

# REPRESENTACIÓN Y VARIABILIDAD DE LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO EN EL OCÉANO PACÍFICO SUDESTE: UN ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE BASES DE DATOS

Fiorela Castellón<sup>1,2</sup>, Roger Manay<sup>1</sup>, Hector Retamozo<sup>2</sup>, Ivonne Montes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico del Perú (IGP), Perú

<sup>2</sup> Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Perú

**Palabras clave:** Zona Mínima de Oxígeno (ZMO), bases de datos, espesor, flotadores ARGO.

Citar como Castellón, F., Manay, R., Retamozo, H., & Montes, I. (2025). Representación y variabilidad de la zona mínima de oxígeno en el océano Pacífico sudeste: un análisis comparativo entre bases de datos. Boletín Científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 06, págs. 11-19.

## ¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?\*

La alta productividad de la pesquería en nuestro mar está asociado al proceso de afloramiento costero. Sin embargo, la expansión de las aguas pobres en oxígeno a mayores profundidades asociada a la acción humana podría limitar la distribución de las especies marinas. Esta investigación analiza la dinámica de la zona mínima de oxígeno (ZMO) en el océano Pacífico sudeste. Los resultados describen el importante rol de los eventos climáticos extremos, como es el caso de El Niño en la variabilidad espacial y temporal de la profundidad y espesor de la ZMO. Esta información es importante para conocer los posibles impactos de los cambios en la distribución espacial y temporal de la ZMO, con el fin de gestionar en forma sostenible la productividad pesquera de nuestros ecosistemas marinos.

## Resumen

Esta investigación realiza un análisis comparativo entre las bases de datos climatológicas grilladas (GOBAI, WOA23, CARS09, WOA09) disponibles en el océano Pacífico sudeste, con el objetivo de investigar la dinámica de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO). Asimismo, analiza de manera preliminar su estructura vertical utilizando datos de flotadores ARGO. Los resultados muestran que la ZMO presenta una configuración elongada, con el límite norte de orientación zonal (oeste-este) y el límite sur con dirección noroeste-sureste, claramente identificable a 200 metros de profundidad en todas las bases de datos analizadas. Las bases de datos GOBAI y WOA23 muestran una mayor extensión horizontal del

núcleo de la ZMO, mientras que CARS09 presenta una cobertura más reducida. A 700 m de profundidad, el núcleo de la ZMO se restringe significativamente, localizándose únicamente frente a la costa peruana, con una marcada diferencia entre todas las bases de datos empleadas. El análisis de perfiles verticales de oxígeno disuelto a lo largo de las trayectorias de tres flotadores ARGO, representativos de las regiones norte, centro y sur frente a la costa peruana, revela una alta variabilidad espacio-temporal en la profundidad y el espesor de la ZMO. Esta variabilidad se intensifica especialmente durante eventos climáticos extremos, como El Niño Costero 2023–2024, lo que sugiere un fuerte control por parte de procesos dinámicos tanto locales como regionales.

## 1. Introducción

El océano Pacífico sudeste alberga uno de los cuatro Sistemas de Afloramiento de Bordes Orientales, conocido como el Sistema de Corrientes de Humboldt (SCH), considerado el más productivo de todos los océanos del mundo (Garçon et al., 2019). Sólo la parte norte del SCH, ubicada frente a las costas de Perú, produce aproximadamente el 10% de la captura mundial de peces (Chavez et al., 2008).

Además, esta zona se caracteriza por alojar una de las regiones con menor cantidad de oxígeno en el océano, conocida como Zona Mínima de Oxígeno (ZMO u OMZ, por sus siglas en inglés). Esta ZMO se mantiene por la combinación de una circulación oceánica lenta y del afloramiento costero, proceso que se extiende entre los 4°S y 40°S a lo largo de la costa sudamericana. Este afloramiento, impulsado por la acción del viento y la rotación de la Tierra (e.g., Manay et al., 2021), transporta verticalmente aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes hacia la superficie, generando una alta o moderada productividad en las capas superficiales. En el caso del Perú, esta productividad representó el 0.8 % del Producto Bruto Interno (PBI) en 2024, con un valor económico estimado de 4482 millones de soles (PRODUCE, 2024). Como consecuencia de esta alta productividad, se produce una elevada exportación de materia orgánica, cuya descomposición consume oxígeno disuelto y contribuye a la dinámica de la ZMO (Wyrki, 1962; Helly & Levin, 2004; Fuenzalida et al., 2009; Paulmier & Ruiz-Pino, 2009).

El oxígeno en el agua es esencial para la vida marina, al igual que lo es en el aire para los organismos terrestres. Diversas investigaciones científicas han evidenciado que las especies marinas requieren un mínimo de oxígeno disuelto para desarrollarse de forma óptima, y cuya escasez puede provocar alteraciones metabólicas y de comportamiento, e incluso ser letal (Breitburg et al., 2019; Pitcher et al., 2021; Roman et al., 2024).

Actualmente existe una problemática que diversos estudios han reportado. Esta consiste en una disminución significativa del oxígeno en las regiones oceánicas y costeras, la cual está asociada tanto al calentamiento global como al exceso de nutrientes en las áreas costeras debido a actividades antrópicas, tales como el ingreso de nutrientes a zonas costeras producto de los desechos y prácticas agrícolas inadecuadas (Breitburg et al., 2018). Todo ello está provocando la pérdida de hábitats marinos,

desencadenando procesos que contribuyen aún más al calentamiento global (e.g., Morée et al., 2023).

En este contexto, el presente avance de investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre las bases de datos climatológicas disponibles para el océano Pacífico sudeste, con el fin de estudiar la dinámica de la ZMO en esta región. Asimismo, identificar los flotadores tipo ARGO que cuentan con mediciones de oxígeno durante el periodo 2000 - 2024, y, a su vez, presentar un análisis preliminar para caracterizar la estructura vertical de la columna de agua en la región de estudio.

## 2. Metodología

Este estudio combina datos provenientes de productos grillados y observaciones in situ para analizar la distribución del oxígeno disuelto en el Pacífico sudeste, con énfasis en la identificación y caracterización de la ZMO frente a la costa peruana.

### Productos Grillados

- **CSIRO Atlas of Regional Seas (CARS):** Es un conjunto de datos climatológicos mensuales o atlas de las propiedades del océano (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nitrato, fosfato y silicato), el cual es construido en base a mediciones históricas disponibles del océano, principalmente de instrumentos de buques de investigación y boyas de perfilación autónomas. La versión empleada en este estudio tiene una resolución espacial de 0.5° x 0.5°, los campos de temperatura y salinidad se crearon con datos hasta julio de 2008 en base al WOD05 (Base de Datos Mundial de Océanos 2005) mientras que los nutrientes se generaron empleando WOD09, los archivos globales de ARGO (con corrección de presión superficial hasta mayo de 2009), el Programa Hidrográfico Global (WOCE, por sus siglas en inglés) y otros conjunto de datos disponibles hasta 2008. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: <https://catalogue-imos.aodn.org.au/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/d9302a48-57b1-41c2-a0dc-78bd00dd5e4b>
- **World Ocean Atlas 2009 (WOA09):** Es también un conjunto de datos climatológicos mensuales y estacionales del océano global, derivado de los datos históricos del océano obtenidos de diversas fuentes instrumentales (como CTD, DBT, XBT, entre

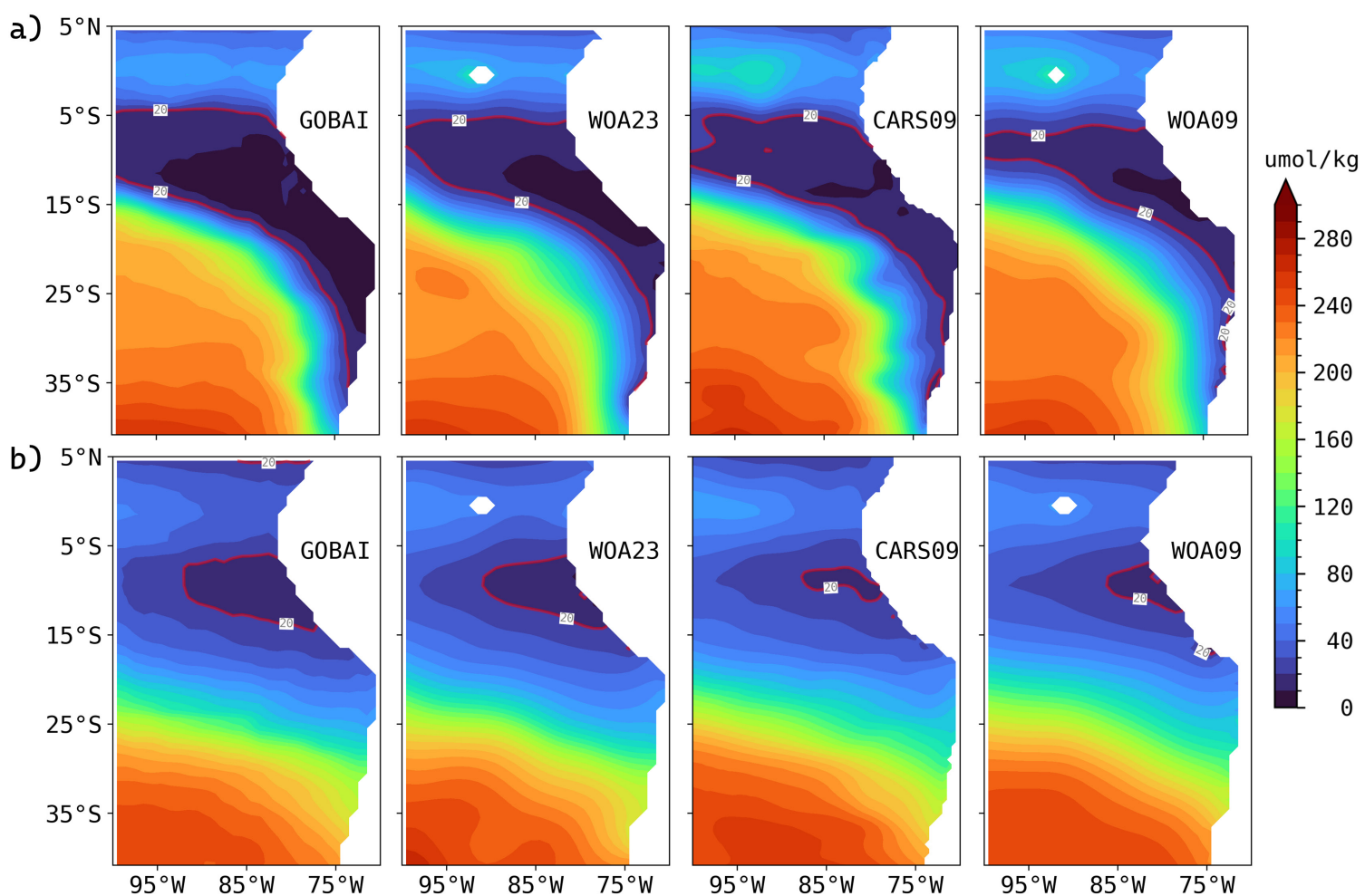
otros). Estos datos fueron recopilados a través de los proyectos GODAR (*Global Oceanographic Data Archaeology and Rescue*) y WOD (*World Ocean Database*), y están disponibles en los archivos del NODC (*National Oceanographic Data Center*) y WDC (*World Data Center*). La información cubre el periodo 1973 y 2008, con una resolución horizontal de 1° x 1°. Además, el WOA09 se basa en la base de datos global WOD09, que reúne registros instrumentales históricos hasta el 2008. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: [https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr\\_woa09.html](https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html)

- **World Ocean Atlas 2023 (WOA23):** Es la versión más actualizada del WOA, mejora la resolución y la calidad de las estimaciones al incluir observaciones recientes. WOA23 proporciona climatologías anuales, estacionales y mensuales con una resolución de 1° x 1° para todas las variables, calculadas a partir de datos recolectados desde 1965 hasta 2022. Además, ofrece una resolución de 0.25° x 0.25° para temperatura y salinidad. Estos datos provienen del WOD23 e incorporan observaciones del programa ARGO. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace:

<https://catalog.data.gov/dataset/world-ocean-atlas-2023>

- **Gridded Ocean Biogeochemistry from Artificial Intelligence (GOBAI):** Es un nuevo producto global mensual en 3D de oxígeno disuelto, generado mediante algoritmos de aprendizaje automático entrenados con datos in situ (cruceros en marco del proyecto GLODAP (*Global Ocean Data Analysis Project*) y flotadores ARGO). Se basa en campos de temperatura y salinidad, y ha sido validado con observaciones reales, modelos y comparado con el World Ocean Atlas (Sharp et al., 2023). Esta data cubre desde -179.5° a 179.5° de longitud y desde -64.5° a 79.5° de latitud, con resolución de 1°, 58 niveles de presión entre 2.5 y 1975 dbar, y un periodo mensual de enero 2004 a diciembre 2023. Para encontrar mayor información puede consultar el siguiente enlace: <https://www.pmel.noaa.gov/gobai/>

Para cada uno de estos productos, se extrajo la climatología anual del oxígeno disuelto a 200 y 700 metros de profundidad, con el fin de analizar la distribución espacial del oxígeno disuelto e identificar la isolínea de 20  $\mu\text{mol/kg}$ , la cual es comúnmente utilizada como el núcleo de la Zona Mínima de Oxígeno (Figura 1).



**Figura 1.** Climatología anual de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) a (a) 200 m y (b) 700 m de profundidad extraídos de los productos grillados GOBAI, WOA23, CARS09 y WOA09. La línea roja indica la isolínea de 20  $\mu\text{mol/kg}$ .

## b) Flotadores tipo ARGO

Los flotadores tipo ARGO, también conocidos como perfiladores oceanográficos, son equipos automáticos capaces de recolectar información desde la superficie hasta profundidades de 1000, 2000 o incluso 6000 metros. Estos dispositivos registran variables como temperatura, salinidad, presión y, dependiendo del modelo, oxígeno disuelto, entre otras variables biogeoquímicas. Los datos se obtienen dentro de lo que se denomina un ciclo que, en promedio, dura 10 días. Una vez en la superficie, el flotador determina su ubicación mediante el GPS para luego transmitir los datos a través del satélite. Posteriormente, desciende hasta alcanzar una profundidad de deriva de 1000 metros, donde permanece durante 8 a 10 días, para luego descender hasta los 2000 metros y, tras ello, ascender recolectando en todo su trayecto datos de conductividad, temperatura y presión (e.g., Morris et al., 2024).

Los datos se obtuvieron a través de la plataforma Argo Fleet Monitoring (<https://fleetmonitoring.euro-argo.eu/dashboard>; Figura 2). Inicialmente, se filtraron todos los flotadores ubicados en el océano Pacífico sudeste (92°O – 68°O / 0°S – 45°S).

Posteriormente, se aplicó un filtro adicional para seleccionar únicamente los flotadores que registran mediciones de oxígeno disuelto (Tabla 1).

De los 38 flotadores identificados con esta variable, se seleccionaron únicamente tres flotadores que fueron lanzados frente a la costa norte, centro y sur del Perú (cuyos códigos son 6902963, 6902961, 6902962, respectivamente; Figura 3). A lo largo de sus trayectorias, se analizaron los perfiles verticales de oxígeno disuelto. Se identificó, para cada fecha y perfil, la profundidad (en metros) correspondiente a la concentración de aproximadamente 20  $\mu\text{mol/kg}$ . A partir de las profundidades mínima y máxima que cumplían con este umbral, se estimó el espesor vertical de la ZMO. Además, usando los perfiles verticales de temperatura del mar, se extrajo la profundidad correspondiente a la isoterma de 15°C, como referencia para comparar con la ubicación vertical de la ZMO. El análisis y procesamiento de los datos climatológicos y de las observaciones in situ se realizaron utilizando los lenguajes de programación Python y R.

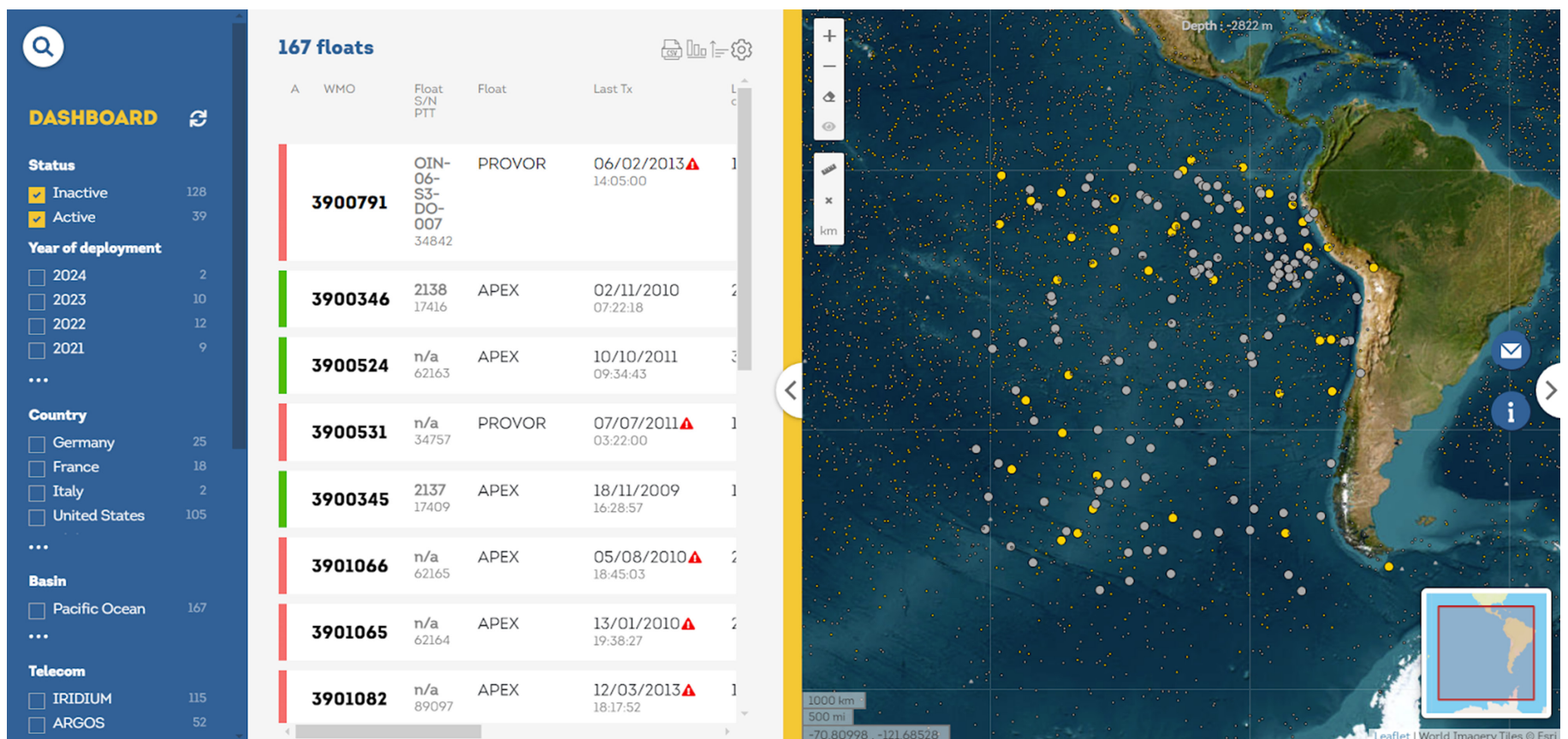


Figura 2. Plataforma Argo Fleet Monitoring. Los puntos representan los flotadores lanzados dentro de la región del Pacífico sudeste.

**Tabla 1.** Inventario de flotadores activos localizados en el océano Pacífico sudeste que registran mediciones de oxígeno disuelto, con datos disponibles hasta septiembre de 2024.

#FLOTADOR	ESTADO	PLATAFORMA	LANZAMIENTO	ÚLTIMO DATO	CICLO
1902501	Activo	NAVIS_EBR	13/05/2024	19/09/2024	14
1902644	Activo	NAVIS_EBR	18/12/2023	21/09/2024	28
2903858	Activo	NAVIS_EBR	10/12/2023	24/09/2024	29
3902556	Activo	NAVIS_EBR	9/12/2023	23/09/2024	29
6902959	Activo	PROVOR	28/01/2023	19/09/2024	66
6902962	Activo	PROVOR	20/10/2021	20/09/2024	117
5906308	Activo	NAVIS_EBR	30/10/2020	24/09/2024	140
5906306	Activo	NAVIS_EBR	29/10/2020	22/09/2024	140
5906305	Activo	NAVIS_EBR	26/10/2020	25/09/2024	144
6902961	Activo	PROVOR	23/09/2021	21/09/2024	177
6902963	Activo	PROVOR	25/09/2021	23/09/2024	206
3900714	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	29/10/2008	1
3900730	Inactivo	SOLO_W	28/11/2008	22/12/2008	8
3900716	Inactivo	SOLO_W	26/10/2008	25/12/2008	20
3900713	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	17/01/2009	28
6900531	Inactivo	APEX	12/03/2014	29/03/2016	77
6900868	Inactivo	APEX	02/04/2011	22/05/2013	79
6900528	Inactivo	APEX	11/03/2014	18/04/2016	79
6900527	Inactivo	APEX	11/03/2014	26/05/2016	83
6900530	Inactivo	APEX	12/03/2014	12/07/2016	88
6900532	Inactivo	APEX	13/03/2014	11/08/2016	91
6900529	Inactivo	APEX	11/03/2014	11/08/2016	91
6902960	Inactivo	PROVOR	28/04/2021	08/04/2023	107
6900869	Inactivo	APEX	02/04/2011	07/04/2014	111
6900872	Inactivo	APEX	02/04/2011	27/05/2014	116
6900875	Inactivo	APEX	10/04/2011	14/07/2014	120
6900874	Inactivo	APEX	02/04/2011	03/11/2014	132
3901078	Inactivo	APEX	03/02/2009	24/12/2012	143
3901075	Inactivo	APEX	02/02/2009	02/01/2013	144
6900891	Inactivo	APEX	10/04/2011	08/08/2015	159
6900870	Inactivo	APEX	02/04/2011	26/04/2016	186
6901461	Inactivo	PROVOR	19/02/2014	17/04/2019	189
3900348	Inactivo	APEX	10/11/2005	30/10/2009	189
5905106	Inactivo	APEX	22/09/2017	23/11/2022	190
5905105	Inactivo	APEX	26/09/2017	24/11/2021	230
3900347	Inactivo	APEX	09/11/2005	03/11/2010	237
3900715	Inactivo	SOLO_W	25/10/2008	08/04/2014	276
3900729	Inactivo	SOLO_W	17/11/2008	05/03/2015	302

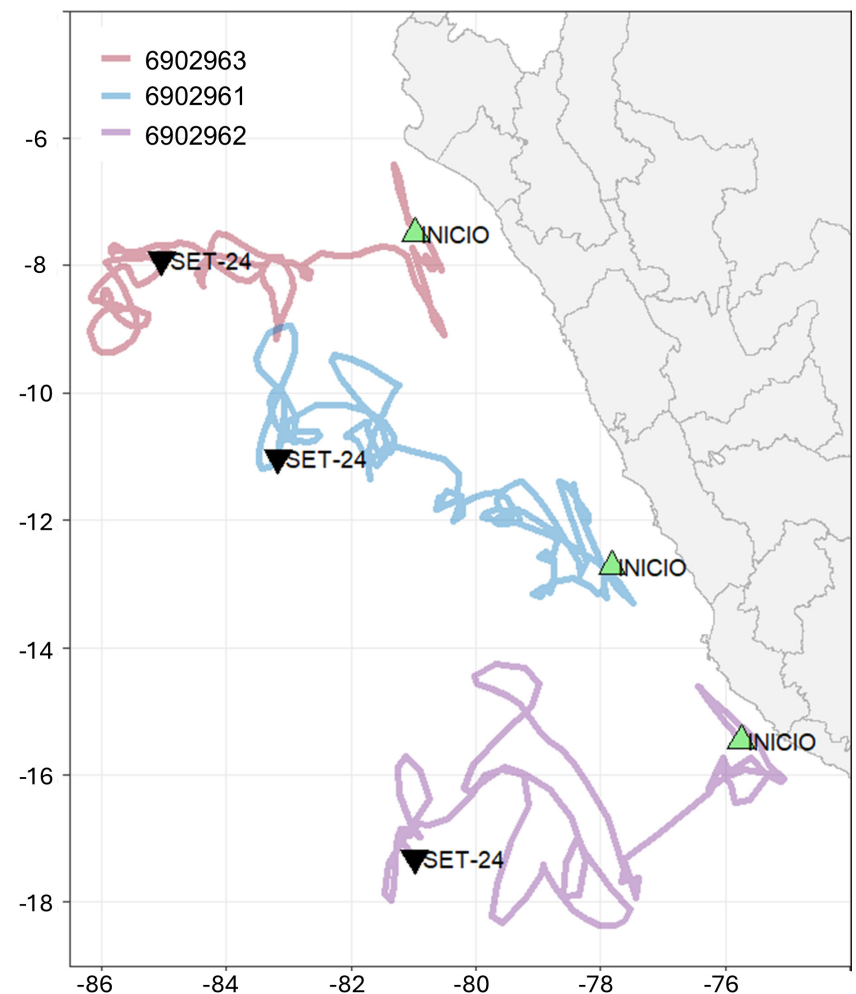
### 3. Resultados preliminares

La Figura 1 muestra la distribución espacial promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto en el Pacífico sudeste según las diferentes bases de datos utilizadas, donde claramente se puede identificar el núcleo de la ZMO ( $O_2 \leq 20 \mu\text{mol/kg}$ , la línea roja) vista como en forma de lengua que se proyecta mar adentro. Su límite norte está orientado zonalmente, mientras que su límite sur presenta una marcada orientación noroeste-sureste. Sin embargo, entre las bases de datos se muestran algunas diferencias destacables.

A los 200 m de profundidad, en la frontera oeste, alrededor de los  $97^\circ\text{O}$ , los límites norte y sur de la ZMO alcanzan el área comprendida entre los  $5^\circ$  y  $13^\circ\text{S}$  en GOBAL, envolviendo una zona moderada de baja concentración de  $O_2$ . En cambio, en WOA23 y CARS09, el núcleo de la ZMO ocupa un área ligeramente menor y rodea una zona de baja concentración de  $O_2$ , que es más extensa en WOA23 que en CARS09 (Figura 1). En el caso de WOA09, el área se limita a una franja mucho más estrecha, alcanzando aproximadamente entre los  $10^\circ$  y  $12^\circ\text{S}$  a los  $97^\circ\text{O}$ , también envolviendo una zona de baja concentración de  $O_2$  moderada. No obstante, todas las bases de datos coinciden en que el límite sur de la ZMO, frente a la costa sudamericana, alcanza los  $35^\circ\text{S}$ .

A los 700 m de profundidad, el núcleo de la ZMO se reduce considerablemente, restringiéndose únicamente frente a la costa peruana en todas las bases de datos. En este nivel, GOBAL y WOA23 muestran una mayor extensión del área, seguida por WOA09, siendo considerablemente menor que CARS09.

La Figura 3 muestra las trayectorias espaciales de los tres flotadores ARGO seleccionados para esta investigación, lanzados frente a la costa norte (6902963), centro (6902961) y sur (6902962) del Perú entre setiembre y octubre de 2021. Las trayectorias de los flotadores 6902961 y 6902963 describen recorridos predominantemente hacia el noroeste, evidenciando ser principalmente impulsados por las corrientes oceánicas. En contraste, el flotador 6902962 parece estar influenciado por la actividad de mesoescala.



**Figura 3.** Mapa que muestra las trayectorias de los tres flotadores seleccionados (en colores) para este estudio, los cuales forman parte del proyecto SEPICAF fase 1 (Montes et al., 2024). El triángulo verde señala la posición de lanzamiento frente a la costa peruana (entre setiembre y octubre de 2021), mientras que el triángulo negro indica el corte temporal, es decir, su posición final, del análisis (setiembre de 2024).

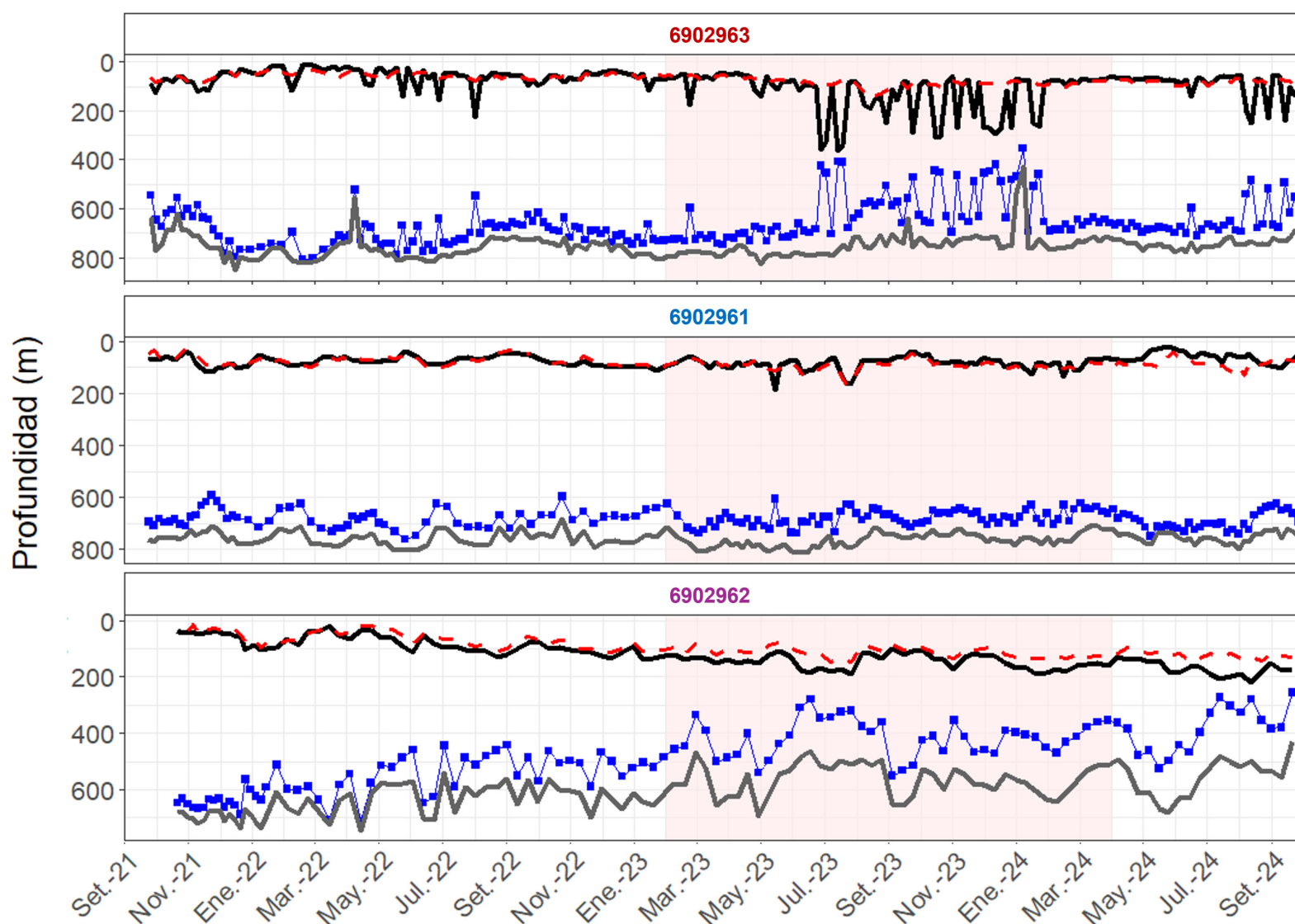
Por otro lado, el análisis de la distribución vertical a lo largo de cada trayectoria (Figura 4) muestra que los límites superior (línea negra) e inferior (línea gris) del núcleo de la ZMO tiene una marcada variabilidad espacio-temporal a lo largo de la columna de agua. Esta dinámica es especialmente pronunciada en el flotador 6902963, desplegado en el norte, y en el flotador 6902962, ubicado en la región sur frente a Perú. Ambos registraron una alta variabilidad vertical en los límites de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO), en contraste con el comportamiento más estable observado en el flotador central (6902961).

En el caso del flotador 6902963, el límite superior de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO) presenta una alta variabilidad, mostrando una profundización significativa entre julio de 2023 y enero de 2024. Este descenso es particularmente notorio hacia los  $84^\circ\text{O}$  (Figura 5), donde se alcanzan profundidades cercanas a los 400m (Figura 4).

El contraste de este comportamiento con el de la isoterma de 15°C, indica que la dinámica de la ZMO no está determinada exclusivamente por la temperatura en esa región. Esta discrepancia se debe a que la formación, mantenimiento, ventilación y variabilidad espacio-temporal de la ZMO están regulados por un complejo balance entre procesos físicos y biogeoquímicos (Paulmier et al., 2006; Breitburg et al., 2018). Entre los procesos físicos, la advección por corrientes subsuperficiales ecuatoriales (Corriente Ecuatorial Subsuperficial-EUC, Contracorriente Subsuperficial Sur Primaria-pSSCC y la Contracorriente Subsuperficial Sur Secundaria-sSSCC) desempeña un rol crucial. Mediante simulaciones numéricas, Montes et al. (2014) demostraron que, en términos absolutos, los cambios en el oxígeno asociados a estas advecciones dominan la dinámica de la ZMO en el océano abierto, superando en un orden de magnitud los efectos de los procesos biogeoquímicos. Además, Pizarro-Koch et al. (2019) mostraron que la actividad de mesoescala también modula el contenido de oxígeno en la ZMO a través de flujos inducidos por remolinos y jets zonales alternantes, especialmente en su límite sur. Esta

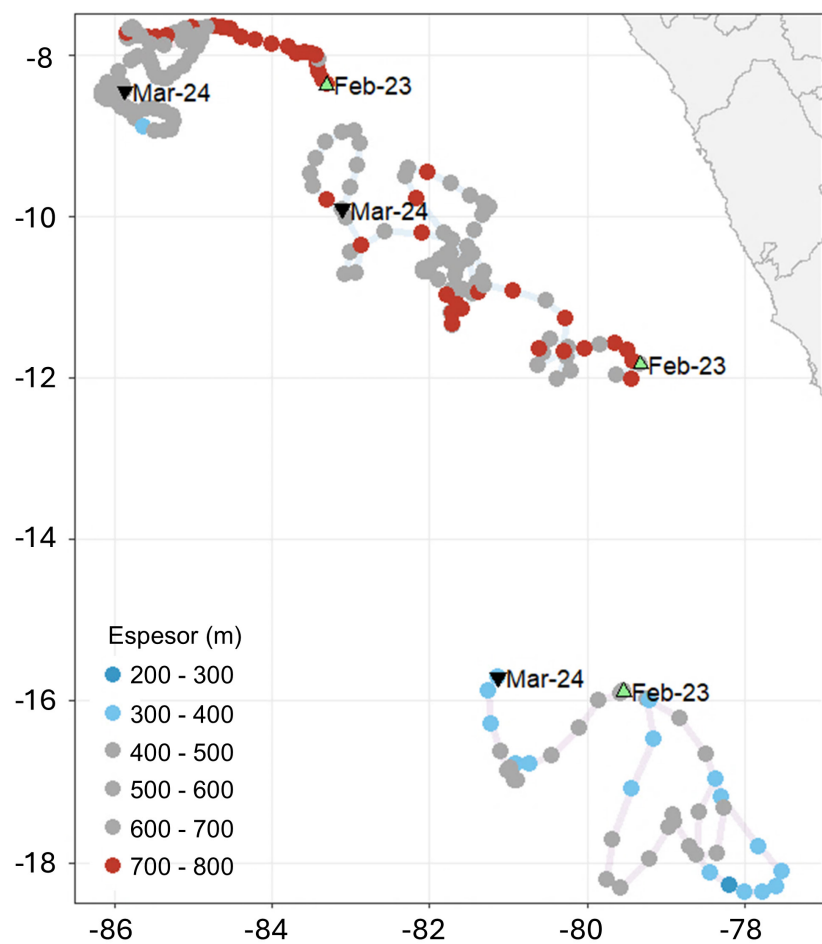
modulación refuerza la importancia de los mecanismos físicos en la dinámica estacional y espacial de la ZMO, mientras que los procesos biogeoquímicos y la mezcla vertical estarían jugando un rol secundario en su variabilidad a escala estacional.

Paralelamente, el límite inferior del flotador 6902963 mostró una ligera, pero sostenida tendencia hacia la superficialización, más evidente durante el periodo cálido, con profundidades promedio cercanas a los 700 m. De forma similar, el flotador de la zona sur (6902962) presentó una superficialización más pronunciada del límite inferior, alcanzando profundidades de hasta 500 m. En conjunto, estos cambios reflejan una contracción vertical de la ZMO, cuyo espesor se redujo de aproximadamente 500 m a 300 m de forma intermitente entre julio de 2023 y enero de 2024. Estos resultados ponen en evidencia la alta sensibilidad de la ZMO frente a las anomalías oceanográficas asociadas a eventos climáticos extremos como El Niño, y subrayan la influencia moduladora de factores locales, como la topografía, la circulación regional y la interacción con estructuras de mesoescala.



**Figura 4.** Serie temporal del límite superior (línea negra), límite inferior (línea gris), espesor de la ZMO (línea con cuadrados azules) y profundidad de la isoterma de 15°C (línea discontinua roja) para los tres flotadores seleccionados. El área sombreada en rojo corresponde al periodo del evento El Niño costero (febrero de 2023 a marzo de 2024).

Durante el periodo comprendido entre febrero 2023 y marzo 2024, se desarrolló un evento El Niño, clasificado como El Niño Costero de magnitud fuerte por el ENFEN (2024), el cual produjo alteraciones significativas en las condiciones océano-atmosféricas de la región. Entre las variables afectadas se encuentra la concentración de oxígeno disuelto, cuya distribución vertical experimentó cambios notables debido a la intensificación de la estratificación térmica y al calentamiento superficial del mar, fenómenos típicos de la dinámica asociada a eventos El Niño.



**Figura 5.** Mapa mostrando las trayectorias de los tres flotadores seleccionados durante el periodo del evento El Niño costero (febrero de 2023 - marzo de 2024). Cada punto representa una medición individual. Los colores azul y celeste indican un espesor de la ZMO menor a 400 m, mientras que los puntos rojos representan espesores superiores a 700 m.

Estos impactos se reflejan en la evolución tridimensional de la ZMO: en los flotadores ubicados en el norte y centro (6902963 y 6902961), se observó un incremento en la amplitud vertical de la ZMO, que superó los 700 m durante el periodo analizado (Figura 5). Esta expansión estaría relacionada con la disminución de la ventilación vertical y el debilitamiento del aporte de aguas subsuperficiales ricas en oxígeno. Por el contrario, el flotador 6902962, ubicado frente al sur del Perú, mostró un comportamiento opuesto, con una contracción de la ZMO que no superó los 300 m de espesor.

Esta diferencia sugiere la influencia de procesos de mesoescala, así como la dinámica regional modulada por el anticiclón del Pacífico Sur, los cuales habrían favorecido una mayor ventilación en esta zona durante el desarrollo del evento.

## 4. Conclusiones y perspectivas

Resulta importante destacar que los datos analizados constituyen una fuente valiosa de información observacional sobre las condiciones físico-químicas del océano, fundamentales tanto para la investigación científica como para el monitoreo operativo. En particular, las bases de datos climatológicas grilladas se utilizan principalmente como forzantes de modelos físico-biogeoquímicos regionales (e.g., Montes et al., 2014) y para la generación de anomalías. Por su parte los flotadores ARGO representan una herramienta clave para el monitoreo casi en tiempo real (e.g., <http://met.igp.gob.pe/variabclim/argo.html>, Rivera & Mosquera, 2019), la validación de modelos regionales, su asimilación en modelos globales, y como fuente para la construcción de las propias bases grilladas.

Para nuestra región de estudio, definida como un Sistema de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés), se evidencian discrepancias importantes entre las bases de datos climatológicas empleadas (GOBAI, WOA23, CARS09, WOA09), tanto en la extensión horizontal como en la ubicación y configuración del núcleo de la ZMO. Estas diferencias podrían atribuirse a las limitaciones inherentes de cada base de datos, como la resolución espacial, la frecuencia de muestreo y los métodos de interpolación utilizados. No obstante, reflejan principalmente la baja densidad de datos disponibles en la región del presente estudio. En este contexto, el uso de flotadores ARGO surge como una herramienta alternativa clave para suplir el vacío de las observaciones y proporcionar una resolución espacio-temporal adecuada para el estudio detallado de procesos oceanográficos y biogeoquímicos del Pacífico sudeste.

## Referencias

- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., Telszewski, M., Yasuhara, M., & Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371). <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>
- Breitburg, D. -, Baumann, H., Sokolova, I. M., & Frieder, C. A. (2019). Multiple stressors—forces that combine to worsen deoxygenation and its effects. En Laffoley, D. & Baxter, J.M. (Eds.). *Ocean Deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.13.en>
- Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 95-105.
- ENFEN. (2024) Definición operacional de los eventos El Niño costero y La Niña costera en el Perú. [Nota Técnica N° 01, 7p]. Comité Técnico del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-el-peru/?wpdmdl=1905&ind=1733921744133>
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garces, J., Bravo, L. & Lange, C. (2009). Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean, *Deep-Sea Research. Part II, Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 992–1003, <https://doi:10.1016/j.dsr2.2008.11.001>
- Garçon, V., Dewitte, B., Montes, I., & Goubanova, K. (2019). Land-Sea-Atmosphere interactions exacerbating ocean deoxygenation in Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS). En Laffoley, D. & Baxter, J.M. (Eds.). *Ocean Deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions* (pp. 171-186). IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.13.en>
- Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research. Part I, Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.009>
- Manay, R., Montes, I., Campos, F. y, Segura, B. (2021). El afloramiento costero en el sistema de corrientes de Humboldt frente a Perú. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 8(4), 16-21. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5333>
- Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., & Garçon, V. (2014). High-resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 5515-5532. <https://doi.org/10.1002/2014JC009858>
- Montes, I., Mosquera, K. & Dewitte, B. (2024). South Eastern Pacific Circulation from ARGO floats (SEPICAF): estado actual y perspectivas. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 11(4), 11-16. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5635>
- Morée, A. L., Clarke, T. M., Cheung, W. W. L., & Frölicher, T. L. (2023). Impact of deoxygenation and warming on global marine species in the 21st century. *Biogeosciences*, 20(12), 2425-2454. <https://doi.org/10.5194/bg-20-2425-2023>
- Morris, T., Scanderbeg, M., West-Mack, D., Gourcuff, C., Poffa, N., Bhaskar, T. V. S. U., Hanstein, C., Diggs, S., Talley, L., Turpin, V., & Liu, Z. (2024). Best practices for Core Argo floats - part 1: getting started and data considerations. *Frontiers in Marine Science*, 11. 1358042. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1358042>
- Ministerio de la Producción. (2024). PBI del sector Pesca creció 24.9% durante el 2024 por el impulso de la anchoveta. *Gob.pe - Plataforma Digital Única del Estado Peruano*. <https://www.gob.pe/institucion/produce/noticias/1100218-produce-pbi-del-sector-pesca-crecio-24-9-durante-el-2024-por-el-impulso-de-la-anchoveta>
- Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80(3-4), 113–128. <https://doi: 10.1029/j.pocean.2008.08.001>
- Pitcher, G. C., Aguirre-Velarde, A., Breitburg, D., Cardich, J., Carstensen, J., Conley, D. J., Dewitte, B., Engel, A., Espinoza-Morriberón, D., Flores, G., Garçon, V., Graco, M., Grégoire, M., Gutiérrez, D., Hernandez-Ayon, J. M., Huang, H. M., Isensee, K., Jacinto, M. E., Levin, L., Lorenzo, A., Machu, E., Merma, L., Montes, I., SWA, N., Paulmier, A., Roman, M., Rose, K., Hood, R., Rabalais, N., Salvanes, A.; Salvattecí, R., Sánchez, S., Sifeddine, A., Tall, A., Plas, A., Yasuhara, M, Zhang, & Zhu, Z. (2021). System controls of coastal and open ocean oxygen depletion. *Progress in Oceanography*, 197, 102613. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102613>

Pizarro-Koch, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Montes, I., Ramos, M., Paulmier, A., & Garçon, V. (2019). Seasonal variability of the southern tip of the Oxygen Minimum Zone in the eastern South Pacific (30-38 S): A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 8574-8604.

Rivera, G. & Mosquera, K. (2019). Disponibilidad de flotadores ARGO para el monitoreo oceánico continuo frente a la costa sudamericana. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 6 (7), 9-12.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/4707>

Roman, M. R., Altieri, A. H., Breitbart, D., Ferrer, E. M., Gallo, N. D., Ito, S. I., Limburg, K., Rose, K., Yasuhara, M., & Levin, L. A. (2024). Reviews and syntheses: Biological indicators of low-oxygen stress in marine water-breathing animals. *Biogeosciences*, 21(22), 4975-5004.  
<https://doi.org/10.5194/bg-21-4975-2024>

Sharp, J. D., Fassbender, A. J., Carter, B. R., Johnson, G. C., Schultz, C., & Dunne, J. P. (2023). GOBAI-O<sub>2</sub>: temporally and spatially resolved fields of ocean interior dissolved oxygen over nearly 2 decades. *Earth System Science Data*, 15(10), 4481-4518.  
<https://doi.org/10.5194/essd-15-4481-2023>

Wyrtki, K. (1962). The oxygen minima in relation to ocean circulation, *Deep-Sea Research Oceanographic Abstracts*, 9(1), 11-23.  
[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(62\)90243-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(62)90243-7)