistemas de adquisición de datos.

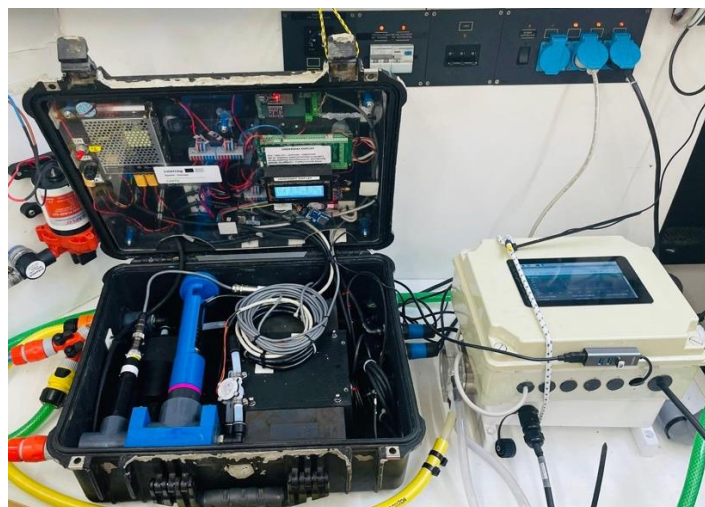


Figura 2.- Equipo de analítico de las medidas contemporáneas de pCO₂. Maleta con sensorica bioquímica (*izquierda*) y equipo analizador y de control de medidas de pCO₂ (*derecha*).

2.2 Mantenimiento de los equipos

El mantenimiento de los equipos se realiza siguiendo estrictamente la documentación del fabricante y los protocolos internos de operación. De forma rutinaria, estas tareas se llevaron a cabo al finalizar cada salida al mar. En todas ellas, los instrumentos fueron endulzados exhaustivamente con agua dulce para eliminar residuos salinos, especialmente en las zonas sensibles como la celda de salinidad del SBE45 o en la membrana de intercambio gaseoso del CONTROS HydroC CO₂ FT, y minimizar la corrosión de los componentes externos. También se aprovechaba ese momento para hacer una supervisión visual para comprobar la estanqueidad.

Como parte del mantenimiento (y del control de calidad), durante el transecto y también al finalizar la jornada, se realizaba una inspección visual de las medidas obtenidas a partir de un análisis gráfico correcto para verificar el correcto funcionamiento de los equipos y la detección de posibles fallos de funcionamiento (derivadas, períodos sin medida, etc.) y su consiguiente reparación tanto en la propia sensorica como en el sistema de alimentación y/o almacenamiento de datos.

3. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS

El objetivo del control de calidad (QC) de los datos es garantizar la consistencia de los datos dentro de un conjunto de datos y entre diferentes conjuntos. La implantación un protocolo de QC de datos oceanográficos es clave para asegurar que los datos sean fiables, trazables, estandarizados y conformes con exigencias internacionales.

Los indicadores o banderas de calidad (quality flags) que acompañan a cada medida indican la calidad, fiabilidad o incluso verificaciones realizadas proporcionando al usuario información necesaria para para evaluar su idoneidad de uso.

El conjunto de datos de medidas contemporáneas del sistema del carbono disuelto se ha sometido a los siguientes test a modo de QC Primario:

1. Control de rangos físicos: Comprobación de que cada variable está dentro de límites físicamente posibles.
2. Control de rangos climatológicos en la región: Verificación de que los valores están dentro de rangos esperables para la región y la estación.
3. Control de tasa de cambio: Identificación de picos o saltos bruscos con respecto a la medición anterior o posterior.
4. Control de duplicados: Localización de valores repetidos en el tiempo y/o espacio por error de archivado.
5. Test de posicionado geográfica: Verificación de las coordenadas GPS en límites correctos y con sucesión realista.
6. Test de tiempo: Verifica la sucesión de fechas realistas y con un orden cronológico consistente.
7. Control de velocidad: Selección de medidas con el buque a una velocidad superior a 2 nudos y por debajo de una velocidad imposible (20 nudos). Con este filtro, se descartan los momentos en los que el buque está parado o en maniobra de aceleración/deceleración y que pueden afectar a la representatividad de la información recogida con respecto a los instantes de movimiento.

8. Control del flujo volumétrico por unidad de tiempo (caudal): Comprobación de la existencia de un caudal mínimo (0,5 L/min) para el correcto funcionamiento los sensores.
9. Inspección visual de las medidas para la eliminación manual de valores anómalos.

Otros procedimientos del QC Primario como la consistencia interna de las medidas en comparación con otro conjunto de medidas obtenidas durante el funcionamiento de este equipo, como datos superficiales de estaciones CTD o medidas discretas, serán aplicados una vez se complete el QC de este conjunto de medidas.

Por tanto y siguiendo las indicaciones del Ocean Data Standards (<https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/413>), donde se definen 5 tipos de quality flags para el QC Primario, todas las medidas de la presente base de datos tiene el flag 2 que indica "No evaluado, no disponible o desconocido. Se utiliza para datos en los que no se ha realizado ninguna prueba de control de calidad o cuando la información sobre la calidad no está disponible".

4. ACCESO A LOS DATOS

Las medidas están disponibles en el siguiente [enlace](#) :

<https://co2.iim.csic.es/seafhttp/f/63dccb5ad61e45ddb3a/?op=view>

REFERENCIAS

- Alvarez, I., Lorenzo, M.N., deCastro, M., Gomez-Gesteira, M. 2017. Coastal upwelling trends under future warming scenarios from the CORDEX project along the Galician coast (NW Iberian Peninsula). *Int. J. Climatol.*, 37, 3427–3438. <https://doi.org/10.1002/joc.4927>.
- Bakker, D. C., Alin, S. R., Bates, N., Becker, M., Feely, R. A., Gkritzalis, T., ... & Wimart-Rousseau, C. 2023. Surface ocean CO2 atlas database version 2023 (SOCATv2023)(NCEI Accession 0278913). (*No Title*).
- Barton, E. D., Field, D. B., & Roy, C. 2013. Canary current upwelling: More or less?. *Progress in Oceanography*, 116, 167-178.
- Cai, W.-J., Xu, Y.-Y., Feely, R. A., Wanninkhof, R., Jönsson, B., Alin, S. R., Barbero, L., Cross, J. N., Azetsu-Scott, K., Fassbender, A. J., Carter, B. R., Jiang, L.-Q., Pepin, P., Chen, B., Hussain, N., Reimer, J. J., Xue, L., Salisbury, J. E., Hernández-Ayón, J. M., Langdon, C., Li, Q., Sutton, A. J., Chen, C.-T. A., and
- Gledhill, D. K. 2020. Controls on surface water carbonate chemistry along North American ocean margins, *Nat. Commun.*, 11, 2691, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16530-z>,
- Doney, S. C., Busch, D. S., Cooley, S. R., & Kroeker, K. J. 2020. The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 83-112.

- Gregor, L., Lebehot, A. D., Kok, S., & Scheel Monteiro, P. M. 2019. A comparative assessment of the uncertainties of global surface ocean CO₂ estimates using a machine-learning ensemble (CSIR-ML6 version 2019a)—have we hit the wall?. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 5113-5136.
- Intergovernmental Oceanographic Commission. 2013. Ocean Data Standards Volume 3. Recommendation for a Quality Flag Scheme for the Exchange of Oceanographic and Marine Meteorological Data. Paris, France, UNESCO-IOC,, 5pp. & Annexes. (Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides, Volume 54 (3). (IOC/2013/MG/54-3) <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-6>.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., et al. (Eds.)]. Cambridge University Press.
- Landschützer, P., Gruber, N., and Bakker, D. C. E. 2016. Decadal variations and trends of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9), 1396–1417. <https://doi.org/10.1002/2015GB005359>
- Pérez, Fiz F., Xose A. Padin, Yolanda Pazos, Miguel Gilcoto, Manuel Cabanas, Paula C. Pardo, Ma Dolores Doval, and Luis Farina-Busto. 2010. Plankton response to weakening of the Iberian coastal upwelling. *Global Change Biology* 16:4, 1258-1267.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), 681–686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>
- Otero, P., Cabrero, Á., Alonso-Pérez, F., Gago, J., & Nogueira, E. (2023). Temperature and salinity trends in the northern limit of the Canary Current Upwelling System. *Science of the Total Environment*, 901, 165791.

