OBSERVATORIO AMBIENTAL DEL AFLORAMIENTO COSTERO FRENTE A CALLAO E IMPACTO DE EL NIÑO 2023

ENVIRONMENTAL OBSERVATORY OF THE COASTAL UPWELLING OFF CALLAO AND IMPACT OF EL NIÑO 2023

Michelle Graco[1,], Tony Anculle[1], Víctor Aramayo[1], Avy Bernales[1], Wilson Carhuapoma[1], David Correa[2], Kevin Díaz[1], Maria del Carmen Igarza[1], Jesús Ledesma[1], Úrsula Neira[1], David Point[3], Luis Quipúzcoa[1], Miguel Sarmiento[1], Iván Romero[1], Federico Velazco,[1], Bobby Leigh[4], Salma García[5], María Cholán[6]*

RESUMEN

Graco, M., Anculle, T., Aramayo, V., Bernales, A., Carhuapoma, W., Correa, D., et al. (2025). *Observatorio ambiental del afloramiento costero frente a Callao e impacto de El Niño 2023. Inf Inst Mar Perú, 52(4), 421-442.-* En el año 2023, las condiciones oceanográficas frente a Perú fueron influenciadas por El Niño Costero, al haberse alterado el acoplamiento océano-atmósfera, modificando las condiciones biogeoquímicas en la columna de agua, el bentos y las comunidades asociadas. Se emplearon dos enfoques para analizar el afloramiento costero: indicadores satelitales (vientos, índice de afloramiento, frentes térmicos y productivos) y observaciones *in situ* en un observatorio ambiental frente al Callao. Durante el verano, los vientos débiles asociados al evento Yaku y al inicio de El Niño redujeron la actividad del afloramiento. A partir del otoño, los vientos se intensificaron, lo que activó el afloramiento con valores por encima de los promedios históricos desde el invierno con valores por encima de 100 m^3/s x 100 m, desde Callao hasta San Juan de Marcona. El frente térmico (FT) permaneció cercano a la costa la mayor parte del año, excepto en el último trimestre. Esto está asociado con el impacto de El Niño Costero 2023 y el arribo de ondas cálidas a partir de marzo que favorecieron un frente cercano mientras en agosto y hacia el último trimestre, el arribo principalmente de Ondas Kelvin Frías sumado al afloramiento favoreció que se aleje. El frente productivo también estuvo pegado a la costa hasta la primavera, expandiéndose en noviembre y diciembre con aumento en los niveles de clorofila-*a*. El observatorio ambiental frente al Callao mostró que las condiciones de temperatura, salinidad, oxigenación y nutrientes favorecieron cambios en las comunidades planctónicas y bentónicas. El fitoplancton estuvo dominado por nanoplancton y dinoflagelados en la primera mitad del año, mientras que las diatomeas aumentaron en invierno y primavera. Además, las aguas con mayor pH y menor CO_2 favorecieron la presencia de cocolitofóridos, típicos de eventos de El Niño. El bentos presentó biomasas reducidas, pero mayor abundancia de especies adaptadas a niveles más altos de oxigenación. El acoplamiento bento-pelágico fue menor que en El Niño 2017, reflejando menor productividad y un posible menor aporte terrígeno. En conjunto, los resultados destacan el impacto de El Niño Costero 2023 sobre los procesos físicos, químicos y biológicos en el ecosistema marino peruano.

Palabras clave: nutrientes, productividad, plancton, bentos, afloramiento, observatorio, Callao, Perú

ABSTRACT

Graco, M., Anculle, T., Aramayo, V., Bernales, A., Carhuapoma, W., Correa, D., et al. (2025). *Environmental observatory of the coastal upwelling off Callao and impact of El Niño 2023. Inf Inst Mar Perú, 52(4), 421-442.-* In 2023, the oceanographic conditions off the coast of Peru were significantly influenced by the Coastal El Niño event. This event disrupted the coupling between the ocean-atmosphere as well as the winds and coastal upwelling. These changes altered the biogeochemical conditions in the water column, the sediment, and the associated communities. Two approaches were employed: satellite indicators (winds, upwelling index, and thermal and productive fronts) and *in situ* observations at an environmental observatory off the coast of Callao. During the summer, weak winds associated with the Yaku event and the onset of El Niño reduced upwelling activity. From autumn onward, winds intensified, activating upwelling with values above historical averages from winter, exceeding 100 m^3/s per 100 m from Callao to San Juan de Marcona. The thermal front (TF) remained close to the coast throughout most of the year, except during the final quarter. This behavior reflected the influence of the 2023 CEN and the arrival of warm Kelvin waves beginning in March, which maintained a nearshore front. In contrast, the subsequent arrival of

[1] Instituto del Mar del Perú (Imarpe), Dirección General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático
[2] Imarpe, Laboratorio Costero Sana Rosa
[3] Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse, France
[4] Universidad Científica del Sur, Panamericana sur, km 19, Lima, Perú
[5] Estudiante independiente, Imarpe
[6] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, P. O. 15 BOX 1898, Lima, Perú
* Correspondencia: mgraco@imarpe.gob.pe

cold Kelvin waves and intensified upwelling from August onward displaced the front offshore. The productive front followed a similar trend, remaining near the coast until spring and expanding offshore in November and December, coinciding with an increase in chlorophyll-*a* concentrations. Observations from the Callao environmental observatory revealed that variations in temperature, salinity, oxygen, and nutrient concentrations drove substantial shifts in planktonic and benthic communities. Phytoplankton composition during the first half of the year was dominated by nanoplankton and dinoflagellates, while diatoms became more abundant during winter and spring. Elevated pH and reduced CO_2 concentrations favored the occurrence of coccolithophores, characteristic of El Niño conditions. The benthic community showed reduced biomass but a greater abundance of species adapted to higher oxygenation levels. The benthic-pelagic coupling was weaker than in the 2017 El Niño, reflecting lower productivity and a possible reduction in terrigenous inputs. Overall, the findings highlight the impact of the 2023 Coastal El Niño on the physical, chemical, and biological processes in the Peruvian marine ecosystem.
Keywords: nutrients, productivity, plankton, benthos, upwelling, observatory, Callao, Peru

1. INTRODUCCIÓN

Estudiar sistemas productivos y altamente variables, representa un desafío, especialmente para comprender su productividad y los cambios biogeoquímicos que influyen en los organismos y recursos de interés. En el caso del afloramiento costero frente a Perú, este se encuentra fuertemente influenciado por la dinámica ecuatorial y por eventos como El Niño y La Niña, que modifican sustancialmente sus características y, con ello, las condiciones ambientales.

En la región frente a Perú, se reconoce la influencia del afloramiento costero, un proceso físico que ocurre a lo largo de la costa entre 4° y 16°S (Zuta & Guillén, 1970, 1983; Rojas de Mendiola & Gómez, 1981). En la zona central, existe gran potencial para la productividad, asociado a un conjunto de condiciones como vientos favorables, plataforma continental ancha y nutriclina somera, que determinan la disponibilidad de los nutrientes necesarios para el desarrollo de los productores primarios (Calienes *et al*., 1985; Echevin *et al*., 2008). Además, estas características favorecen la presencia de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) que es una de las más extensas, someras e intensas de Perú, reconocida en los últimos años como una fuente de CO_2 y un área con algunas de las condiciones más bajas de pH (Friederich *et al*., 2008; Chávez & Messié, 2009; Ledesma *et al*., 2011; León *et al*., 2011).

La productividad y la biogeoquímica del ecosistema peruano son complejas y altamente variables, especialmente ante la ocurrencia de eventos como El Niño, que varían en tipo e intensidad, afectando procesos y comunidades. Estos eventos han sido documentados a través de investigaciones realizadas en el marco del PPR 137 y la actividad Estudio Integrado del Afloramiento Costero frente a Perú desde 2013 (Graco *et al*., 2016, 2017, 2019, 2021) y han permitido comprender entre otros aspectos el gradiente fisicoquímico que existe desde la costa hacia el océano y cómo este modifica las comunidades planctónicas y bentónicas y la exportación de carbono (Sánchez *et al*., 2021; Gutiérrez *et al*., 2008; Aramayo *et al*., 2021).

Además, desde el 2022, con el objetivo de conocer los procesos del afloramiento costero y su variabilidad climática con mayor resolución temporal, a través del proyecto concurrente Contrato 045-2021 de Prociencia, se implementó un observatorio marino-costero de bajo costo frente al Callao (12°S). Este observatorio, representativo de la zona central, genera información a alta resolución temporal sobre variables fundamentales para los organismos y recursos como son temperatura, oxígeno disuelto, pH, nutrientes, clorofila-*a* y variables biológicas. Además, se ha implementado el desarrollo de sensores específicos para la detección de sulfuros, que generan plumas o aguajes en condiciones de bajo oxígeno y alta carga de materia orgánica a través de tecnología de bajo costo y limpia. Finalmente, el observatorio contribuye con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 14 con el reporte del indicador de acidez del mar, ODS 14.3.1 a UNESCO.

En el presente documento presentamos los resultados del 2023, que permitieron captar la señal del evento El Niño Costero 2023 (ENFEN, 2023a) en la costa central de Perú.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Observatorio Marino Costero Callao (12°S). En la Figura 1 se muestra el área de estudio del observatorio ambiental frente a Callao (12°S), que involucra la estación 0 (E0) y los anclajes con sensores de alta resolución. La zona de estudio está comprendida entre 4°S - 18°S y 84°W-70°W, para incluir los principales núcleos de afloramiento frente a la costa peruana (Morón, 2000). Se seleccionaron además dos franjas latitudinales dentro de esta zona, la primera entre los 4°S - 13°S y la segunda entre 13°S - 18°S. Se seleccionó la latitud 13°S como divisoria entre las dos áreas, ya que define el límite sur de la parte central del sistema de afloramiento peruano (Penven *et al*., 2005).

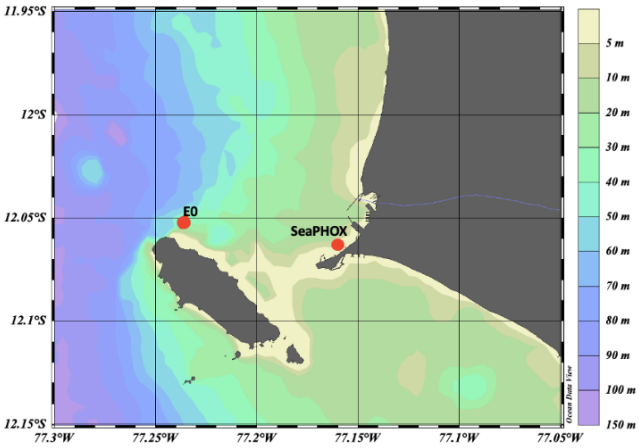


Figura 1.- Carta de ubicación de las estaciones de muestreo y anclajes frente a Callao registrando información. 2023

Vientos, afloramiento y productividad

A escala de todo Perú, a través de información satelital, se obtuvo información de vientos, índices de afloramiento y productividad que permitieron caracterizar las condiciones frente a Perú para el año 2023. Los vientos satelitales, para el periodo 1 de enero - 20 de mayo 2023 fueron obtenidos a través del dispersómetro satelital ASCAT (IFREMER, 2023) y para el periodo 21 de mayo - 31 de diciembre 2023, del Modelo *Global Forecast System* (NOAA, 2023). Los vientos de ASCAT fueron registrados del programa de satélites Meteorológicos Operativos (MetOp) accesibles a través de IFREMER. Los vientos del Modelo GFS, fueron generados por modelo numérico de predicción meteorológica creado y utilizado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos de Norteamérica.

La velocidad y dirección del viento ASCAT es equivalente a vientos sobre 10 metros del nivel del mar, a una resolución espacial de 0,25° (aproximadamente 27,5 km) en longitud y latitud. Las metodologías, algoritmos de cálculo de los componentes zonal y meridional del viento satelital, se pueden revisar en Bentamy *et al*. (2002) y Bentamy y Croizé-Fillon (2012). La velocidad y dirección del viento del modelo GFS, corresponde a vientos con resolución espacial de 0,5° (aproximadamente 55 km) en longitud y latitud, con un horizonte de pronóstico de siete días, cada tres horas (NOAA, 2023). A partir del viento satelital ASCAT y del modelo GFS, se crearon diagramas de Hovmöller de la velocidad y anomalía del viento y de la dirección del viento. Por otro lado, se extrajo información en secciones transversales a la costa hasta las 50 millas náuticas frente a Callao. Esta información permitió realizar el seguimiento del Afloramiento Costero Peruano (ACP) a través de indicadores. La velocidad del viento, anomalía y persistencia del viento favorable al afloramiento costero permite estimar el Transporte y Bombeo de Ekman que es una medida de actividad del afloramiento o surgencia costera. Series de tiempo de Transporte y bombeo Ekman fueron calculadas sobre el área de Afloramiento Peruano, establecido de 5° a 16°S y dentro de los 200 km de la costa. La descripción del viento se realizó sobre la escala categórica del viento de acuerdo a la propuesta de Correa *et al.* (2018).

Además, se ha trabajado la estimación del frente térmico considerando el máximo gradiente de la temperatura costa océano, el mismo que ha sido identificado a partir de datos de TSM satelital, grillados a 1 km de resolución y de nivel 4 (*Multiscale UltraHigh Resolution* MUR, JPL-NASA).

La productividad consideró la información de datos de clorofila- *a*, que se obtuvieron de información satelital Modis-AQUA, VIIRS-SNPP, y sus anomalías a partir de la climatología: 1998-2016 Modis-AQUA, VIIRS-SNPP, *Sea Wifs*, *Meris-envisat* (fuente: *Ocean color*/NASA). Esta información permitió el cálculo del frente productivo considerado como la distancia de la isolínea de 1 µg/L de clorofila-*a*, separando las áreas más productivas de las menos productivas.

Condiciones oceanográficas, físico-químicas

En el observatorio se instaló un arreglo equipado con un perfilador de conductividad, temperatura, presión y oxígeno disuelto (CTDO) provisto de un Sensor de pH. A su vez en el punto fijo, periódicamente se colectaron muestras de agua para determinar el oxígeno disuelto mediante el método de Winkler (Carrit & Carpenter, 1966) de pH con un potenciómetro Metler Toledo y a través de la metodología espectrofotométrica (protocolo REMARCO). Posteriormente, en el laboratorio se analizaron los nutrientes y la clorofila-*a* a partir de los protocolos del Área Funcional de Investigación en Oceanografía Química y Geología (AFIOQG-Imarpe). Se desarrollaron, implementaron e instalaron sensores de difusión pasivo (DGT) para pre concentrar sulfuro de hidrógeno en agua de mar mediante geles selectivos desarrollado por el AFIOQG, lo que constituye un desarrollo tecnológico presentado mediante el expediente 2024-0076 como solicitud de patente a Indecopi.

Entre febrero y diciembre 2023, se implementó un muestreo quincenal, y posteriormente mensual, de carbono orgánico disuelto (COD). El COD representa el mayor pool de carbono orgánico activo del océano, superando por varios órdenes de magnitud al material presente en forma particulada (Hansell *et al*., 2009). La principal fuente de producción de COD en el océano es el fitoplancton, siendo los principales consumidores las bacterias que forman parte del anillo microbiano (Carlson & Hansell, 2014). La colecta de muestras fue realizada directo de la botella Niskin con botellas de Nalgeno de 500 mL de capacidad previamente lavadas con una solución de agua ultra pura acidificada (pH2). Posteriormente en el laboratorio, las muestras fueron filtradas a través de un filtro con poro de 0,2 µm y de membrana PES usando una jeringa estéril de 30 mL de capacidad sin tope de goma. Finalmente, las muestras fueron acidificadas con ácido clorhídrico al 32% y guardadas en refrigeración. Los análisis de COD fueron realizados en Francia en el Instituto Mediterráneo de Oceanografía en Marsella mediante un analizador elemental de carbono orgánico total.

Plancton

En la E0 las muestras superficiales de fitoplancton se obtuvieron con red standard (75 µm) efectuando arrastres superficiales en círculos durante 5 minutos, las muestras de columna de agua se consiguieron con botella Niskin. Para determinar las densidades celulares en cel.L^{-1} se aplicó el método Utermöhl utilizando un microscopio invertido de luz (Karlson *et al*., 2010). Para la determinación taxonómica se consultaron los trabajos de Balech (1988) y Hasle y Syvertsen (1996). Muestreos superficiales para indicadores de zooplancton y análisis de ictioplancton, se realizaron a partir de junio 2023 utilizando una red WP2 (300 µ).

Bentos y geología

En la E0 (aproximadamente a 37 m de profundidad) durante el segundo semestre (julio, agosto, septiembre y noviembre) se realizaron los estudios del componente bentónico utilizando una draga van Veen de 0,05 m^{-2} de área de cobertura; mientras que a 34 m de profundidad se obtuvo el sedimento superficial (0-2 cm) en tres y cuatro réplicas, en secciones finas (0-0,5; 0,5-1; 1-1,5; 1,5-2 cm) a partir de dragados independientes. El criterio de muestreo se basó en la inspección *in situ* de la capa más superficial del sedimento colectado con draga. Las muestras de macrofauna y *Candidatus Marithioploca* spp. se tamizaron con malla de 0,5 mm y se fijaron con formalina al 10% para su posterior análisis. Para el procesamiento de las muestras para meiofauna se siguió a Aramayo (2018 a, b). Las densidades fueron expresadas en individuos por 10 cm^2 (Ind 10 cm^{-2}). Se realizó una identificación taxonómica hasta el menor nivel taxonómico posible, empleando estereoscopio (separación, cuantificación) y microscopio (definición de caracteres taxonómicos específicos). Para nemátodos de vida libre, se consultó los trabajos de Platt y Warwick (1998); para determinadas familias como Chromadoridae, Desmodoridae, Comesomatidae, Oxystominidae, Selachinematidae se consultó a Hope y Murphy (1972), Gerlach y Riemann (1973) y Hodda (2022).

Se fijó una trampa de sedimento mecánica (arreglo oceanográfico) a 32 m de profundidad, formada por dos tubos colectores de PVC en una estructura giratoria de acero, en cuya base se acoplaron dos botellas de polietileno de 150 mL (muestra 1 – réplica 1'). La trampa se fijó a un cable de acero (1/4"

pulgadas) sustentada por un conjunto de cinco boyas de flotación de 28 cm de diámetro (10 m de profundidad). El arreglo fue fijado con un lastre de concreto armado de 250 kg y contaba con una boya de marcación superficial. Previo a la instalación del arreglo, se colectó agua de mar al nivel de la trampa (32 m de profundidad) para la preparación de la solución preservante de formaldehído al 5% tamponado con tetraborato de sodio a pH8 con el agua de mar filtrada (filtro de acetato de celulosa 0,2 µm). El periodo de colecta se detalla en la Tabla 1. El tratamiento de las muestras para la determinación del flujo de masa total (FMT) y el flujo de pellets (FP) fue acorde a Leigh *et al*. (2023) y Mendoza *et al*. (2022).

3. RESULTADOS

Vientos, afloramiento y productividad durante 2023

Vientos e índices de afloramiento. De enero a marzo 2023, en la franja correspondiente a las 50 mn (aprox. 110 km) a lo largo de la costa peruana predominaron vientos de dirección sursureste de magnitud débil, con anomalías de viento en el rango negativo, indicando intensidades por debajo del umbral histórico para esta época del año (Fig. 2). Desde mediados de abril a mediados de diciembre, los vientos recuperaron su intensidad, observándose vientos moderados (4,1 – 6,8 m/s) a fuertes (> 6,8 m/s), con anomalías de viento en el rango positivo. Esta condición con importantes anomalías positivas (> 3 m/s) se dio principalmente al sur de 12°S entre Callao y San Juan de Marcona, lo cual se asoció al reforzamiento de la intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur, y su acercamiento longitudinal. Igualmente, se observaron períodos en que el viento se debilitó significativamente en el otoño e invierno y en particular a fines de diciembre a lo largo de toda la costa (entre los días 25 y 28 de diciembre).

A partir de la información de vientos, se calculó el índice de persistencia del viento favorable al afloramiento costero, así como la persistencia de vientos favorables que mostraron la poca actividad en el verano 2023 y su reactivación a partir de abril, con condiciones de afloramiento según el patrón estacional en invierno, disminuyendo hacia la primavera con un mínimo hacia fines de diciembre ante el debilitamiento de los vientos. El análisis de la actividad del afloramiento a través de la serie de anomalías del Bombeo y Transporte de Ekman para la franja asociada al afloramiento peruano (Fig. 3) mostró desde enero hasta mediados de marzo condiciones de bajo bombeo y transporte con anomalías negativas (-50 m^3/s x 100 m, y hasta -100 m^3/s x 100 m en marzo). Durante el otoño el incremento del vien-

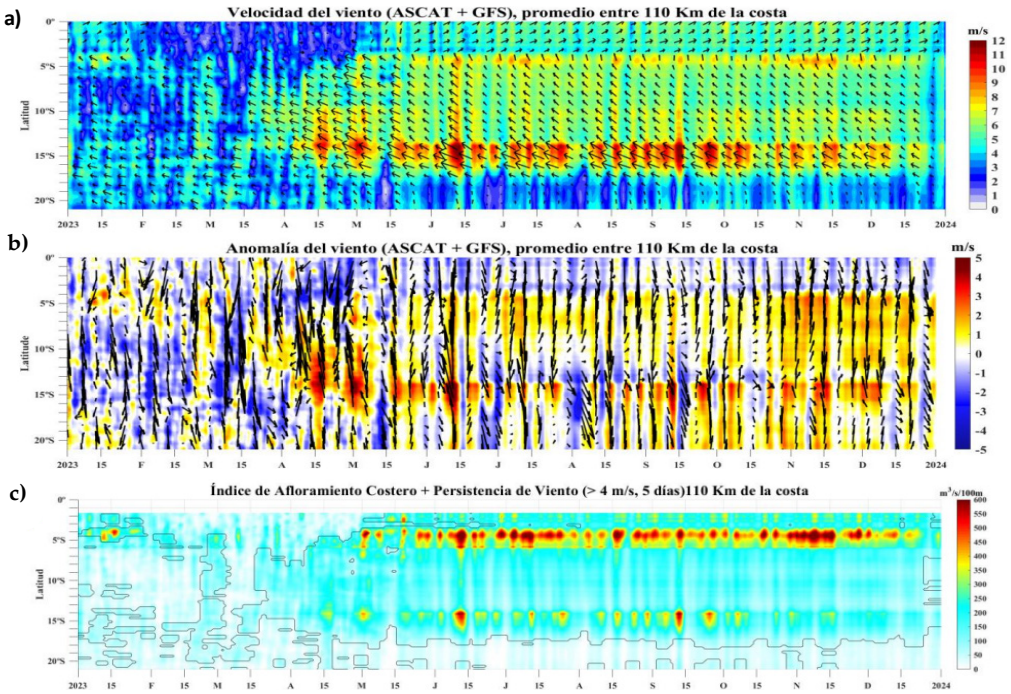


Figura 2.- Información satelital (ASCAT) del viento a lo largo de la costa peruana, entre enero y diciembre de 2023, a) Velocidad del viento, b) Anomalías del viento, c) Dirección del viento, d) Índice del Afloramiento costero Procesado Laboratorio de Santa Rosa Imarpe

to se reflejó en anomalías positivas alcanzando un máximo cercano a +200 m^3/s x 100 m. En invierno la actividad del afloramiento desde Callao hasta San Juan de Marcona, presentó valores por encima de 100 m^3/s x 100 m, condición que respondió a la estacionalidad y estuvo dentro del patrón histórico. Esta alta actividad se mantuvo en los últimos meses del año, presentando el bombeo una notable reducción en la última semana de diciembre, como consecuencia de vientos débiles lo cual afectó la diferencia de vientos entre la costa y la parte oceánica frente a Callao y Pisco (Fig. 4).

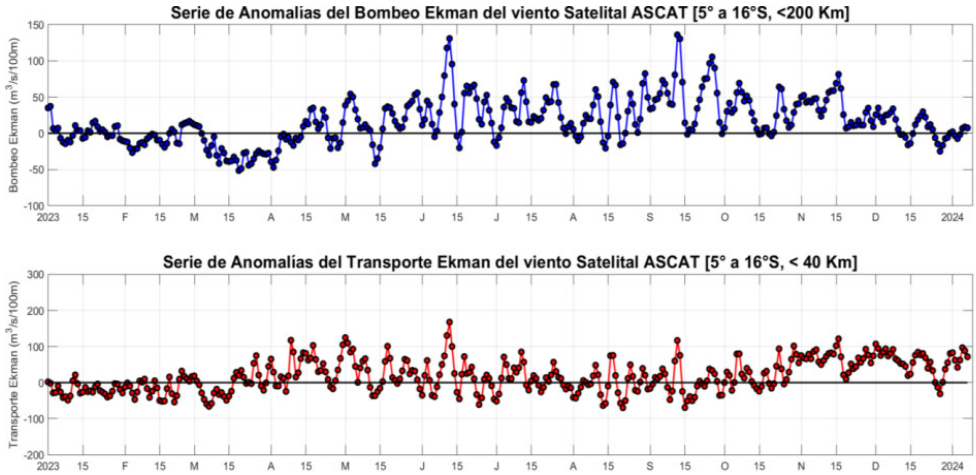


Figura 3.- Series de anomalías de Bombeo y Transporte Ekman calculado e integrado entre 5 y 16°S de la costa peruana, a partir de información del viento satelital ASCAT, 2023

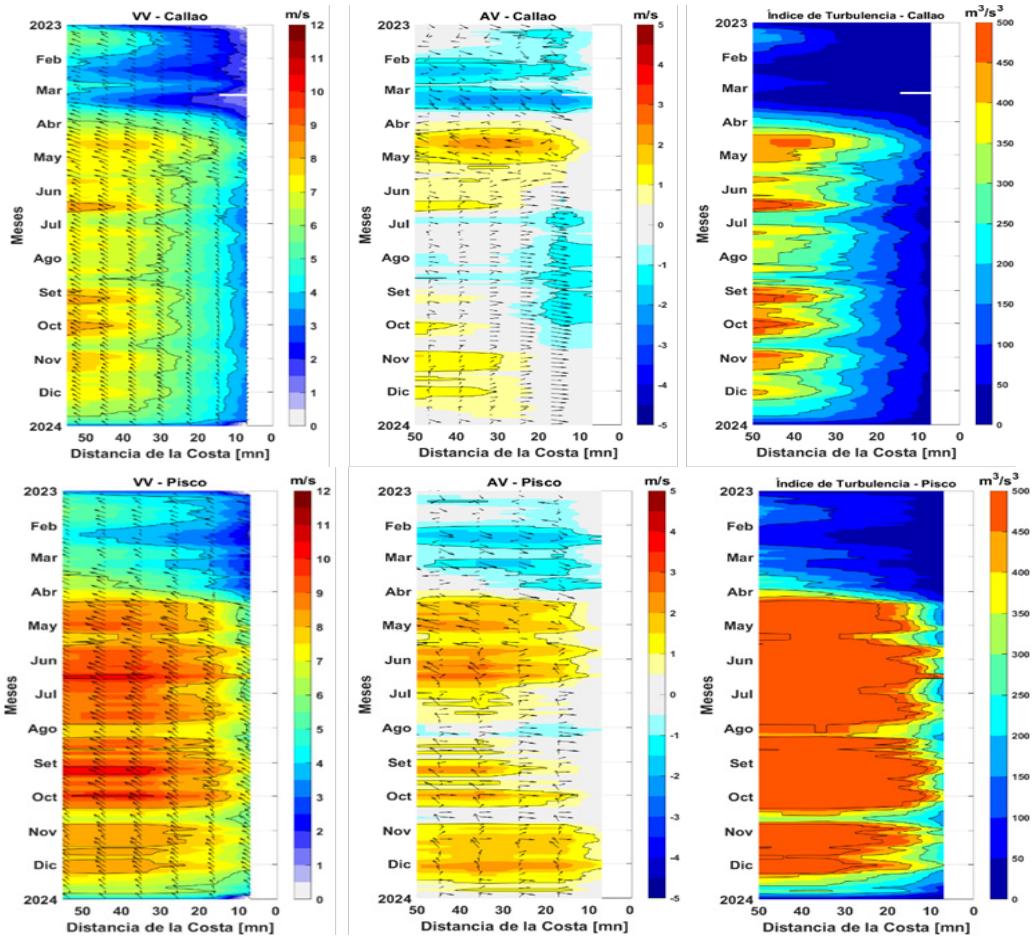


Figura 4.- Serie de la velocidad del viento satelital (a 40 km frente a la costa del Perú), respecto a los umbrales del primer y tercer cuartil pentadal (línea negra y roja) y climatología pentadal (1999 – 2017, línea verde). (Información satelital ASCAT)

El análisis del viento desde la costa hasta las 50 mn en el área del observatorio costero ambiental se presenta en la Figura 4 para Callao (12°S) y la zona centro-sur frente a Pisco (15°S). Entre enero y marzo 2023, se observó debilitamiento desde la costa hasta la parte oceánica con anomalías negativas en todo el dominio indicando valores por debajo del histórico (-4-5 m/s) y condición de muy baja turbulencia. A partir del otoño se evidenció la ocurrencia de vientos fuertes con anomalías positivas (>+ 1,0 m/s) con altos valores de turbulencia, que incluso en mayo se acercaron a la costa generando un marcado gradiente (Fig. 4). En el invierno, si bien los vientos mantienen valores moderados, principalmente en la zona más costera. presentan anomalías negativas condición que pasa a neutra en la primavera con anomalías positivas hacia la parte oceánica. Frente a Pisco, se observó el mismo debilitamiento en todo el verano e inicios del otoño activándose en mayo y junio alcanzando anomalías por encima de 2 y 3 m/s dentro de las 50 mn; en invierno predominaron valores positivos en las anomalías del viento que se mantuvieron hasta fin de año cuando, al igual que en Callao, en la última semana se debilitaron. La condición de turbulencia en Pisco es muy marcada muy cerca de la costa a diferencia de Callao donde el viento disminuye en forma más gradual. A fin de diciembre se observó debilitamiento de los vientos en toda la transecta, disminuyendo el *drop off* del viento y con ello el transporte y bombeo de Ekman tanto para Callao como para Pisco.

En relación con la distribución del Frente Térmico (FT) 2023, desde marzo hasta octubre el FT presentó valores negativos, lo que indica un importante acercamiento hacia la costa, contrario a su comportamiento usual, acentuándose entre 4°S y 13°S (Fig. 5). Esto coincidió con el impacto de El Niño costero y la llegada de ondas Kelvin cálidas que determinaron cambios en los gradientes de temperatura. En la primavera, los valores positivos indicaron el alejamiento del FT, lo cual se asociaría a la reactivación del afloramiento y la llegada de ondas frías.

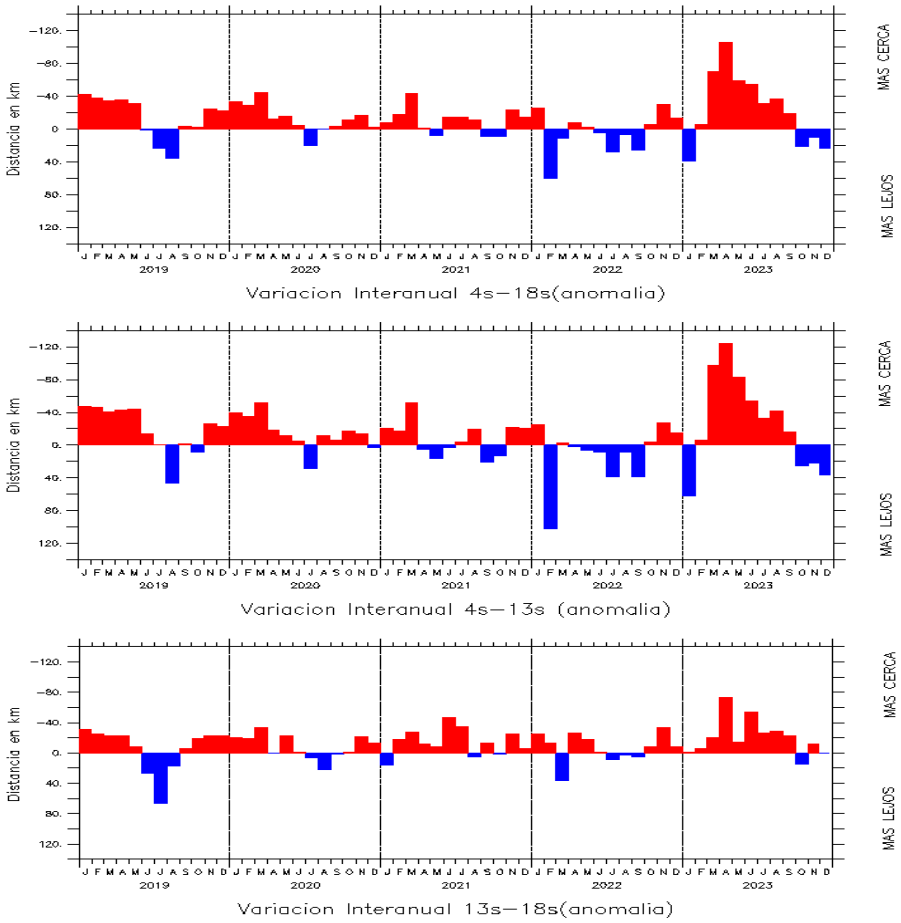


Figura 5.- Serie de la Anomalía de la distancia al frente térmico por franjas, entre 4-18, 4-13 y 13-18°S procesado por el LMOCE- AFIOF DGIOCC

Al sur de los 13°S, el FT en abril y junio, los valores incluso fueron menores al promedio. No se registró un acercamiento tan pronunciado del FT desde el verano 2017 cuando se presentó el Niño Costero 2027, que podría asociarse al acercamiento de las aguas oceánicas, como las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) resultado de la condición Niño Costero. Las anomalías positivas en el FT se conservaron durante el invierno y parte de la primavera, aunque fueron disminuyendo, lo que podría explicarse por la activación de vientos y del afloramiento, atenuando el gradiente observado en los meses anteriores. Durante noviembre y diciembre, se observaron anomalías negativas indicando alejamiento de la costa superando sus valores usuales, en particular en la zona centro – norte (4°-13°S). Mientras en la zona centro sur (13°-18°S) no es tan claro el comportamiento.

Con respecto al Frente Productivo (FP) calculado a partir de la información de clorofila-*a* (isolínea de 1,0 µg/L) y la anomalía del frente de productividad se presenta tanto la serie histórica desde el año 2014 hasta el 2023 (Fig. 6). Se puede observar que en el 2023 y en particular en el verano otoño el FP se presenta muy pegado a la costa incrementándose su distancia hacia la primavera - noviembre diciembre - lo que responde a cambios estacionales y del afloramiento costero. Con excepción de enero 2023, las anomalías del frente productivo en verano y otoño se presentaron negativas, indicando el acercamiento de las aguas productivas a la costa. En invierno, se encontró un FP por dentro de los 50 km lo cual responde a su patrón. En la primavera la posición del frente se observó con valores cercanos a lo histórico o por encima, indicando cierta recuperación en la productividad y la capacidad fertilizadora del afloramiento costero.

El Frente productivo (FP) bastante contraído o replegado hacia la costa es un buen proxy de las condiciones de productividad. Datos de Clorofila-*a* satelitales y también mediciones de clorofila-*a in situ* frente a Paita, Chicama y Callao muestran baja productividad durante el 2023. Datos del ENFEN durante el 2023 (a, b, c, d, e, f), muestra un año en que los valores de clorofila-*a* en promedio, decayeron frente a Perú significativamente por debajo de los valores históricos, en particular en otoño que es el período de mayor productividad recuperándose recién en los últimos meses del año. Núcleos de alta productividad se presentaron muy costeros o asociados a bahías en la zona de San José- Chicama (7°S) y al sur de Callao (12°S) y Pisco (14°S). Por su parte, hacia la primavera se observó principalmente entre los 8°S y 14°S disminución de la clorofila-*a*, anomalías negativas lo cual estaría asociado a la presencia de remolinos anticiclónicos y el debilitamiento de vientos y con ello un menor afloramiento (ENFEN, 2023f).

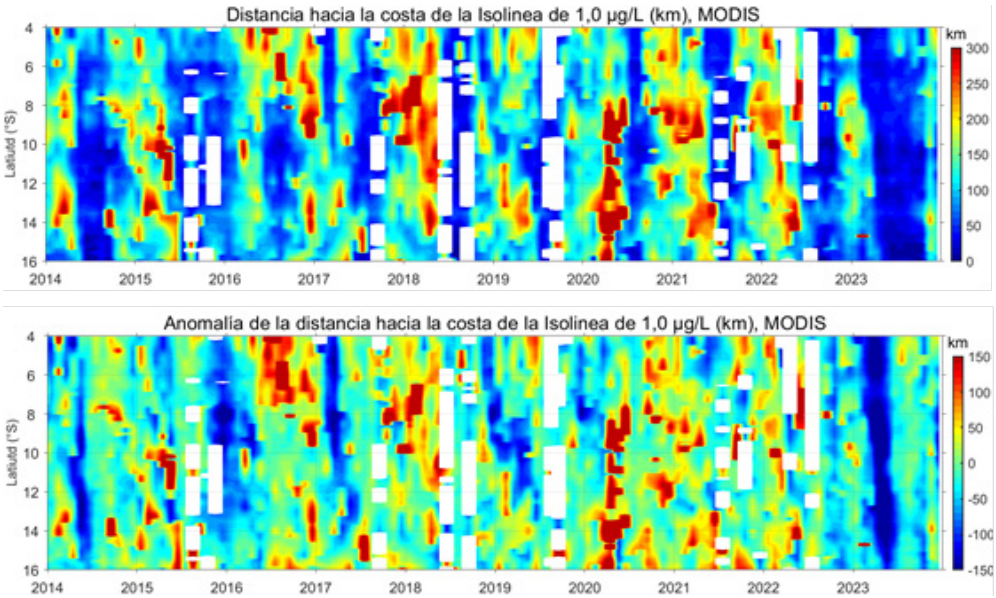


Figura 6.- Hovmöller de la distancia a la costa de la isolínea de 1,0 ug/L (km) o frente productivo y su anomalía entre los años 2014 y 2023

Condiciones *in situ* – zona central Observatorio Marino-Costero Callao (12°S)

Durante el 2023 los diferentes arreglos y estaciones implementadas en el observatorio marino costero frente a Callao, permitieron obtener información de diferentes variables físicas, químicas y biológicas y con ello corroborar el impacto de El Niño (EN) 2023 reportado en la zona Norte (Paita, Chicama) en la zona central frente a Callao. La información de temperatura durante el 2023 en la E0 frente al Cabezo, norte de la isla San Lorenzo, presentó, dentro de los 35 m de profundidad, temperaturas en un rango entre 15,21 y 20,22 °C con anomalías en promedio entre -1,06 y 2,03 °C. A inicios de año se presentaron condiciones frías que rápidamente dieron lugar a condiciones cálidas y anomalías positivas, como se observó entre marzo y septiembre. Entre septiembre y diciembre, se observó enfriamiento y el restablecimiento de condiciones neutras y la normalización en el sistema (Fig. 7).

Los resultados del diagrama de temperatura y salinidad (Fig. 7) mostraron en el verano y primavera 2023, un amplio rango de salinidades y condiciones mayores a 35,1 con altas temperaturas en abril y junio, coincidiendo con el impacto del EN Costero 2023 y la llegada de ondas Kelvin cálidas a la costa. Para los meses de invierno, las temperaturas presentaron menores valores y las salinidades estuvieron en el rango de las aguas costeras frías (ACF) al igual que lo observado en primavera.

Las mediciones de oxígeno disuelto (OD) del 2023, muestran el mismo patrón de variabilidad de la temperatura (Fig. 7). A inicios del verano se observaron condiciones de hipoxia (< 0,5 mL L^{-1}), posteriormente asociado a las condiciones cálidas y el impacto de EN, se incrementaron los valores de OD, oxigenando la columna de agua durante parte del otoño e invierno. Hacia la primavera, disminuyó el oxígeno, observándose el límite superior de la ZMO (0,5 mL L^{-1}) superficial a los 10 m, esto indica cierto restablecimiento de condiciones que reflejan un afloramiento activo.

Es importante indicar que el incremento de turbulencia puede afectar en forma significativa la condición de oxígeno en particular en las zonas costeras y de menor profundidad, al igual que cambios en la productividad. Mientras la influencia del afloramiento costero disminuye el contenido de oxígeno subsuperficial (<4,0 mL L-1) la alta actividad fotosintética lo incrementa en superficie (>5,5 mL L^{-1}).

Sensores de bajo costo, condiciones de sulfuros y pH

La medición de sulfuros en agua de mar, reconocido por su importancia en la zona marino-costera, bahías y en general en el afloramiento costero peruano, pero a su vez difícil de medir en forma precisa dada su rápida oxidación en presencia de oxígeno, generó la necesidad de desarrollar formas de medición *in situ*, utilizando los DGT para sulfuros, para lo cual se desplegaron arreglos con

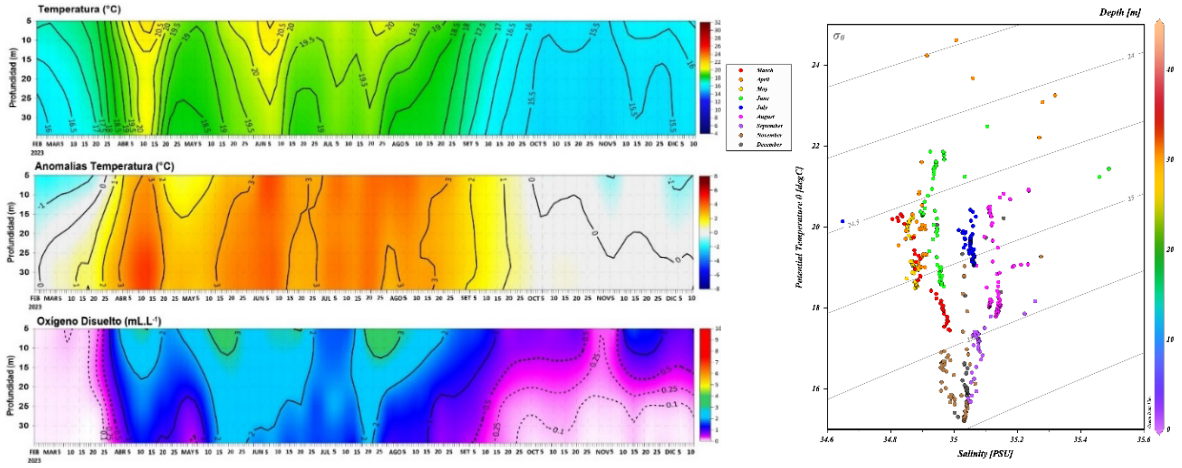


Figura 7.- Datos de temperatura, anomalía y oxígeno disuelto (mL L^{-1}) durante el año 2023 en el observatorio marino costero frente a Callao. Diagrama T/S

sensores pasivos tipo DGT en la estación 0 a 8 profundidades cubriendo en su totalidad la columna de agua (Fig. 8). Los sulfuros totales registraron mayores valores por debajo de 20 metros de profundidad entre febrero y marzo, con rangos de 0,25 µM a 2,50 µM, asociados a los rangos hipóxicos < 0,5 mL L^{-1} y a condiciones productivas. Posteriormente, coincidiendo con las condiciones cálidas y oxigenadas y la baja productividad los sulfuros fueron casi imperceptibles en la columna de agua como puede observarse en la Figura 8.

Para septiembre, el oxígeno disuelto varió entre 0,25 y 0,5 mL L^{-1} en presencia de las isotermas de 16,0 °C y 17,0 °C, indicando condiciones de afloramiento y concentraciones de sulfuros entre 0,25 µM y 0,94 µM por debajo de los 30 m. Desde inicios de octubre, se registró ascenso del límite superior de la ZMO a los 10 m y disminución de las temperaturas superficiales del mar con promedio de 16,5 °C para octubre - noviembre y de 16,0 °C en diciembre 2023. Sin embargo, concentraciones significativas de sulfuro (0,56 µM) se registraron solo cerca al fondo, indicando que en la columna de agua las condiciones aún no son favorables para la generación de altas concentraciones de sulfuros, deficiencia de oxígeno, alta carga de materia orgánica y aspectos de estratificación que potencian su acumulación subsuperficial.

En el caso del sistema de carbonatos, se obtuvo información de pH y se calculó el pCO_2 (Fig. 9). El pH presentó un valor promedio de 7,81 reflejando la característica condición de bajo pH del afloramiento costero peruano que a su vez se asocia con masas de agua con un alto contenido de pCO_2. Los valores de pCO_2 se observan altos iniciando el año y en los últimos meses disminuyen significativamente entre abril y octubre (< 900 µatm).

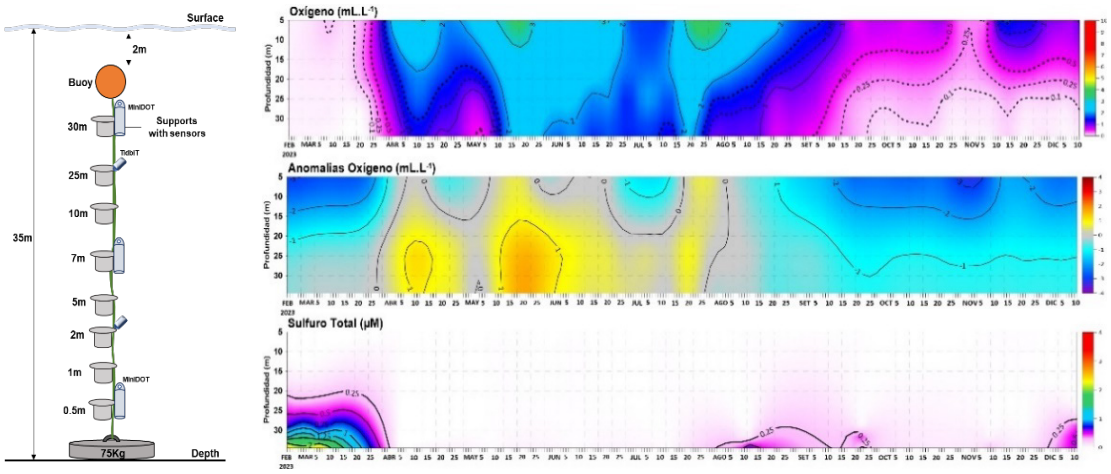


Figura 8.- Esquema de arreglo con sensores pasivos tipo DGT/sensores ambientales. Distribución de Oxígeno Disuelto (mL L^{-1}), Anomalías de oxígeno disuelto (mL L^{-1}) y Sulfuros totales (µM), en la bahía de Callao durante el periodo 22/02/2023 al 11/12/2023, en las coordenadas 12°03´S, 77°14´W

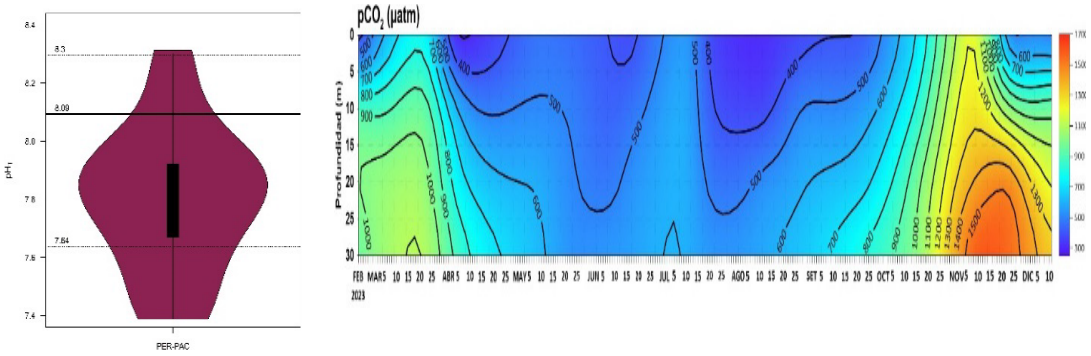


Figura 9.- Datos de pH para Perú (Reporte ODS 14.3.1) y cálculo de pCO_2, durante el año 2023 en el observatorio marino costero frente a Callao

Condiciones químicas, nutrientes y productividad

Con respectos a los nutrientes, la Figura 10 muestra los cambios durante el 2023. Inicia con altos nutrientes y una nutriclina somera como lo muestra el fosfato y el silicato a diferencia del nitrato y nitrito que presentan un comportamiento más asociado a los bajos valores de oxígeno, que determina consumo de nitrato y acumulación de nitritos.

A partir de abril, se observó la disminución tanto del fosfato como silicato alcanzando valores muy bajos en toda la columna de agua en junio y hacia fines de julio. Desde la primera quincena de septiembre 2023, se observó el incremento y ascenso de las nutriclinas, con isolíneas de fosfatos superiores a 2,0 µM y silicatos entre 10,0 y 25,0 µM (Fig. 11). Esto se alinea muy bien con procesos activos de afloramiento que se observaron en la primavera 2023 y se reflejaron en el incremento de la productividad.

En cuanto la clorofila-*a in situ*, se observaron núcleos de alta clorofila en verano y otoño, esto refleja condiciones favorables que se dieron muy pegadas a la costa pero que no reflejan la productividad en todo el dominio (Fig. 11). En el invierno se observó disminución que es característico del patrón estacional, así como el desfase

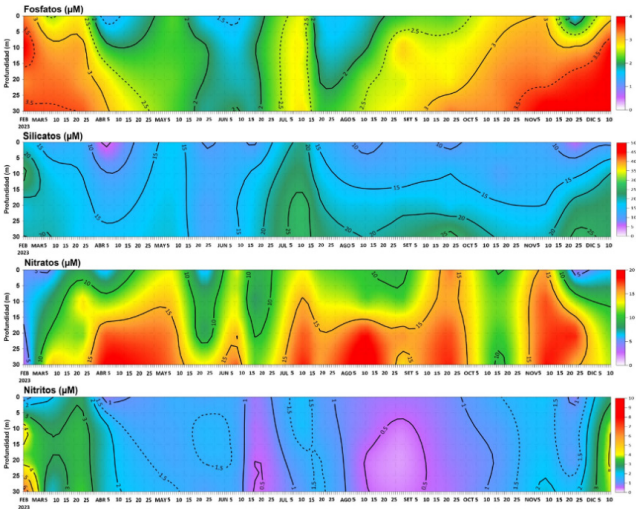


Figura 10.- Distribución Vertical de Fosfatos (µM), Silicatos (µM), nitratos y nitritos (µM) observatorio Callao 22/02/2023 al 11/12/2023, en las coordenadas 12°03′ S y 77°14′W

con este período de vientos más intensos, mayor turbulencia y mayor afloramiento. Hacia finales de agosto y durante la primavera, se observó el incremento de clorofila-*a*, que es parte de la estacionalidad en el área y de condiciones favorables en esta zona. Desde octubre a diciembre la clorofila-*a* presentó concentraciones entre 2,5 µg L^{-1} y 15,0 µg L^{-1} coincidiendo con la productividad a nivel de la costa peruana y condiciones del afloramiento, que en el último trimestre del año favorecieron la productividad.

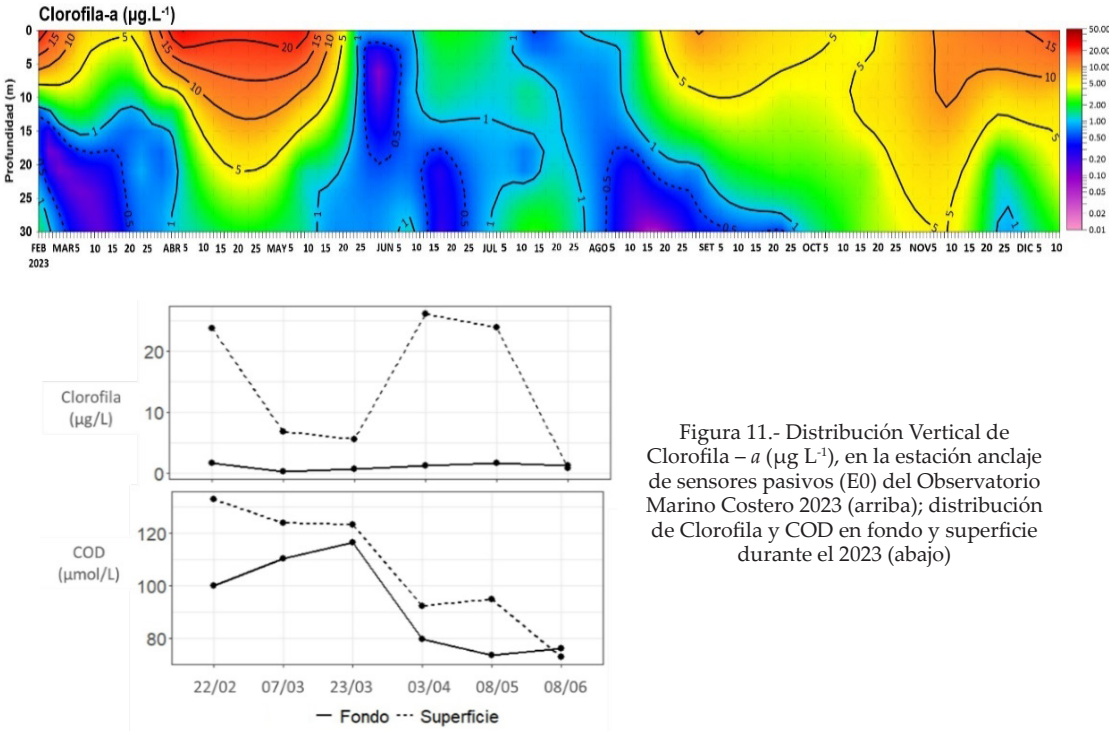
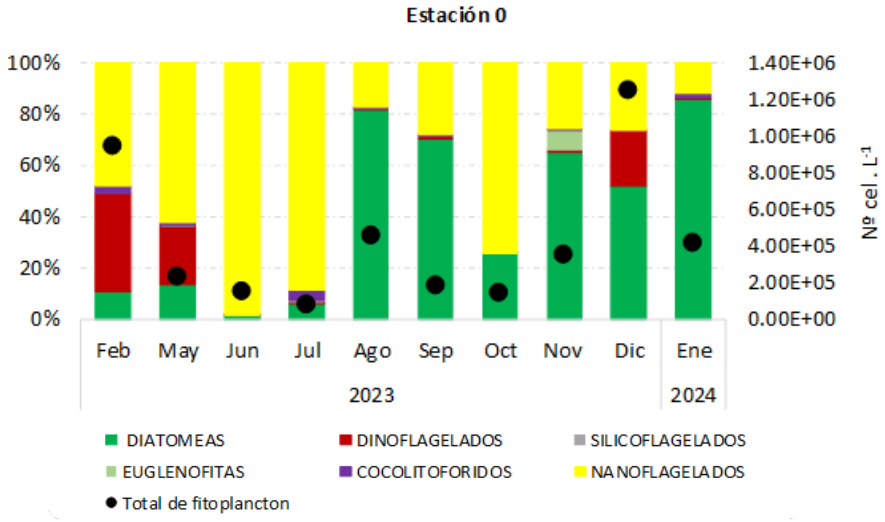


Figura 11.- Distribución Vertical de Clorofila – *a* (µg L^{-1}), en la estación anclaje de sensores pasivos (E0) del Observatorio Marino Costero 2023 (arriba); distribución de Clorofila y COD en fondo y superficie durante el 2023 (abajo)

Los resultados preliminares de distribución de Carbono Orgánico Disuelto (COD) en el observatorio marino frente a Callao desde febrero hasta junio 2023, mostraron valores altos durante el verano, asociado a concentraciones relativamente altas de clorofila-*a* en superficie. Hacia inicios del otoño, se observó disminución progresiva de los valores de COD, posiblemente asociado a la disminución de la productividad y mayor mezcla en la columna de agua (Fig. 11).

Comunidad planctónica

A fin de caracterizar la comunidad fitoplanctónica, se estudió a 10 m de profundidad la composición específica del fitoplancton (nano y microfitoplancton) (Fig. 12). A inicios de año se dio mayor contribución porcentual de los dinoflagelados (~ 40%) en febrero y (~ 20%) en mayo, además de registrarse las mayores abundancias celulares en verano y primavera con 9 x 10^5 cel.L^{-1} y 1,2 x 10^6 cel.L^{-1}, respectivamente. En verano (enero) floraciones algales de 2 x 10^5 cel.L^{-1} producidas por los dinoflagelados *Akashiwo sanguinea* y *Prorocentrum micans* (ambas especies del grupo funcional S) así como concentraciones de 4 x 10^5 cel.L^{-1} para los nanoflagelados (grupo funcional C) que representaron un 50% de aporte a la abundancia del fitoplancton total. En mayo (otoño) aunque con la disminución del fitoplancton total, la contribución de los dinoflagelados y nanoflagelados continuó siendo mayor a la de las diatomeas, registrándose *A. sanguinea* (4 x 10^4 cel.L-1). Hacia fines de otoño y principios de invierno se dio la predominancia casi total del nanofitoplancton, condición característica del período de invierno, con las densidades mínimas del año (8 x 10^4 cel.L^{-1}). Cabe destacar la recuperación de las diatomeas al avanzar el invierno cuando contribuyeron con algo más del 80% a la abundancia total y con densidad celular de 5 x 10^5 cel.L^{-1} reflejando la activación del afloramiento costero. Hacia fines de invierno, en setiembre, la concentración total



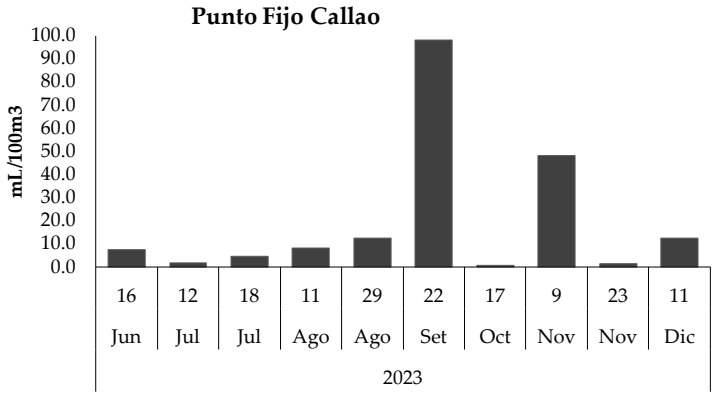


Figura 12.- Superior: Contribución porcentual de los principales grupos de fitoplancton a 10 m de profundidad (12°S) (eje izquierdo); las abundancias celulares del total de fitoplancton (eje derecho en notación científica) inferior. Biovolúmenes de zooplancton de la Estación 0, 2023

de fitoplancton volvió a disminuir hasta mediados y finales de primavera en que se dio una nueva recuperación de la contribución de diatomeas y de dinoflagelados, presentándose en diciembre, diatomeas como *Thalassionema nitzschioides, Leptocylindrus danicus, Skeletonema costatum* (densidades celulares entre 1 a 3 x 10^5 cel.L^{-1}), *Pleurosigma* sp. (1 x 10^4 cel.L^{-1}) (todas pertenecientes al grupo funcional R), *Eucampia zoodiacus* (8 x 10^3 cel.L^{-1}) (grupo funcional S), entre otras, asociadas a pequeños dinoflagelados de la Familia Gymnodiniales (2 x 10^5 cel.L^{-1}) así como de la especie *Heterocapsa* sp. (2 x 10^4 cel.L^{-1}) y Tecados (N.D.) (2 x 10^4 cel.L^{-1}) componentes del nanofitoplancton. Asimismo, se registraron cocolitofóridos como *Emiliania huxleyi* y *Ophiaster hydroideus* en febrero y julio 2023. Comparando con lo registrado entre el 2013 y 2021, se han registrado mayores contribuciones de dinoflagelados, siendo de mayor relevancia y recurrencia las FANs de *A. sanguinea* y *P. micans* (estrategas S) en el verano-otoño, mientras que la presencia de dinoflagelados pequeños (posibles estrategas C-R) y de diatomeas de afloramiento (estrategas R), cobró mayor notoriedad durante la primavera.

Los bio-volúmenes de zooplancton fluctuaron entre 0,7 y 98,0 mL/100 m^3, con promedio de 19,6 mL/100 m^3 (Fig. 13) el mayor y menor valor fueron ubicados en setiembre y octubre, respectivamente, cabe señalar que ambos valores estuvieron asociados principalmente a masas de aguas costeras frías. Se determinó al copépodo *Centropages brachiatus* especie asociada a masas de aguas costeras frías con una frecuencia del 70% de estaciones evaluadas, registrando valores entre 12 y 3 373 Ind./100 m^3, alcanzando su máximo y mínimo valor en julio y noviembre, respectivamente. En junio se observaron indicadores de ASS como los copépodos *Acartia danae, Calocalanus pavo* y *Triconia conifera* con valores entre 1 a 5 Ind./100 m^3, igualmente se determinó a la especie *C. furcatus* asociado a AES con valor de 20 Ind./100 m^3.

El análisis de ictioplancton permitió determinar huevos y larvas de la familia Engraulidae, entre ellos la especie *Engraulis ringens* "anchoveta", así como larvas de la familia Blenniidae (*Hypsoblennius* sp. y *Ophioblennius* sp.), Gobiidae, Labrisomidae y Sciaenidae. La anchoveta en estadios de huevos y larvas fue la especie más frecuente y abundante, los primeros estados fueron determinados en todos los meses evaluados con abundancias entre 2 y 11 444 huevos/100 m^3, alcanzando su máximo valor en agosto, principal época de desove de esta especie, mientras que las larvas registraron valores bajos que fluctuaron entre 2 y 9 larvas/100 m^3, observados solamente en junio, julio y agosto.

Bentos, geología, comunidad y acoplamiento bento pelágico

Con respecto al bentos, el análisis del sustrato asociado al macrobentos en la estación E0 (37 m de profundidad) mostró presencia de restos de escamas y vertebras de peces, conchillas vacías de bivalvos, y restos de origen antropogénico (microplásticos). Otra característica importante que presentó el sedimento colectado fue el frecuente e intenso olor sulfuroso. Se evidenció en el período estudiado cambios en la composición de organismos, en julio se contabilizó 6 taxones, 8 taxones en agosto y 15 taxones en septiembre, disminuyendo en noviembre a 8 y en diciembre a 7. En porcentaje, más del 65% de la composición total corresponde al grupo de Annelida-Polychaeta, seguido de 15% de Arthropoda-Crustacea. Esta variación especiológica fue significativa en septiembre en el grupo Polychaeta con la ocurrencia de familias Cirratulidae, Capitellidae, Pilargidae y Orbiniidae. En noviembre y diciembre se observó inclusive mayor dominancia de *Leitoscoloplos chilensis*-Orbiniidae, de *Paraprionospio pinnata*-Spionidae y *Tharyx* sp.- Cirratullidae. De la misma forma, la dominancia en densidad y biomasa de Veneridae-*Agriopoma catharium*, molusco bivalvo que en agosto se presentó con más del 70% respecto a la densidad y biomasa total mensual obtenida. El rango de densidad total promedio fue de 400 - 2867 ind. m^{-2}, mientras que en la biomasa el rango total promedio fue de 2,12 – 165,14 g m^{-2}, los valores máximos de estos dos parámetros se registran en noviembre (Tabla 1). El bacteriobentos filamentoso, detectado desde septiembre, *Candidatus Marithioploca* spp, presentó una escasa representatividad en biomasa húmeda, también se observó un ligero incremento para noviembre y diciembre. Este compartimiento bentónico, alcanzó valores entre 18 y 30 gm^{-2}, incremento también significativo respecto a lo visto en diciembre 2021.

Tabla 1.- Macrobentos E0- Observatorio Callao, 2023

Callao - E0 (37m) 2023

	julio			agosto			septiembre				noviembre			
Polychaeta				ds		ds		ds		ds		ds		ds
Capitella capitata	20	0.0060	0	0	0.0000	0.0000	20	35	0.0100	0.0173	0	0	0.0000	0.0000
Hermundura fauveli	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	7	12	0.0073	0.0127	0	0	0.0000	0.0000
Leistoscoloplos chilensis	0	0.0000	87	81	0.0860	0.0753	67	31	0.0793	0.0554	467	223	0.7380	0.3344
Nephtys ferruginea	0	0.0000	20	20	0.0800	0.0904	7	12	0.2227	0.3857	0	0	0.0000	0.0000
Nereis callaona	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	7	12	0.0380	0.0658	7	12	0.1827	0.3164
Paraprionospio pinata	0	0.0000	13	12	0.0593	0.0633	7	12	0.0507	0.0878	240	53	0.2573	0.1433
Spiophanes bombyx	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	7	12	0.0053	0.0092	0	0	0.0000	0.0000
Lumbrineris sp.	0	0.0000	13	23	0.0080	0.0139	7	12	0.0407	0.0704	7	12	0.0027	0.0046
Phylodoce sp.	0	0.0000	7	12	0.0113	0.0196	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000
Polydora sp.	20	0.0020	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000
Sigambra sp.	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	20	35	0.0513	0.0889	0	0	0.0000	0.0000
Tharyx sp.	0	0.0000	7	12	0.0047	0.0081	40	35	0.0400	0.0421	133	95	0.0687	0.0473
Echiurida	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	7	12	1.3860	2.4006	0	0	0.0000	0.0000
Crustacea														
Caprella sp.	20	0.0040	0	0	0.0000	0.0000	13	12	0.0027	0.0031	0	0	0.0000	0.0000
Photidae	40	0.0200	0	0	0.0000	0.0000	33	58	0.0147	0.0254	0	0	0.0000	0.0000
Amphipoda	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	7	12	0.0173	0.0300
Mollusca														
Agriopoma catharium	120	51.9160	653	1039	1.5620	2.5224	1113	668	5.1087	3.6398	2000	783	163.8613	72.0714
Echinodermata														
Ophiuroidea	0	0.0000	80	72	0.3100	0.3240	20	35	0.0487	0.0843	7	12	0.0213	0.0370
otros														
Phoronida	180	0.0920	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000
Nematoda	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	373	83	0.0173	0.0042
Candidatus marithioploca (%)	0	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0-20	0	0.6913	0.7365	0-20	0	3.8367	6.6453
Polychaeta	40	0.0080	147	151	0.2493	0.2309	193	140	1.9313	3.0698	853	316	1.2493	0.7938
Crustacea	60	0.0240	0	0	0.0000	0.0000	47	64	0.0173	0.0250	7	12	0.0173	0.0300
Mollusca	120	51.9160	653	1039	1.5620	2.5224	1113	668	5.1087	3.6398	2000	783	163.8613	72.0714
Echinodermata	0	0.0000	80	72	0.3100	0.3240	20	35	0.0487	0.0843	7	12	0.0213	0.0370
otros	180	0.0920	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000	0	0	0.0000	0.0000
	400	52	880		2		1373		7		2867		165	
	jul.		ago.	ds			sep.	ds			nov.	ds		
densidad promedio (ind. m^{-2})	400		880	1063			1373	804			2867	902		
biomasa promedio (g m^{-2})	52		2.1213	3			7.1060	7			165.1493	72		
número de especies	6		8				15				8			
% abundancia de *Agriopoma catharium*	30		74				81				70			
% biomasa de *Agriopoma catharium*	99.8		73.6				71.9				99.2			

Para el meiobentos, se obtuvo información en agosto 2023 y se identificó 29 taxones meiofaunales (Tabla 2) repartidos en seis filos (Nematoda, Foraminifera, Gastrotricha, Platyhelminthes, Annelida, Mollusca), con predominancia de nematodos de vida libre que fluctuó entre 86,2% (0,5-1 cm) y 95,3% (1-1,5 cm). La distribución vertical de estos organismos no exhibió un patrón claro. Entre los nematodos, en la sección más superficial (0-0,5 cm) fue importante *Desmostersia levinae* (19 ± 36 Ind 10 cm^{-2}), un nematodo indicador de condiciones deficientes de oxígeno, *Desmodora* sp. (20 ± 39 Ind 10 cm^{-2}) y *Desmodora* sp.1 (12 ± 23 Ind 10 cm^{-2}).

En todos estos casos, la variabilidad de la densidad fue relativamente alta. Algo similar ocurrió en la fracción no identificada a menor nivel taxonómico (Nematoda), la cual totalizó 61 ± 85 Ind 10 cm^{-2}. Grupos como Polychaeta (17 ± 33 Ind 10 cm^{-2} – 40 ± 38 Ind 10 cm^{-2}) y Turbellaria (0,3 ± 1 Ind 10c m^{-2} – 10 ± 16 Ind 10 cm^{-2}) fueron irregulares en su distribución vertical, aunque exhibieron mayores densidades en el centímetro más profundo del sedimento (1,5 - 2 cm). En general, los valores totales de densidad meiofaunal calculados no mostraron similaridad clara; de hecho, en ningún caso se alcanzó valores mayores al 85% (Fig. 13). Desde el punto de vista del tipo trófico dominante en la meiofauna, la composición de esta comunidad estuvo representada por consumidores de diatomeas (nematodos de los géneros *Desmodora, Spirinnia*) y por depredadores en relativo mayor número (*Sabatieria, Comesoma*).

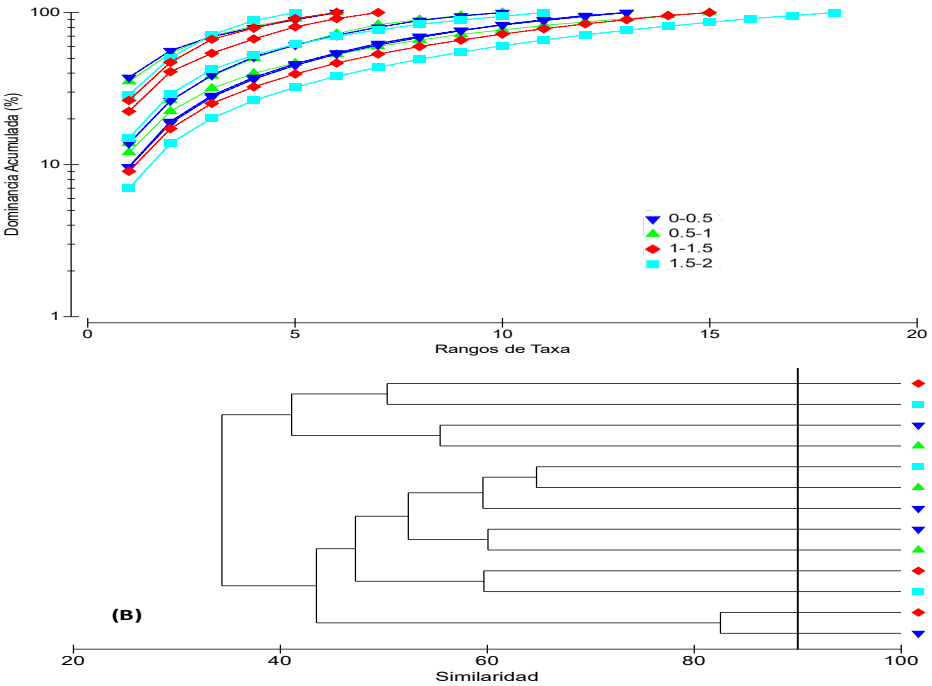


Figura 13.- Dominancia acumulada (A) (valores porcentuales logaritmados) de taxones meiofaunales identificados, basada en registros por sección del sedimento (cm), con la indicación correspondiente de la dominancia relativa (%) de nematodos de vida libre. (B) Análisis de agrupamiento basado en las densidades meiofaunales, la línea vertical indica 90% de similaridad. Campaña 2308, Observatorio Costero

Tabla 2.- Densidad (Ind 10 cm^{-2}) de taxones meiofaunales en las cuatro secciones del sedimento. Los valores expresan promedio ± desviación estándar. Campaña 2308, Observatorio Costero

Taxa	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	Densidad Total (0-2 cm)
Adenophorea	0.3 ± 1	-	-	7 ± 12	11 ± 12
Allogromiidae	-	5 ± 9	-	5 ± 8	8 ± 9
Axonolaimidae	6 ± 13	-	7 ± 13	-	12 ± 24
Axonolaimus	3 ± 5	2 ± 3	4 ± 6	-	7 ± 10
Bivalvia	0.3 ± 1	0 ± 0	-	-	0.3 ± 1
Chromadoridae	12 ± 15	1 ± 2	10 ± 14	8 ± 14	27 ± 7
Comesoma	3 ± 7	1 ± 2	-	7 ± 6	9 ± 6
Comesomatidae	22 ± 24	22 ± 28	15 ± 14	23 ± 30	67 ± 74
Desmodora	20 ± 39	-	13 ± 23	12 ± 21	39 ± 56
Desmodora I	12 ± 23	-	7 ± 12	0.3 ± 1	17 ± 33
Desmosterisa levinae	19 ± 36	15 ± 26	5 ± 9	15 ± 23	45 ± 87
Gastrotricha	0.3 ± 1	4 ± 5	1 ± 2	4 ± 8	15 ± 13
Halacaridae	-	19 ± 33	-	12 ± 20	23 ± 46
Halacarus	-	1 ± 2	-	-	1 ± 2
Halalaimus	3 ± 4	8 ± 10	6 ± 7	19 ± 28	28 ± 37
Halammohydra	-	0.3 ± 1	-	-	0.3 ± 1
Mollusca	-	0.3 ± 1	1 ± 2	-	1 ± 1
Nematoda	61 ± 85	78 ± 108	62 ± 23	36 ± 20	210 ± 220
Oxystominidae	23 ± 22	36 ± 59	13 ± 22	13 ± 13	74 ± 81
Paracomesoma	5 ± 6	-	7 ± 13	-	11 ± 17
Paraprionospio pinnata	-	-	1 ± 1	6 ± 10	5 ± 8
Platyhelmithes	-	0.3 ± 1	-	5 ± 8	4 ± 7
Polychaeta	17 ± 33	14 ± 24	4 ± 6	12 ± 12	40 ± 68
Sabatieria	27 ± 13	43 ± 38	10 ± 9	26 ± 31	96 ± 95
Sabatieria I	2 ± 5	-	8 ± 13	-	8 ± 16
Selachinematidae	14 ± 20	1 ± 1	4 ± 7	9 ± 14	24 ± 37
Spirinnia	2 ± 4	1 ± 1	-	-	3 ± 4
Theristus	3 ± 5	17 ± 25	-	8 ± 13	21 ± 32
Turbellaria	0.3 ± 1	1 ± 1	2 ± 2	10 ± 16	29 ± 36

Con respecto al acoplamiento bento pelágico frente a Callao, el estudio del flujo de material particulado (FMT) desde fines del 2022 a junio del 2023 a través de trampas de sedimento ubicadas aproximadamente a 30 m, resultó en un promedio de 157,4 ± 20,54 mg $m^{-2}día^{-1}$, con máximo de 171,94 mg $m^{-2}día^{-1}$. Se identificaron dos tipos de pellets fecales, de zooplancton y de peces. El flujo de pellets de zooplancton (FPZ) tuvo media 1,99 ± 0,40 mg $m^{-2}día^{-1}$, contribuyendo con 7,97% al FMT; en cuanto el flujo de pellets de peces (FPP) fue 9,68 mg $m^{-2}día^{-1}$ y contribuyó con 1,33% al FMT.

4. DISCUSIÓN

Indicadores del afloramiento costero para Perú durante El Niño Costero 2023

Durante el año 2023, los vientos fluctuaron entre moderados e intensos, con períodos alternados de debilitamiento e intensificación, en particular un fuerte debilitamiento se observó en el verano 2023 debido al evento Yaku y, posteriormente, al inicio de El Niño Costero 2023 (ENFEN, 2023b). En relación con la evolución y trayectoria del ciclón Yaku, para el 4 de marzo su centro se localizó aproximadamente a 6°S en la zona oceánica, a 800 km frente a la costa de Sechura para desaparecer finalmente entre el 13 y 17 de marzo, cuando se desplazó hacia el oeste y hacia la zona oceánica (D. Correa, comunicación personal). Durante su trayecto, generó advección de calor desde la zona oceánica hacia la costa peruana, lo que incrementó la evaporación, las precipitaciones y las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) tanto en la zona costera como en la oceánica. Este incremento térmico se acopló al inicio y desarrollo de El Niño 2023 afectando los vientos (ENFEN, 2023c).

El debilitamiento de los vientos, junto con el efecto del ciclón Yaku, contribuyó al debilitamiento del afloramiento costero peruano (ACP) durante el verano, favoreciendo condiciones cálidas frente a las costas de Perú. Esto se reflejó en un máximo de TSM alcanzando al inicio del otoño e invierno valores de 21,95 °C y 20,46 °C, respectivamente, acompañados de anomalías positivas (ENFEN, 2023d). Aunque persistió el calentamiento debido a la llegada de ondas Kelvin cálidas en marzo, abril, mayo, julio y agosto; en invierno, propio del cambio de estación y cierta intensificación de los vientos, el ACP se encontró activo desde el Callao hasta San Juan de Marcona. Posteriormente, hacia la primavera con el acercamiento del Anticiclón del Pacífico Sur y la intensificación de los vientos la zona centro-sur del litoral peruano, mostró alta actividad y la llegada de ondas Kelvin frías debilitaron la condición cálida predominante.

Estudios previos han documentado diferentes patrones de viento y actividad del ACP en relación con eventos El Niño. Por ejemplo, durante los años 2015-2016 se observaron patrones de intensificación del ACP, aunque con redistribución de masas de agua oceánicas hacia la costa, lo que alteró las características químicas del afloramiento (Graco *et al*., 2016). Por otro lado, durante El Niño Costero 2017 (Espinoza-Morriberón *et al*., 2021) se reportó un importante debilitamiento previo y durante el evento, lo que redujo significativamente la actividad del ACP, aunque este efecto fue más evidente en la capa superficial de la columna de agua. Estas observaciones destacan la importancia de mantener series de tiempo para analizar las variaciones, ya que cada evento El Niño presenta impactos únicos en el ecosistema.

Por su parte es importante explorar otros indicadores que complementan la información. El análisis del Frente Térmico (FT) durante 2023 mostró un significativo acercamiento durante el verano y otoño, indicado por las anomalías positivas, alcanzando un máximo en marzo y abril, asociado al ciclón Yaku, El Niño Costero y la llegada de ondas Kelvin cálidas. Posteriormente, aunque el FT mantuvo anomalías positivas y comenzó a alejarse de la costa, en el último trimestre, se alejó de la costa, presentando anomalías negativas y coincidiendo con la llegada de ondas Kelvin frías, la intensificación del afloramiento costero y la normalización de las condiciones (ENFEN, 2023e).

Los datos de clorofila-*a* mostraron disminución a lo largo de toda la costa durante 2023, con repliegue significativo del límite entre zonas de alta y baja productividad (isolínea de 1 mg/m^3), especialmente en verano-otoño y en menor medida durante el invierno. En efecto el Frente de Productividad (FP) se mantuvo muy próximo a

la costa durante el verano y otoño, incrementando su distancia hacia la primavera 2023 (noviembre-diciembre). Las anomalías de clorofila superficial en este estudio fueron negativas durante el verano, otoño e invierno. Hacia noviembre y diciembre, se registró recuperación en la productividad, con un FP alejado de la costa y núcleos de alta clorofila-*a* en las zonas de San José-Chicama y al sur del Callao. Estudios previos indican baja productividad asociada a eventos como El Niño Costero, por ejemplo, el 2017 (Ledesma *et al*., 2021) o con la estacionalidad como lo observado en invierno (Calienes, 2014). Otro aspecto que se observa es el desfase temporal entre el máximo acercamiento del FT y del FP de clorofila, mientras el FT es en primavera, el FP se observa en invierno. La variación climatológica del FT muestra que su alejamiento máximo en el área de estudio se da en otoño (180,9 x 10^3 km^2), aunque el 2023 se mantuvo cerca de la costa (Romero *et al*., 2023).

Observatorio Marino Costero representativo de la zona central de Perú durante El Niño 2023

El análisis de la representatividad del observatorio marino costero frente a Callao indica que permite captar la señal regional además del efecto local. En efecto, las condiciones físico-químicas observadas en las series de tiempo obtenidas en el observatorio marino-costero frente a Callao 12°S, reflejaron cambios asociados con el evento El Niño 2023. Incrementos en las temperaturas en la columna de agua y presencia de anomalías positivas, caracterizaron el área desde mediados del otoño hasta fines de invierno, esta condición es diferente al impacto observado durante El Niño costero 2017 que fue en la capa superficial. Además, se observó condiciones de oxigenación en la columna de agua, lo cual ha sido descrito en la zona central como una característica de la fase cálida del ENSO, El Niño (Graco *et al*., 2017) pudiendo la ZMO profundizarse e incluso desaparecer durante estos eventos cálidos (Ledesma, 2011; Graco *et al*., 2017). Durante el año 2023 la ZMO se presentó a inicios de año, previo al Niño y hacia la primavera con la reactivación del afloramiento. En relación con los nutrientes, los nitratos presentaron bajas concentraciones a inicios de año y hacia la primavera, coincidiendo con la deficiencia en oxígeno y mayor disponibilidad de materia orgánica y procesos de desnitrificación que llevan a la acumulación de nitritos (Graco *et al*., 2017). Durante el Niño 2023 los nitratos se incrementaron incluso, asociado a la mayor oxigenación y menor consumo por procesos biogeoquímicos. Los resultados de sulfuros, con baja presencia en la columna de agua, son explicados por una condición poco favorable tanto de oxígeno como de materia orgánica lo cual muestra el contraste con períodos "normales" donde la costa central y zonas del sur de Perú, como Paracas, presentan intensas plumas sulfurosas descritas en trabajos anteriores (Flores *et al*., 2023). Por su parte los estudios de pH indican también cambios significativos durante El Niño 2023, con el incremento en sus valores y menor acidez (> 8) lo cual repercute en los organismos en particular calcificantes como cocolitofóridos. Durante los períodos de primavera, con un activo afloramiento costero y la presencia de acf los valores de pH descienden significativamente pudiendo alcanzar valores < 7,6, lo cual determina que en promedio las aguas peruanas tengan condiciones por debajo del promedio global (León *et al*., 2011).

Las comunidades fitoplanctónicas reflejan las condiciones ambientales durante el año 2023 y el impacto de las condiciones cálidas de El Niño Costero. La concentración total del fitoplancton, fue menor a la registrada anteriormente durante los veranos (febrero) de los años 2013 al 2015 y 2017 al 2020 y similar a la registrada durante marzo del EN 2017 (Sánchez *et al*., 2021; Graco *et al*., 2016, 2019, 2021). Sin embargo, la composición varía, por ejemplo en el 2017 predominó la familia de dinoflagelados Gymnodiniales, mientras en los últimos años se han registrado mayores contribuciones de dinoflagelados, siendo de mayor relevancia y recurrencia las FANs de *Akashiwo sanguinea* y *Prorocentrum micans* (estrategas S) en el verano-otoño, mientras que dinoflagelados pequeños (posibles estrategas C-R) y diatomeas de afloramiento (estrategas R), cobraron mayor notoriedad durante la primavera con la reactivación del afloramiento. Una importante coexistencia de fitoplancton de diferentes grupos se observa en el escenario de este estudio, así como una disminución en el diámetro celular de algunas diatomeas propias de florecimientos fitoplanctónicos como *Skeletonema costatum*, *Leptocylindrus danicus*, *Odontella mobiliensis* y *Chaetoceros* sp. en verano y otoño. Justamente, además

de los efectos de El Niño en la profundización de la termoclina que conlleva a la limitación de nutrientes en la capa superficial para el desarrollo del fitoplancton, existen algunas hipótesis que relacionan la disminución del tamaño celular con el incremento de la temperatura, como la hipótesis de Bergmann (James, 1968) que señala que, con el calentamiento climático, las especies tienden a ser más pequeñas. El incremento de la demanda de recursos lleva a la reducción del tamaño para compensarlo y con ello, el aumento del radio superficie/volumen (para fijación de nutrientes) (Sommer *et al*., 2017), mejorando su respectiva tasa metabólica. La presencia de cocolitofóridos, y su mayor abundancia durante el 2023 se asocia con la presencia de ASS más cerca de la costa y condiciones de mayor pH, condiciones que durante el Niño permitieron mayor contribución de este grupo calcáreo tal como se observó en el 2015-2016 (Alvites Gutiérrez, 2016), y en el 2017 (A. Bernales com. pers.). Los resultados obtenidos para la comunidad fitoplanctónica evidenciaron la influencia de las condiciones cálidas del Niño costero 2023, con un efecto indirecto del incremento de la temperatura sobre las concentraciones totales del fitoplancton, sobre aspectos morfométricos como el tamaño celular de algunas diatomeas, la presencia de pequeños dinoflagelados y la mayor contribución porcentual de dinoflagelados productores de FAN en verano-otoño. En el caso del zooplancton se observan cambios en los indicadores y en el biovolumen, alcanzando mayores valores en primavera cuando el sistema recupera la productividad.

Con respecto al bentos, a diferencia del ambiente pelágico, tiene memoria y los cambios pueden integrarse en períodos mayores de tiempo. Los organismos, dados sus ciclos de vida que integran fases pelágicas y bentónicas, tienen la capacidad de poder responder en forma rápida a los cambios siendo muy sensibles a la variabilidad del ambiente. La diversidad en la E0 durante la segunda mitad del 2023 fue particularmente mayor a lo observado en años precedentes. Esta diversidad estuvo acompañada por mayor incidencia de poliquetos, especialmente orbínidos, cirratúlidos y espiónidos, que contribuyeron en densidad, pero con poco aporte en biomasa o peso húmedo. Así mismo, se encontró un significativo incremento en densidad y biomasa de moluscos bivalvos. Ambas observaciones, se acompañan con una disminución del bacteriobentos filamentoso, *Candidatus Marithioploca* spp., el cual fue determinado al final del último trimestre, pero con escasa biomasa. También, se indica que los crustáceos anfípoda estuvieron presentes entre julio-agosto y septiembre, quizás en concordancia al igual de los moluscos por una mejor condición de la oxigenación del fondo. Es importante indicar que cambios en la oxigenación afectan en forma significativa la presencia de diferentes grupos presentes en el macrobentos. Los moluscos tienden a incrementarse en períodos oxigenados mientras el bacteriobentos filamentoso en condiciones de menor oxígeno y condiciones más reducidas con presencia de sulfuros.

Cambios en la comunidad bentónica también se observan, pero a escala interanual por efecto de El Niño y la variabilidad de la ZMO (Gutiérrez *et al*., 2008). Estudios previos sobre comunidades meiofaunales en Perú central han reportado la importancia de nematodos y foraminíferos como los grupos metazoario y protozoario, respectivamente, dominantes, tanto en la plataforma interna como en la externa (Cardich *et al*., 2015; Aramayo, 2018b); además, análisis batimétricos frente a Callao muestran que este patrón de dominancia numérica puede replicarse, especialmente a favor de los nematodos de vida libre, en sedimentos interceptados por la zona de mínimo oxígeno (ZMO) (Levin *et al*., 2002). Aunque una buena parte de los estudios para la meiofauna protozoaria ha sido realizada en períodos fríos (Mallon *et al*., 2012; Glock *et al*., 2013; Cardich *et al*., 2015), es decir, durante alta productividad primaria en superficie, y consecuente alta disponibilidad de alimento hacia el fondo, las respuestas comunitarias específicas (a nivel de ciertos taxones indicadores de cambio) observadas durante períodos cálidos también indican predominancia numérica de nematodos (varias familias como Desmodoridae, Chromadoridae, Comesomatidae), con relativamente pocas fluctuaciones en la distribución vertical (Levin *et al*., 2002; Aramayo *et al*., 2021). Los indicadores de cambios para esta comunidad parecen ser más de tipo intraespecífico (en las diferencias funcionales entre grupos y especies) que interespecífico (no exhiben el mismo comportamiento al ser comparados con grupos de mayor tamaño como la macrofauna). Por otro lado, la riqueza de taxones encontrada

en superficie (0-2 cm) es relativamente similar a previas evaluaciones en la misma área; sin embargo, son solo relativamente comparables debido al método de extracción empleado en el presente estudio. Aun así, la composición de taxones observada refleja la misma señal de prevalencia de ciertos grupos ya documentada en anteriores estudios, aunque sin llegar a características específicas de micro hábitat como las observadas en foraminíferos (Cardich *et al.*, 2015). Es necesario identificar respuestas más finas del ensamble fitoplanctónico y bentónico que nos permitirán comprender los cambios y como estos pueden afectar organismos y recursos en el ambiente.

Acoplamiento bento-pelágico

Durante el verano - otoño 2023, en el observatorio ambiental frente a Callao, es coherente con las condiciones ambientales del evento El Niño costero que reportó un bajo flujo de masa total (FMT) registrado. Al compararlo con los hallazgos de El Niño 2017, en la misma área de estudio, se observa diferencia ~20 veces mayor del FMT estimado en este estudio. Parte de esto se explica por los impactos diferentes que puede tener un evento, en el caso del acoplamiento bento pelágico asociado a las descargas de ríos, como sucedió en el 2017 cuando el río Rímac generó un aporte terrígeno significativo (Velazco *et al.*, 2021). Esto sugiere que el río Rímac posiblemente sea un factor importante que influye en el flujo de masa total en el área de estudio, debido a que el caudal registrado en marzo de 2017 fue ~2 veces mayor en comparación al caudal máximo registrado para marzo 2023, generando mayor impacto de la pluma de dispersión para ese año. Por su parte, se observa un decaimiento de 3 a 6 veces menos que los flujos de masa totales en condiciones normales. En relación a la contribución de pellets es entre 1,33 – 7,97% del flujo de masa total, relativamente menor en comparación con los registros en condiciones normales que oscilan entre 0,31 – 26,95% (Leigh *et al.*, 2023), o de la costa sur, el aporte de pellets fecales es 0 al 17% (Staresinic *et al.*, 1983). Centrándonos en la contribución de los pellets fecales de la costa central se observó que, en condiciones de Niño, el aporte es tres a ocho veces menor a las contribuciones de pellets fecales en las condiciones oceanográficas normales con lo cual se modifica significativamente el aporte de materia orgánica que subsidia los ambientes bentónicos y sus comunidades y explican la disminución de dichas comunidades.

5. CONCLUSIONES

El observatorio marino costero frente al Callao permitió identificar variaciones oceanográficas, químicas y biológicas asociadas al evento El Niño 2023. Disminución del afloramiento costero y una condición más costera, evidenciando cambios en nutrientes y productividad. El fitoplancton respondió a las variaciones oceanográficas, predominando diatomeas durante el afloramiento y fitoflagelados o nanoplancton en condiciones cálidas. Los cocolitofóridos mostraron adaptaciones a aguas cálidas con mayor pH, vinculadas al evento El Niño y al acercamiento de las ASS.

Cambios en la macrofauna bentónica reflejaron variaciones en la oxigenación y acoplamiento bentopelágico, indicando la influencia de las condiciones ambientales. Se identificaron grupos meiofaunales consumidores de diatomeas y depredadores, con dominancia de nematodos de vida libre entre el 86,2 % y el 95,3 %.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de las actividades de investigación del Proyecto: "Estudio Integrado del Afloramiento Costero frente a Perú", PPR 137 Investigaciones especializadas sobre los procesos oceanográficos físicos biogeoquímicos y la respuesta biológica a diferentes escalas, en beneficio del sector y del país en su conjunto, conducido desde la Dirección General de Oceanografía y Cambio Climático, y financiado por el Imarpe. Asimismo, se contó con el soporte financiero de los proyectos de Prociencia Contrato 045-2021-Fondecyt "Observatorio marino-costero con sensores inteligentes y de bajo costo para la investigación de estresores múltiples a largo plazo y alta frecuencia" y contrato PE501080369-2022-PROCIENCIA "Estresores marino-costeros - deficiencia de oxígeno y azufre - rol de la producción orgánica y remineralización en su variabilidad".

6. REFERENCIAS

Alvites Gutiérrez, D. A. (2016). *Variabilidad especial y calcificación de las comunidades de cocolitofóridos en el sistema de afloramiento frente a Callao-Perú* [Tesis de Maestría, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio UPCH. https://hdl.handle.net/20.500.12866/329

Aramayo, V., Romero, D., Quipúzcoa, L, Graco, M., Marquina, R., Solís, J. & Velazco, F. (2021). Respuestas de los bentos marinos frente a El Niño Costero 2017 en la plataforma continental de Perú central (Callao, 12°S). *Bol Inst Mar Perú*, *36*(2), 476–509. https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.349

Aramayo, V. (2018a). Abundancia meiofaunal en sedimentos arenosos de una bahía somera, costa central peruana. *Bol Inst Mar Perú*, *33*(1), 98-107. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3259

Aramayo, V. (2018b). Diversidad, densidad y distribución vertical de la meiofauna bentónica en sedimentos fangosos frente a Perú central (12°S). *Bol Inst Mar Perú*, *33*(1), 90-97. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3260

Balech, E. (1988). *Los Dinoflagelados del Atlántico Sudoccidental* (Publicaciones Especiales del Instituto Español de Oceanografía Nº 1). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Bentamy, A. & Croize Fillon, D. (2012). Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements. *International Journal of Remote Sensing*, *33*(6), 1729-1754. http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.600348

Bentamy, A., Katsaros, K. B., Drennan, W. M. & Forde, E. B. (2002). Daily surface wind fields produced by merged satellite data. *Gas Transfer at Water Surfaces*, *127*, 343-349. https://doi.org/10.1029/GM127p0343

Calienes, R., Guillén, O. & Lostaunau, N. (1985). Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frente a la costa peruana. *Bol Inst Mar Perú*, *10(*1), 6-12. https://hdl.handle.net/20.500.12958/1051

Calienes, R. (2014). Producción primaria en el ambiente marino del Pacífico sudeste, Perú, 1960-2000. *Bol Inst Mar Perú*, *29*(1-2), 8-306. https://hdl.handle.net/20.500.12958/2302

Carlson, C. A. & Hansell, D. A. (2014). DOM Sources, Sinks, Reactivity, and Budgets. En D. A. Hansell & C. A. Carlson (Eds.), *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* (2ª ed., Cap. 3, pp. 65-126). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405940-5.00003-0

Cardich, J., Gutiérrez, D., Romero, D., Pérez, A., Quipúzcoa, L., Marquina, R., Yupanqui, W., Solis, J., Carhuapoma, W., Sifeddine, A. & Rathburn, A. (2015). Calcareous benthic foraminifera from the upper central Peruvian margin: control of the assemblage by pore water redox and sedimentary organic matter. *Marine Ecology Progress Series*, *535*, 63–87. https://doi.org/10.3354/meps11409

Carrit, D. E. & Carpenter, J. H. (1966). Comparison and evaluation of currently employed modification of the Winkler method for determining dissolved oxygen in sea water; A NASCO report. *Journal of Marine Research*, *24*(3), 286-318. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/1077

Chavez, F. P. & Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, *83*, 80–96. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023a). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú FEBRERO 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°2, febrero de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8539

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023b). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú MARZO 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°3, marzo de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8540

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023c). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú al 11 de ABRIL 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°4, al 11 de abril de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8541

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023d). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú al 28 de ABRIL 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°5, al 28 abril de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8542

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023e). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú al 21 de JULIO 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°10 al 21 julio de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8547

Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" [Enfen]. (2023f). *Diagnóstico Climático y Previsión de El Niño-Oscilación del Sur en el Perú al 11 de AGOSTO 2023* (Informe Técnico Enfen. Año 9, N°11 al 11 agosto de 2023). https://hdl.handle.net/20.500.12958/8548

Correa, D., Vásquez, L. & Gutiérrez, D. (2018). *Propuesta de escala de vientos para la zona costera y oceánica frente a Perú* (Informe interno). Instituto del Mar del Perú.

Echevin, V., Aumont, O., Ledesma, J. & Flores, G. (2008). The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peruvian upwelling system: a modelling study. *Progress in Oceanography*, *79*(2–4), 167–176. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.026

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Díaz, E., Tam, J., Anculle, T., Ledesma, J. & Gutiérrez, D. (2021). Diferencias entre los impactos en la costa peruana de los eventos ENOS cálidos y El Niño Costero 2017: vientos, afloramiento, productividad y anchoveta. *Bol Inst Mar Perú*, *36*(2), 329-348. https://hdl.handle.net/20.500.12958/4243

Flores, E., Mendoza, U., Callbeck, C. M., Díaz, R., Aguirre-Velarde, A., Böttcher, M. E., Merma-Mora, L., Moreira, M., Saldarriaga, M. S., Silva-Filho, E. V., Albuquerque, A. L., Pizarro-Koch, M. & Graco, M. (2023). Attenuation of wind intensities exacerbates anoxic conditions leading to sulfur plume develop-

ment off the coast of Peru. *PLoS ONE*, *18*(8), e0287914. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287914

French Institute for Ocean Science [IFREMER]. (2023). *Base de datos de vientos del dispersómetro ASCAT, accesibles a través del Centre de Recherche et d'Exploitation Satellitaire (CERSAT)*.

Friederich, G. E., Ledesma, J., Ulloa, O. & Chavez, F. (2008). Air–sea carbon dioxide fluxes in the coastal southeastern tropical Pacific. *Progress in Oceanography, 79*(2-4), 156-166. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.001

Gerlach, S. A. & Riemann, F. (1973). *The Bremerhaven checklist of aquatic nematodes; a catalogue of Nematoda Adenophorea excluding the Dorylaimida*. Kommissionsverlag Franz Leuwer.

Glock, N., Schönfeld, J., Eisenhauer, A., Hensen, C., Mallon, J. & Sommer, S. (2013). The role of benthic foraminifera in the benthic nitrogen cycle of the Peruvian oxygen minimum zone. *Biogeosciences*, *10*(7), 4767-4783. https://doi.org/10.5194/bg-10-4767-2013

Graco, M., Correa, D., García, W. & Sarmiento, M. (2016). Impactos del ENSO en la biogeoquímica del sistema de afloramiento frente a Perú central, febrero 2013-diciembre 2015. *Boletín Trimestral Oceanográfico*, *2*(1), 2-6. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3039

Graco, M., Purca, S., Dewitte, B., Castro, C. G., Morón, O., Ledesma, J., Flores, G. & Gutiérrez, D. (2017). The OMZ and nutrient features as a signature of interannual and low-frequency variability in the Peruvian upwelling system. *Biogeosciences*, *14*, 4601–4617. https://doi.org/10.5194/bg-14-4601-2017

Graco, M., Anculle, T., Aramayo, V., Bernales, A., Carhuapoma, W., Correa, D., Fernández, E. J. C., García, W., Ledesma, J., Marquina, R., Quipúzcoa, L., Romero, D., Sarmiento, M. & Solís, J. (2019). Análisis de las condiciones oceanográficas y biológicas del afloramiento costero frente a Callao en períodos contrastantes durante el 2018. *Bol Inst Mar Perú*, *34*(2), 519-543. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3389

Graco, M., Anculle, T., Aramayo, V., Bernales, A., Carhuapoma, W., Correa, D., Fernández, E. J. C., Ledesma, J., Marquina, R., Quipúzcoa, L., Quispe, D., Robles, C., Romero, D., Sarmiento, M. & Solís, J. (2021). Condiciones oceanográficas y biológicas del afloramiento costero en periodos contrastantes durante 2019. Callao (12°S) y Pisco (14°S). Informe final cruceros intensivos oceanográficos (CRIO). *Inf Inst Mar Perú*, *48*(3), 393-413. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3589

Gutiérrez, D., Enríquez, E., Purca, S., Quipúzcoa, L., Marquina, R., Flores, G. & Graco, M. (2008). Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response. *Progress in Oceanography*, *79*, 177-189. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.025

Hansell, D. A., Carlson, C. A., Repeta, D. J. & Schlitzer, R. (2009). Dissolved organic matter in the Ocean: controversy stimulates new insights. *Oceanography*, *22*(4), 202-211. https://www.jstor.org/stable/24861036

Hasle, G. R. & Syvertsen, E. E. (1996). Marine diatoms. En C. R. Tomas (Ed.), *Identifying Marine Phytoplankton* (pp. 5-385). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-693018-4.X5000-9

Hodda, M. (2022). Phylum Nematoda: a classification, catalogue and index of valid genera, with a census of valid species. *Zootaxa*, *5114*(1), 001–289. https://doi.org/10.11646/zootaxa.5114.1.1

Hope, W. D. & Murphy, D. G. (1972). A Taxonomic Hierarchy and Checklist of the Genera and Higher Taxa of Marine Nematodes. *Smithsonian Contributions to Zoology*, (137), 1-101. http://dx.doi.org/10.5479/si.00810282.137

Karlson, B., Cusack, C. & Bresnan E. (Eds.). (2010). *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. https://dx.doi.org/10.25607/OBP-1371

James, F. C. (1968). A more precise definition of Bergmann's Rule. *Amer. Zool.*, *8*, 815-816.

Ledesma, J., Tam, J., Graco, M., León, V., Flores G. & Morón, O. (2011). Caracterización de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente a la costa peruana entre 3°N y 14°S, 1999- 2009. *Bol Inst Mar Perú*, *26*(1-2). 49-57. https://hdl.handle.net/20.500.12958/2160

Ledesma, J., Graco, M., Tam, J., Díaz, K., Anculle, T., García, W., Bernales, A., Quispe, D., Espinoza, D., Carhuapoma, W. & Gutiérrez, D. (2021). Efectos de El Niño Costero 2017 sobre la oxigenación, fertilidad y productividad del mar frente a las costas del Perú. *Bol Inst Mar Perú*, *36*(2), 409-427. https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.345

Leigh, B., Aramayo, V., Mendoza, U., Velazco, F., Kiko, R., Ayón, P., Fernández, E. & Graco, M. (2023). Total Mass Flux in the Northern Humboldt Current System: Rates and Contribution Sources from Central Peru (12° S). *Hydrobiology*, *2*(4). https://doi.org/10.3390/hydrobiology2040035

León, V., Graco, M., Paulmier, A., Flores, G., Ledesma, J., Morón, O., Croot, P. & Tenorio, J. (2011). pH como un trazador de la variabilidad biogeoquímica en el Sistema de Humboldt. *Bol Inst Mar Perú*, *26*(1-2), 19-24. https://hdl.handle.net/20.500.12958/2156

Levin, L. A., Gutiérrez, D., Rathburn, A. E., Neira, C., Sellanes, J., Muñoz, P., Gallardo, V. & Salamanca, M. (2002). Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997-98 El Niño. *Progress in Oceanography 53*(1), 1-27. https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00022-8

Mallon, J., Glock, N. & Schönfeld, J. (2012). The response of benthic foraminifera to low-oxygen conditions of the Peruvian oxygen minimum zone. En *ANOXIA: Evidence for eukaryote survival and paleontological strategies* (pp. 305-321). Dordrecht: Springer Netherlands.

Mendoza, U., Ayón, P., Leigh, B., Oyola, W., Bach, L., Caquineau, S., Bouloubassi, I., Velazco, F., Turcq, B., Sifeddine, A., Chang, F., Quesquén, R. & Graco, M. (2022). Procedimiento para división y retirada de nadadores-pellets fecales de muestras de trampa de sedimento colectadas en el sistema de afloramiento del norte de la Corriente de Humboldt. *Inf Inst Mar Perú*, *49*(2), 315-322. https://hdl.handle.net/20.500.12958/4767

Morón, O. (2000). Características del ambiente marino frente a la costa peruana. *Bol Inst Mar Perú*, *19*(1-2), 179-204. https://hdl.handle.net/20.500.12958/1008

National Centers for Environmental Information [NOAA]. (2023). *Base de datos de vientos del Modelo Global Forecast System (GFS)*.

Penven, P., Echevin, V., Pasapera, J., Colas, F. & Tam, J. (2005). Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru current system: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research*, *110*, C10021. https://doi.org/10.1029/2005JC002945

Platt, H. M. & Warwick, R. M. (1988). *Free Living Marine Nematodes, Part II: British Chromadorids*. Cambridge University Press.

Rojas de Mendiola, B., Ochoa, N. & Gómez, O. (1981). Los dinoflagelados como indicadores biológicos de masas de agua, fenómeno El Niño 1972. En *Seminario sobre indicadores Biológicos del Plancton* (pp. 54-73). Inst Mar Perú-UNESCO.

Romero, D., Merma-Mora, L., Marquina, R., Flores, G., Quipúzcoa, L., Solís, J. & Cardich, J. (2023). Living benthic foraminifera from El Ferrol Bay: A pollution critical area in northern-central Peru. *Rev. peru biol., 30*(2), 2-12. http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v30i2.24425

Sánchez, S., Delgado, E., Bernales, A., Jacobo, N., Franco, A. & Correa, D. (2021). Floraciones algales nocivas en la costa peruana durante El Niño Costero 2017 y su relación con las condiciones ambientales. *Bol Inst Mar Perú*, *36*(2), 452-462. https://hdl.handle.net/20.500.12958/4237

Sommer, U., Peter, K. H., Genitsaris, S. & Moustaka-Gouni, M. (2017). Do marine phytoplankton follow Bergmann's rule sensu lato? *Biological Reviews*, *92*, 1011–1026. https://doi.org/10.1111/brv.12266

Staresinic, N., Farrington, J. W., Gagosian, R. B., Clifford, C. H. & Hulburt, E. M. (1983). Downward transport of particulate matter in the Peru coastal upwelling: role of the anchoveta, *Engraulis ringens*. En E. Suess & J. Thiede (Eds.), *Coastal Upwelling Its Sediment Record* (NATO Conference Series, Vol 10B, pp. 225-240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6651-9_12

Velazco, F., Mendoza, U., Solís, J., Fernández, E., Caquineau, S., Sifeddine, A., Graco, M., Bouloubassi, I., Turcq, B., Leigh, B., Sócola, M., Carhuapoma, W., Carrasco, E. & Gutiérrez, D. (2021). Flujos de material particulado y formación de una lámina de sedimentos en la plataforma continental interna frente al Callao durante El Niño Costero 2017. *Bol Inst Mar Perú*, *36*(2), 428-451. https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.346

Zuta, S. & Guillén, O. (1970). Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Bol Inst Mar Perú*, *2(5)*, 157-324. https://hdl.handle.net/20.500.12958/949

Zuta, S. & Guillén, O. (1983). Informe de avance del Programa Oceanográfico de Erfen en el Perú, III Reunión del Comité Científico de Erfen (Cali, 16-19 de febrero de 1983). En *El Crucero del BIC /Humboldt 8301-2 y algunas características de "El Niño" en enero y febrero 1983*. *Bol. ERFEN*,*5*, 6-8.