

CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y QUÍMICAS EN LA COLUMNA ADYACENTE A LA DORSAL DE NAZCA

OCEANOGRAPHIC AND CHEMICAL CONDITIONS IN THE WATER COLUMN OVERLYING TO THE NAZCA RIDGE

Wilson Carhuapoma¹ Michelle Graco¹ Luis Vásquez² Tony Anculle¹
Úrsula Mendoza¹ Ernesto Fernández¹ Federico Velazco²

<https://doi.org/10.53554/boletin.v38i1.380>

RESUMEN

CARHUAPOMA, W., GRACO, M., VÁSQUEZ, L., ANCULLE, T., MENDOZA, U., FERNÁNDEZ, E. & VELAZCO, F. (2023). *Condiciones oceanográficas y químicas en la columna adyacente a la Dorsal de Nazca*. *Bol Inst Mar Perú*, 38(1), 21-34.- Frente al litoral peruano en la Región Ica, se encuentra la Dorsal de Nazca, ecosistema de fondos profundos con extensión de 1 000 km de largo y 300 km de ancho que alberga gran biodiversidad y, que forma parte de la Reserva Nacional del mismo nombre. Es importante contar con mayor información biológica y oceanográfica, por lo cual durante el verano 2020 se coordinó con la Dirección de Hidrografía y Navegación de Perú (DHN) y la tripulación del BAP Carrasco un primer estudio para caracterizar las condiciones oceanográficas, químicas y geológicas. Se analizan las condiciones de nutrientes, oxígeno disuelto y productividad, así como su relación con las masas de agua y las variables oceanográficas en nueve estaciones hidrográficas localizadas sobre la Dorsal de Nazca, alcanzando 2 800 m de profundidad máxima. El estudio permitió identificar las masas de agua que influyen en el sistema como son: Aguas Superficiales Subtropicales (ASS), Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS), Aguas Antárticas Intermedias (AAI) y Aguas Profundas del Pacífico (APP). Cada masa de agua presentó condiciones de temperatura y salinidad características, coincidentes con estudios previos. Las ASS presentaron alto contenido de oxígeno disuelto, bajos nutrientes y alta productividad. Condiciones de mayor oxígeno disuelto se presentaron en los primeros 30 m de profundidad, con la base de la oxiclina en ~30 m. Por debajo de 50 m y hasta 750 m se distribuyó la zona mínima de oxígeno-ZMO (< 0,5 mL/L) coincidiendo con la distribución de las AESS; por debajo de 1 500 m las concentraciones se incrementaron alcanzando valores cercanos a 2 mL/L asociadas a aguas profundas. En el caso de los nutrientes (fosfatos, silicatos y nitratos) mientras que las aguas superficiales presentaron concentraciones relativamente bajas relacionadas al consumo fitoplanctónico, con la profundidad esas concentraciones se incrementaron, asociadas con las AAI y APP.

PALABRAS CLAVE: Dorsal de Nazca, Perú, nutrientes, masas de agua, variables oceanográficas

ABSTRACT

CARHUAPOMA, W., GRACO, M., VÁSQUEZ, L., ANCULLE, T., MENDOZA, U., FERNÁNDEZ, E. & VELAZCO, F. (2023). *Oceanographic and chemical conditions in the water column overlying to the Nazca Ridge*. *Bol Inst Mar Perú*, 38(1), 21-34.- The Nazca Ridge is a deep-sea ecosystem spanning 1,000 km in length and 300 km in width as well as forming part of National Reserve of the same name. This area, located off the coast of the Ica Region (Peru), is renowned for its remarkable biodiversity. To enhance our understanding of the biological and oceanographic characteristics, a comprehensive study was conducted during the summer of 2020 in collaboration with the Peruvian Directorate of Hydrography and Navigation (DHN) and the crew of BAP Carrasco. We aimed to characterize the oceanographic, chemical, and geological conditions in the region. The investigation focused on analyzing nutrient levels, dissolved oxygen, productivity, and their correlation with water masses and oceanographic variables. A total of nine hydrographic stations were established along the Nazca Ridge, reaching depths of up to 2,800 m. The study revealed the influence of various water masses on the system, including Subtropical Surface Waters (SSW), Equatorial Subsurface Waters (ESSW), Antarctic Intermediate Waters (AAIW), and Pacific Deep Waters (PDW). Each water mass exhibited distinct temperature and salinity characteristics consistent with previous research. Notably, SSW displayed high dissolved oxygen levels, low nutrient concentrations, and elevated productivity. Dissolved oxygen was found to be highest within the uppermost 30 m, with the base of the oxycline occurring around 30 m. Between 50 m and 750 m, the oxygen minimum zone (OMZ) (<0.5 mL/L) corresponded to the distribution of ESSW, while concentrations increased below 1,500 m, nearing 2 mL/L in association with deep waters. Nutrient concentrations, including phosphates, silicates, and nitrates, were relatively low in surface waters due to phytoplankton consumption. However, concentrations increased with depth, particularly in relation to AAIW and PDW.

KEYWORDS: Nazca Ridge, Perú, nutrients, water masses, oceanographic variables

1 IMARPE, DGIOCC, Área Funcional de Investigaciones en Oceanografía Química y Geología. wcarhuapoma@imarpe.gob.pe

2 IMARPE, DGIOCC, Área Funcional de Investigaciones en Oceanografía Física

1. INTRODUCCIÓN

La cordillera submarina denominada Dorsal de Nazca, se ubica aproximadamente a 105 km de distancia de la costa de Ica (16°S, 77°W) siendo uno de los accidentes geográficos submarinos más relevantes del Pacífico Sudoriental. A pesar de su gran extensión (1 000 km de largo y 300 km de ancho (WOODS & OKAL, 1994) existe escasa información biológica y oceanográfica. Dado su potencial y biodiversidad, el Perú ha establecido un área marina protegida que abarca sus fondos profundos y aguas adyacentes. En ese contexto, los estudios realizados por el BAP Carrasco entre el 23 y 24 de marzo 2020 que fueron coordinados con profesionales del IMARPE, permitieron conocer más sobre su batimetría, las condiciones físicas y químicas de la columna de agua y de esta forma contar con líneas base del hábitat que influyen y determinan a las comunidades biológicas existentes.

La distribución espacial y temporal de las propiedades del agua de mar (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) interactúa con la topografía del fondo, generando diferentes condiciones en las dinámicas oceanográficas de los montes submarinos (GÁLVEZ-LARACH, 2009). Asimismo, las masas de agua, los procesos biogeoquímicos y el acoplamiento bento-pelágico impactan en la ecología del ambiente. En este contexto el presente estudio busca incrementar la información oceanográfica básica sobre la distribución vertical de variables físicas y químicas en la zona del dominio marítimo peruano de la Dorsal de Nazca, sentando las bases para otros estudios sobre aspectos necesarios que garanticen la conservación de sus ecosistemas considerados únicos, biodiversos y frágiles. Este estudio igualmente busca contribuir en ampliar el conocimiento de las condiciones de vida en los fondos marinos profundos del Perú.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Dorsal de Nazca forma una cordillera submarina, la cual intersecta la fosa marina al suroeste del Perú entre los 14°S y 17°S, dentro de aguas jurisdiccionales peruanas (HAGEN & MOBERLY, 1994), de tal manera que se localiza a más

1. INTRODUCTION

The undersea mountain range known as the Nazca Ridge is situated approximately 105 km off the coast of Ica (16°S, 77°W), making it one of the most prominent submarine geographical features in the Southeastern Pacific. Despite its extensive size, spanning 1,000 km in length and 300 km in width (WOODS & OKAL, 1994) there is a scarcity of biological and oceanographic information available. Recognizing its potential and rich biodiversity, Peru has established a marine protected area encompassing the deep-sea habitats and adjacent waters. In this context, the studies conducted by the BAP Carrasco in coordination with IMARPE's staff, between March 23 and 24, 2020, have yielded valuable insights into the bathymetry, physical, and chemical conditions of the water column. These investigations have provided essential baseline data for understanding the habitats that influence and shape the existing biological communities.

The spatial and temporal distribution of seawater properties such as temperature, salinity, and dissolved oxygen interact with the seafloor topography, giving rise to diverse oceanographic dynamics within seamounts (GÁLVEZ-LARACH, 2009). Furthermore, water masses, biogeochemical processes, and benthic-pelagic coupling exert a profound influence on the ecological aspects of the environment. In this regard, our work aims to enhance the understanding of the basic oceanographic information concerning the vertical distribution of physical and chemical variables within the Peruvian maritime domain of the Nazca Ridge. The findings of this research endeavor will serve as a fundamental basis for future investigations addressing the necessary aspects for conserving these unique, biodiverse, and delicate ecosystems. Additionally, this study seeks to contribute to the broader knowledge of the living conditions within the Peruvian deep-sea habitats.

2. MATERIALS AND METHODS

Study area

The Nazca Ridge forms an undersea mountain range that intersects the marine trench off the southwest coast of Peru, between 14°S and 17°S, within Peruvian jurisdictional waters (HAGEN

de 100 km de la costa frente a la Región Ica. Tiene extensión de 1 000 km de largo, ancho máximo de 300 km y espesor cortical promedio de 18 ± 3 km (HAGEN & MOBERLY, 1994; WOODS & OKAL, 1994; TASSARA, GÖTZE, SCHMIDT & HACKNEY, 2006). Según datos obtenidos en la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO, por sus siglas en inglés), la dorsal en promedio está 1 500 m sobre el fondo marino, el mismo que tiene 4 000 m de profundidad, está compuesta por gran cantidad de montes submarinos de origen volcánico con profundidades de hasta 4 000 m. Asimismo, se encuentra en la zona de influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste (ASPS), que se extiende sobre toda la cuenca oceánica del Pacífico Sur, teniendo variabilidad anual y decadal (ANCAPICHÚN & GARCÉS-VARGAS, 2015).

Recolección de datos y Muestreo

A fines de la Campaña ANTAR XXVII en el verano 2020, el BAP Carrasco a cargo de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra de Perú, y en coordinación con el IMARPE, llevó a cabo una campaña de recolección de información en la región de la Dorsal de Nazca. En esa campaña se efectuó un recorrido suroriental con dirección paralela a la costa de sur a norte obteniéndose información batimétrica de la zona, lo cual permitió identificar dos montes submarinos, cuyas crestas se encuentran a 1870 y 1903 m de profundidad. A lo largo de la transecta se realizaron lances de CTDO *Sea Bird Electronics*, Inc. modelo 1386 SBE 19 V2+ y de la roseta oceanográfica provista con botellas Niskin de 5 L de capacidad, obteniéndose información de 9 estaciones hidrográficas (E-1 hasta E-9, Fig. 1).

Los datos de profundidad, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto fueron obtenidos a partir de los lances de CTDO. En las inmediaciones de los montes submarinos, en 6 de las 9 estaciones, se recolectaron muestras de agua de mar para el análisis de nutrientes con la roseta oceanográfica a profundidades estándar (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1200, 1500, 1700 y 2000 m). Para el análisis de nutrientes, se utilizaron botellas de polietileno blanco de 250 mL, se colectaron 102 muestras las que fueron congeladas para su preservación hasta sus análisis en el laboratorio de la Sede central del IMARPE. La metodología para el análisis de nutrientes es la descrita por STRICKLAND y PARSONS (1972).

& MOBERLY, 1994). Situated more than 100 km offshore from the Ica Region, the Nazca Ridge stretches for approximately 1,000 km in length, with a maximum width of 300 km and an average crustal thickness of 18 ± 3 km (HAGEN & MOBERLY, 1994; WOODS & OKAL, 1994; TASSARA, GÖTZE, SCHMIDT & HACKNEY, 2006). According to data from the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), this ridge rises an average of 1,500 m above the seafloor, which plunges to depths of 4,000 m, featuring a multitude of volcanic seamounts reaching depths of up to 4,000 m. The Nazca Ridge is positioned within the influence of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone (SPSA), which extends throughout the entire South Pacific Ocean basin, displaying annual and decadal variability (ANCAPICHÚN & GARCÉS-VARGAS, 2015).

Data collection and Sampling

During the summer of 2020, as part of the ANTAR XXVII Campaign, the BAP Carrasco, under the supervision of the Directorate of Hydrography and Navigation (DHN) of the Peruvian Navy, and in collaboration with IMARPE, conducted an information collection campaign in the region of the Nazca Ridge. During this campaign, a southeastward route running parallel to the coast from south to north was undertaken, gathering bathymetric data of the area, which led to the identification of two seamounts, with their crests located at depths of 1,870 and 1,903 meters. Along the transect, CTDO casts were performed using a Sea Bird Electronics, Inc. model 1386 SBE 19 V2+, and hydrographic sampling was carried out using an oceanographic rosette equipped with 5 L Niskin bottles. Information was collected from 9 hydrographic stations (E-1 to E-9, Fig. 1).

Depth, temperature, salinity, and dissolved oxygen data were obtained through CTDO casts. At six out of the nine stations near the seamounts, seawater samples were collected using the rosette oceanographic sampler, specifically at standard depths (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1200, 1500, 1700, and 2000 m). For nutrient analysis, 250 mL white polyethylene bottles were utilized. A total of 102 samples were collected, frozen for preservation, and subsequently analyzed at the IMARPE headquarters laboratory. The nutrient analysis followed the methodology described by STRICKLAND & PARSONS (1972).

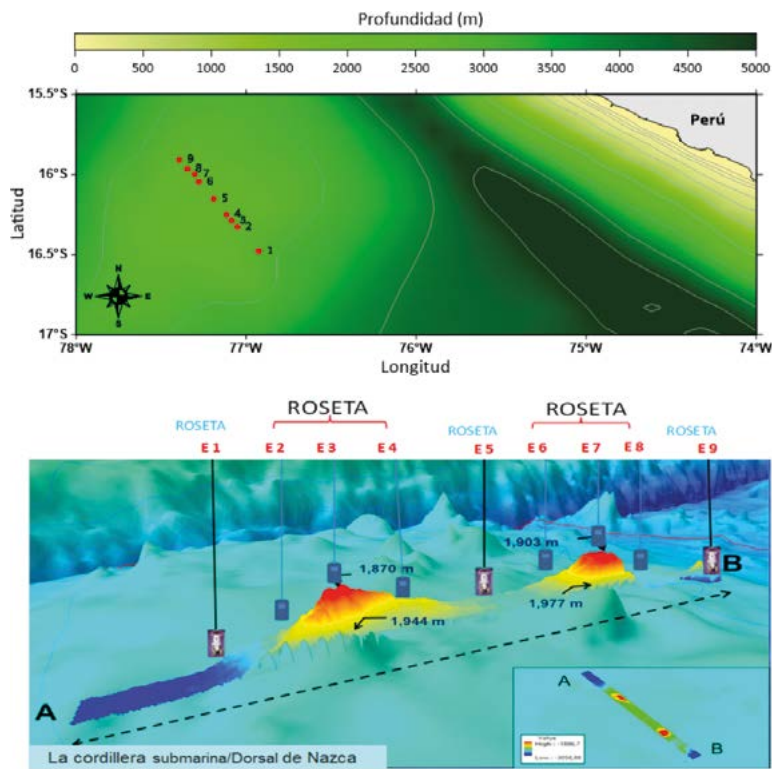


Figura 1.- Carta de Posiciones del estudio de la Dorsal de Nazca
 Figure 1. Positions Chart of the Nazca Ridge Study

En el procesamiento de los datos hidrográficos se utilizó el programa provisto por el fabricante del CTD, *SBE Data Processing*, obteniéndose datos continuos de presión, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, además de las variables derivadas como salinidad y densidad con resolución de 1 metro. Para el análisis y visualización de datos se utilizaron los programas SURFER versión 15 y el *Ocean Data view* (ODV).

También se estimaron las concentraciones de clorofila-*a* mediante el procesamiento de imágenes satelitales diarias de marzo usando los datos del satélite MODIS y se calcularon las respectivas anomalías.

3. RESULTADOS

CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS físicas

Masas de agua

A partir de las mediciones de temperatura y salinidad se construyó un diagrama T-S (Fig. 2) que permitió identificar las diferentes masas de agua en la zona (Tabla 1).

The SBE Data Processing software provided by the CTD manufacturer was employed for hydrographic data processing. This yielded continuous data of pressure, temperature, conductivity, and dissolved oxygen, along with derived variables such as salinity and density, with a resolution of 1 meter. The SURFER version 15 and Ocean Data View (ODV) software programs were used for data analysis and visualization.

The concentrations of chlorophyll-*a* were also estimated by processing daily satellite images from March using data from the MODIS satellite. The respective anomalies were calculated as well.

3. RESULTS

PHYSICAL OCEANOGRAPHIC CONDITIONS

Water masses

A T-S diagram was constructed from the temperature and salinity measurements (Fig. 2) in order to identify the different water masses in the area (Table 1).

Tabla 1.- Características de las masas de agua en la dorsal de Nazca de acuerdo a lo encontrado en este estudio y comparado con estudio previos

Table 1. Characteristics of the water masses on the Nazca Ridge as found in this study and compared to previous ones

Masas de agua Water masses		En este estudio In this study	(Grados <i>et al.</i> , 2018)	(Zuta y Guillén, 1970)	(Silva <i>et al.</i> , 2009)
ASS	T	> 16	19-23,5	>17	>18
	S	35,06-35,33	>35,4	>35,1	>35
AESS	T	7,1-13,7	8-14	13-15	12,5
	S	34,55-34,96	34,6-35	34,9-35,1	34,9
AAI	T	3-6,6	4-7	4-7	3
	S	34,51-34,58	34,5-34,6	34,45-34,6	~34,55
APP	T	< 3,2			< 3
	S	34,58-34,67			>34,5

Las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) se distribuyeron aproximadamente hasta 30 m de profundidad. Los intervalos de salinidad y temperatura encontrados coinciden con los valores reportados por SILVA, ROJAS y FEDELE (2009) y ZUTA y GUILLÉN (1970). Luego se identificaron Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) entre 100 y 600 m de profundidad que abarcan la mayor parte de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO), así como una pequeña capa de Aguas Intermedias del Pacífico Sur Este-AIPSE (SCHNEIDER, FUENZALIDA, RODRÍGUEZ-RUBIO, GARCÉS-VARGAS & BRAVO, 2003); para ambas masas de agua los intervalos de salinidad y temperatura coinciden con lo reportado por GRADOS, CHAIGNEAU, ECHEVIN y DOMINGUEZ (2018). Por debajo de 700 m y hasta 1 500 m se ubicaron las Aguas Antárticas Intermedias (AAI) con intervalos de temperatura y salinidad que coinciden con lo reportado por GRADOS *et al.* (2018) y finalmente las Aguas Profundas del Pacífico (APP) por debajo de 1 500 m con intervalos de temperatura y salinidad que coinciden con lo reportado por SILVA *et al.* (2009) (Fig. 2).

Subtropical Surface Waters (SSW) were distributed up to approximately 30 m in depth. The observed salinity and temperature intervals align with the values reported by SILVA, ROJAS & FEDELE (2009) and ZUTA & GUILLÉN (1970). Moving deeper, the Equatorial Subsurface Waters (ESSW) were identified between 100 and 600 m in depth, encompassing the majority of the Oxygen Minimum Zone (OMZ), along with a thin layer of East South Pacific Intermediate Waters (ESPIW) (SCHNEIDER, FUENZALIDA, RODRÍGUEZ-RUBIO, GARCÉS-VARGAS & BRAVO, 2003). The salinity and temperature ranges for both water masses correspond to those documented by GRADOS, CHAIGNEAU, ECHEVIN & DOMINGUEZ (2018). Below 700 m and up to 1,500 m, the Antarctic Intermediate Waters (AAIW) occurred, exhibiting temperature and salinity intervals consistent with the findings of GRADOS *et al.* (2018). Finally, the Pacific Deep Waters (PDW) were found below 1,500 m, displaying temperature and salinity intervals in agreement with the data reported by SILVA *et al.* (2009) (Fig. 2).

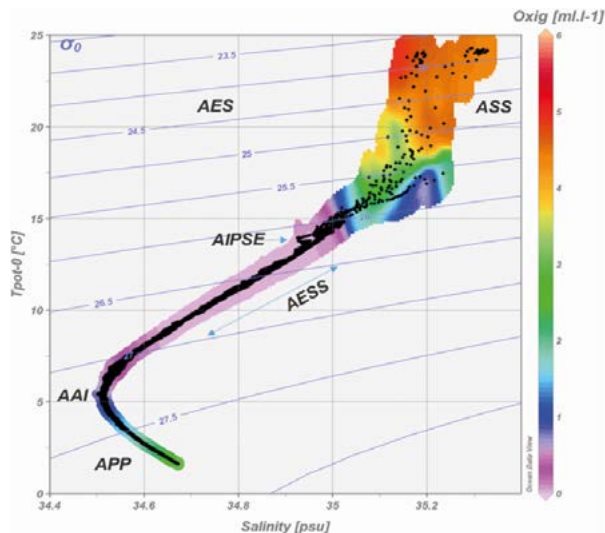


Figura 2.- Masas de agua en la Dorsal de Nazca
Figure 2. Water masses on the Nazca Ridge

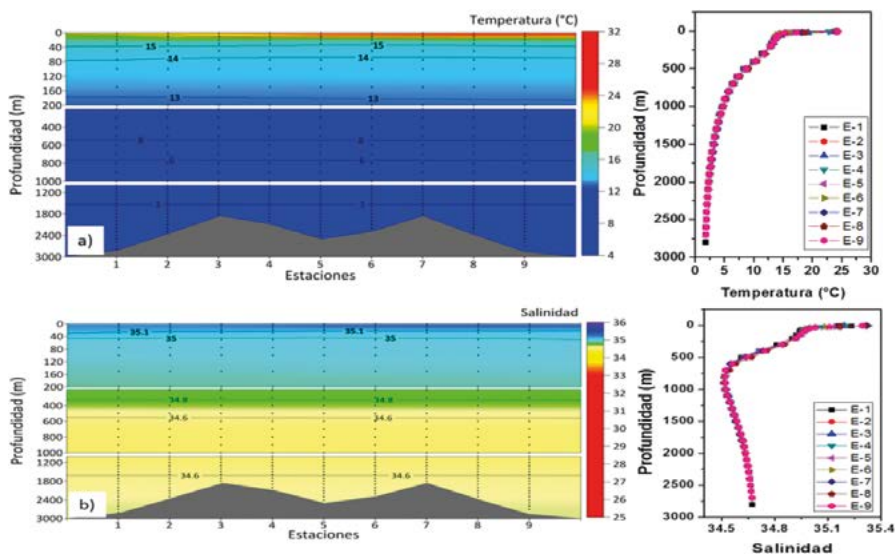


Figura 3.- Distribución vertical a) temperatura y b) salinidad en la Dorsal de Nazca separada por profundidades

Figure 3. Vertical distribution a) temperature and b) salinity at the Nazca Ridge separated by depths

Temperatura y salinidad

La temperatura varió desde 24,3 °C en superficie hasta 1,8 °C en fondo y la salinidad desde 35,32 en superficie hasta 34,50 en el fondo (Fig. 3). La temperatura y salinidad mostraron presencia de una capa estratificada desde superficie hasta 40-50 m de profundidad con termoclina bien marcada en todas las estaciones (Fig. 3a). Las isotermas presentaron distribución horizontal casi paralela a la superficie, ubicándose la de 15 °C sobre ~50 m de profundidad y la de 10 °C a 500 m. Por debajo de 1 000 m la distribución de temperaturas fue muy homogénea (gradiente de aproximadamente 0,003 °C/m). La temperatura más baja fue de 1,82 °C a 2 800 m de profundidad (Fig. 3a).

En cuanto a la salinidad, se observó valores mayores a 35 sobre 40 m de profundidad y luego disminución progresiva hasta 34,51 a 800 m, incrementándose ligeramente hasta 34,67 a 2800 m de profundidad (Fig. 3b). La distribución de temperatura y salinidad mostró la influencia de las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS, aguas cálidas y de alta salinidad) sobre los 25 m de profundidad mientras que entre 100 y 600 m se ubicaron las AESS, abarcando gran parte de la ZMO. En la capa contigua, entre 700 y ~1 500 m se ubicaron valores de salinidad alrededor de 34,51 asociados a las Aguas Antárticas Intermedias (AAI). La capa por debajo de 1 500 m de profundidad, asociada al hábitat del fondo y

Temperature and salinity

The temperature ranged from 24.3 °C at the surface to 1.8 °C at the bottom, while salinity varied from 35.32 at the surface to 34.50 at the bottom (Fig. 3). Both temperature and salinity showed the presence of a stratified layer extending from the surface to a depth of 40-50 m, with a well-defined thermocline at all stations (Fig. 3a). The isotherms exhibited a nearly parallel horizontal distribution near the surface, with the 15 °C isotherm situated at approximately 50 m in depth and the 10 °C isotherm at 500 m. Below 1,000 m, temperature distribution was notably uniform, with a gradient of approximately 0.003 °C/m. The lowest temperature recorded was 1.82 °C at a depth of 2,800 m (Fig. 3a).

Regarding salinity, values higher than 35 were observed down to a depth of 40 m, followed by a gradual decrease to 34.51 at 800 m. There was a slight increase to 34.67 at a depth of 2,800 m (Fig. 3b). The distribution of temperature and salinity indicated the influence of the Subtropical Surface Waters (SSW), characterized by warm waters with high salinity, within the top 25 m. Between 100 and 600 m, the Equatorial Subsurface Waters (ESSW) occurred, covering a significant portion of the Oxygen Minimum Zone (OMZ). In the adjacent layer, ranging from 700 to ~1,500 m, salinity values around 34.51 were observed, associated with the presence of the Antarctic Intermediate Waters (AAIW). Below a depth of 1,500 m, which

relacionada a los montes submarinos explorados, se caracterizó por presentar temperaturas menores a 3,2 °C y salinidades ligeramente mayores a 34,58 asociado a la presencia de las APP (Fig. 2).

CONDICIONES QUÍMICAS

Oxígeno disuelto y ZMO

Las concentraciones de oxígeno disuelto se presentan en la figura 4. En superficie y aproximadamente hasta 40 m de profundidad, se observaron los mayores valores de oxígeno (> 4 mL/L). La base de la oxiclina se localizó sobre 40 m de profundidad, en tanto que los límites superior e inferior de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), definidos por la isoxígena de 0,5 mL/L, se localizaron a 50 m y 750 m de profundidad, respectivamente. Por debajo de esta profundidad el contenido de oxígeno disuelto se incrementó paulatinamente, alcanzando un valor de 2 mL/L a 1800 m y de 3 mL/L a 2700 m.

Nutrientes: Fosfatos, Silicatos, Nitritos y Nitratos

La distribución de nutrientes en la transecta se presenta en la figura 5. Concentraciones de fosfatos menores a 2 μM se presentaron en el área de estudio, predominando valores menores a 0,5 μM en superficie y en gran parte de la ZMO. En la mayoría de las estaciones las concentraciones mayores a 1 μM se encontraron por debajo de 400 m. Se observaron valores cercanos a 1,8 μM sobre la cima de uno de los montes y en la estación 1 (Fig. 5a).

corresponds to the benthic habitat and is related to the explored seamounts, temperatures below 3.2 °C and slightly higher salinities around 34.58 were recorded, indicating the presence of the Pacific Deep Waters (PDW) (Fig. 2).

CHEMICAL CONDITIONS

Dissolved oxygen and OMZ

Figure 4 shows the dissolved oxygen concentrations. The highest oxygen values (> 4 mL/L) were observed at the surface and extended to a depth of approximately 40 m. The base of the oxycline was located at around 40 m in depth, while the upper and lower boundaries of the Oxygen Minimum Zone (OMZ), defined by the 0.5 mL/L isoxxygen, were situated at 50 m and 750 m in depth, respectively. Below this depth, the dissolved oxygen content gradually increased, reaching a value of 2 mL/L at 1,800 m and 3 mL/L at 2,700 m.

Nutrients: Phosphates, Silicates, Nitrites, and Nitrates

Figure 5 illustrates the distribution of nutrients along the transect. In the study area, concentrations of phosphates below 2 μM were observed, with values below 0.5 μM prevailing at the surface and throughout a significant portion of the Oxygen Minimum Zone (OMZ). Concentrations exceeding 1 μM were primarily found below 400 m in most stations. Notably, values nearing 1.8 μM were observed on the summit of one of the seamounts as well as at station 1 (Fig. 5a).

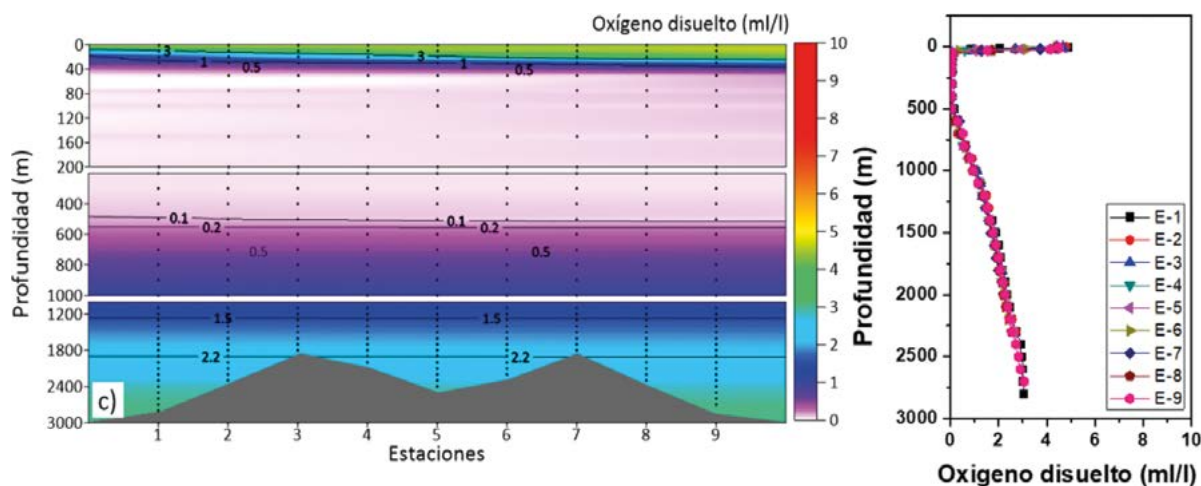


Figura 4.- Distribución vertical de Oxígeno disuelto (mL/L), separada por profundidades

Figure 4. Vertical distribution of Dissolved oxygen (mL/L), separated by depths

En el caso de silicatos, se observó incremento significativo con la profundidad. Sobre 10 m en todas las estaciones las concentraciones fueron menores a 5 μM alcanzando valores mayores a 40 μM en toda la transecta por debajo de 1 000 m y el máximo cercano a 100 μM por debajo de 1500 m (Fig. 5b).

En relación a nitritos, valores menores a 0,5 μM predominaron en toda la transecta y la columna de agua. Solo se observó un incremento por encima de 500 m correspondiendo a la ZMO con valores cercanos a 1 μM ; por debajo de los 600 m se encontraron valores menores a 0,1 μM (Fig. 5c). En relación a los nitratos se observaron valores menores a 5 μM en la superficie incrementándose con la profundidad. Concentraciones de nitrato menores a 10 μM se presentaron en la capa de los primeros 400 m. Por debajo de 400 m se incrementaron hasta valores cercanos a 18 μM (Fig. 5d).

Silicate concentrations exhibited a significant increase with depth. Within the top 10 m at all stations, concentrations were below 5 μM , but below 1,000 m, values greater than 40 μM were observed along the entire transect. The highest concentration, nearing 100 μM , was recorded below 1,500 m (Fig. 5b).

Regarding nitrites, concentrations below 0.5 μM predominated along the entire transect and water column. An increase was observed above 500 m, corresponding to the OMZ, with values reaching around 1 μM . Below 600 m, concentrations dropped to values below 0.1 μM (Fig. 5c). As for nitrates, concentrations below 5 μM were observed at the surface, gradually increasing with depth. Nitrate concentrations below 10 μM were found within the upper 400 m layer. Below 400 m, concentrations rose to values close to 18 μM (Fig. 5d).

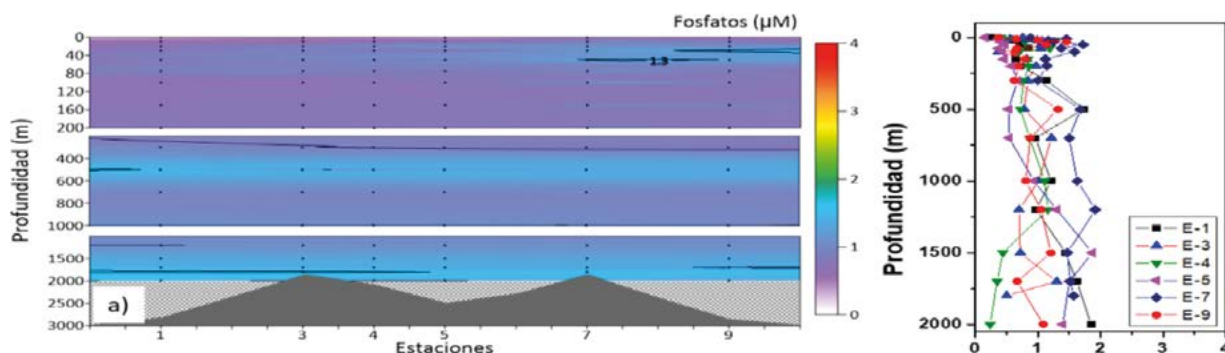


Figura 5a.- Distribución vertical de a) Fosfatos en la Dorsal de Nazca separada por profundidades, las estrellas rojas indican la ubicación de los montes. Debajo de los 2000 m no se han tomado datos

Figure 5a. Vertical distribution of a) Phosphates on the Nazca Ridge separated by depths, red stars indicate the location of the seamounts. No data have been collected below 2000 m

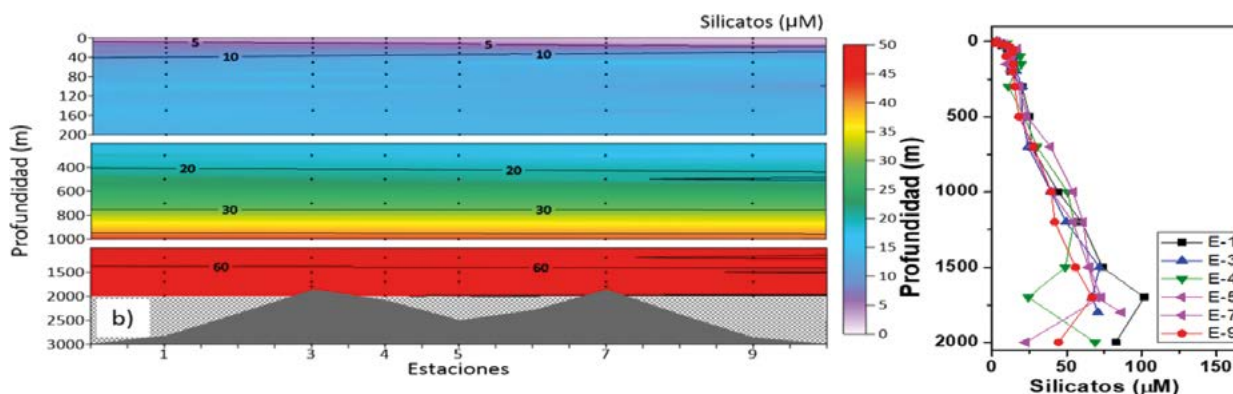


Figura 5b.- Distribución vertical de b) Silicatos en la Dorsal de Nazca separada por profundidades, las estrellas rojas indican la ubicación de los montes. Debajo de los 2000m no se han tomado datos

Figure 5b. Vertical distribution of b) Silicates on the Nazca Ridge separated by depths, red stars indicate the location of the seamounts. No data have been collected below 2000 m

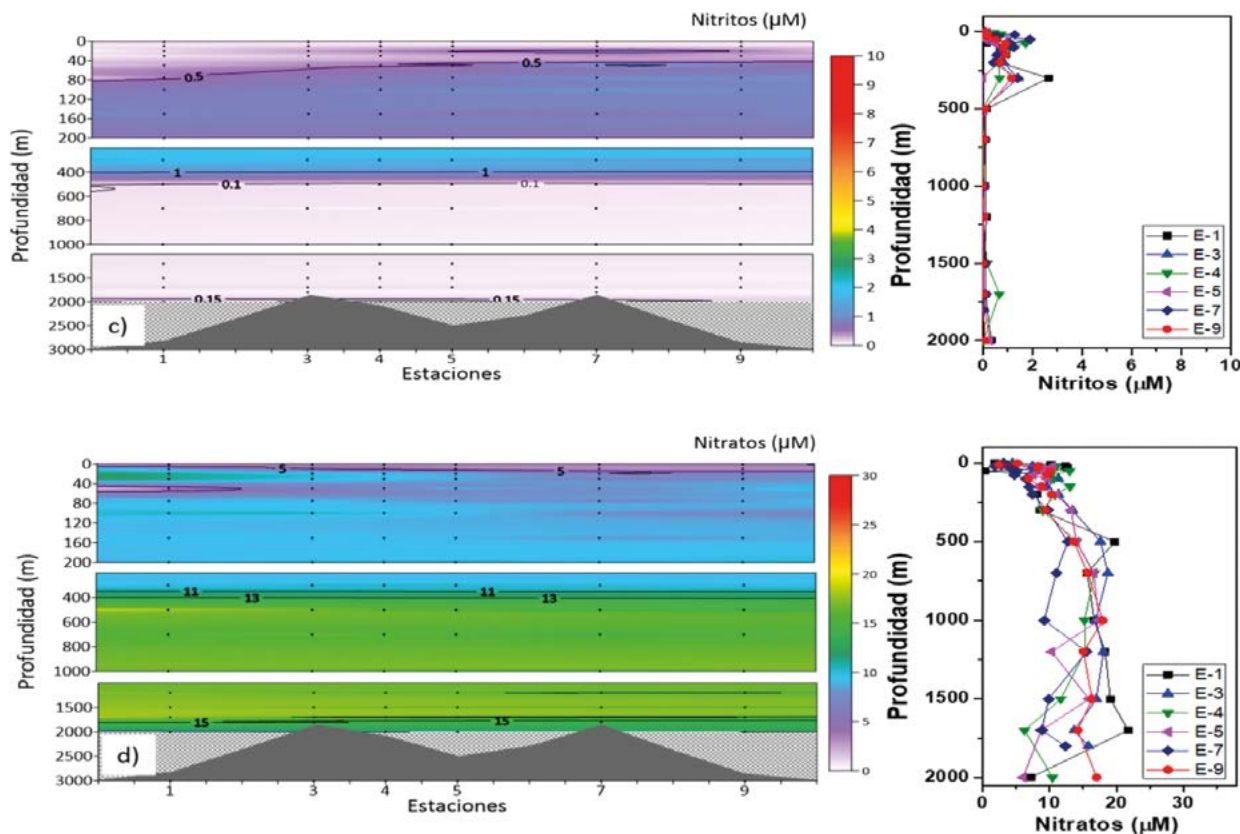


Figura 5.- Distribución vertical de c) Nitritos, d) Nitratos en la Dorsal de Nazca separada por profundidades, las estrellas rojas indican la ubicación de los montes. Debajo de 2000 m no se han tomado datos

Figure 5. Vertical distribution of c) Nitrites, d) Nitrates on the Nazca Ridge separated by depths, the red stars indicate the location of the seamounts. No data have been taken below 2000 m

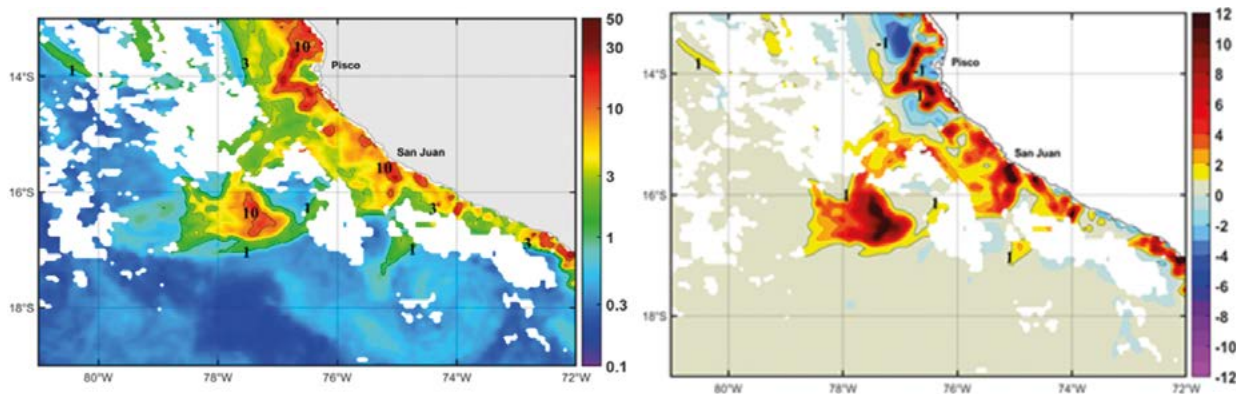


Figura 6.- Distribución de clorofila-a y anomalía de clorofila-a promedio diario del 18 al 20 de marzo 2020, satélite *Modis aqua*

Figure 6. Chlorophyll-a distribution and daily average chlorophyll-a anomaly from March 18 to 20, 2020, *Modis aqua* satellite

Productividad

A partir del análisis de imágenes de clorofila-a satelital *Modis aqua*, se conoce su concentración. En la figura 6 se presentan estos datos satelitales y su anomalía durante los días en los que se realizó el muestreo. Una condición de muy alta clorofila-a con anomalía mayor a 10 µg/L se registró en la zona de estudio.

Productivity

The concentration of chlorophyll-a was obtained through the analysis of images from the *Modis Aqua* satellite. Figure 6 displays these satellite-derived data and their corresponding anomalies during the sampling period. A condition of very high chlorophyll-a concentration, with an anomaly greater than 10 µg/L, was recorded in the study area.

4. DISCUSIÓN

Los estudios realizados por el BAP Carrasco entre el 23 y 24 de marzo 2020, han permitido conocer las condiciones físicas y químicas de la columna de agua en la Dorsal de Nazca. Se identificaron las masas de agua, que caracterizan la zona tanto superficiales como subsuperficiales, Aguas Superficiales Subtropicales (ASS), Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS), Aguas Antárticas Intermedias (AAI) y Aguas Profundas del Pacífico (APP), las cuales fueron definidas en función de la profundidad y comparando los intervalos de temperatura potencial y salinidad con los valores reportados por los trabajos de GRADOS *et al.* (2018), SILVA *et al.* (2009) y ZUTA y GUILLÉN (1970). En el presente trabajo las características de las ASS concuerdan con lo descrito por SILVA *et al.* (2009) y ZUTA y GUILLÉN (1970), quienes indican que éstas se presentan en la capa de 0 a 150 m de profundidad dependiendo de la latitud y que están asociadas a una densidad de 25,0 kg/m³, con temperaturas mayores a 17 °C y altas salinidades (>35). En el trabajo de GRADOS *et al.* (2018) se define a las AESS por temperaturas de 8 a 14 °C y salinidades entre 34,6 y 35,0, con distribución entre 100 y 600 m de profundidad, relacionada a densidades entre 26 y 27 kg/m³. En el presente trabajo se encontró temperaturas ligeramente más bajas, debido a la proximidad de las estaciones de muestreo hacia la costa y a la interacción con las AAI que son más frías. En el trabajo de ZUTA y GUILLÉN (1970) se diferencia en el tramo más profundo el segmento de las AESS a las Aguas Ecuatoriales Profundas (AEP). Por otro lado, en el tramo superficial GRADOS *et al.* (2018) señalan la mezcla con las AIPSE; ZUTA y GUILLÉN (1970) y SILVA *et al.* (2009) definen las AAI con temperaturas de 3 a 7 °C, salinidades de 34,5 a 34,6 y densidades cercanas a 27,5 kg/m³ que se distribuyen entre 700 y ~1 500 m de profundidad. Nuestros registros concuerdan con estos intervalos, con temperaturas ligeramente menores, asociadas a mezclas con masas de agua más profundas. En el caso de la APP, con predominio por debajo de 1 500 m, SILVA *et al.* (2009) reportan temperaturas menores a 3 °C, salinidades mayores a 34,5 y densidades mayores a 27,5 kg/m³, que concuerdan con nuestros resultados (Tabla 1).

4. DISCUSSION

The physical and chemical conditions of the water column in the Nazca Ridge were examined during the studies conducted by BAP Carrasco (March 23-24, 2020). The different water masses present in the region, including Subtropical Surface Waters (SSW), Equatorial Subsurface Waters (ESSW), Antarctic Intermediate Waters (AAIW), and Pacific Deep Waters (PDW), were identified based on depth and by comparing temperature, salinity, and density ranges with previous research by GRADOS *et al.* (2018), SILVA *et al.* (2009) and ZUTA & GUILLÉN (1970). In our study, the characteristics of SSW align with the descriptions provided by SILVA *et al.* (2009) and ZUTA & GUILLÉN (1970), corresponding to a depth range of 0 to 150 m, depending on latitude. These waters are associated with a density of 25.0 kg/m³, temperatures above 17 °C, and high salinities (>35). ESSW, as defined by GRADOS *et al.* (2018), exhibit temperatures between 8 and 14 °C, salinities ranging from 34.6 to 35.0, and are distributed between 100 and 600 m in depth with densities of 26 to 27 kg/m³. In our research, slightly lower temperatures were observed due to the proximity to the coast and the interaction with colder AAIW. In ZUTA & GUILLÉN (1970), the segment from the ESSW to the Equatorial Deep Waters (EDW) is distinguished in the deepest section, while GRADOS *et al.* (2018) note the mixing with ESPIW in the upper layer. AAIW, described by ZUTA & GUILLÉN (1970) and SILVA *et al.* (2009), are characterized by temperatures ranging from 3 to 7 °C, salinities of 34.5 to 34.6, and densities close to 27.5 kg/m³. They are found between 700 and ~1,500 m depth. Our findings align with these temperature ranges, although slightly lower due to the influence of deeper water masses. Regarding PDW, which dominates below 1,500 m, SILVA *et al.* (2009) report temperatures below 3 °C, salinities above 34.5, and densities above 27.5 kg/m³, which are consistent with our results (Table 1).

The thermal distribution exhibited distinct layers within the water column. The first layer, spanning 0 to 50 m, was characterized by stratification and a well-defined thermocline identified by the 15 °C isotherm. Studies conducted by FLORES, ESPINO, LUQUE & QUISPE (2013), in southern Peru reported

La distribución térmica evidenció diferentes capas en la columna de agua, la primera entre 0 y 50 m, capa estratificada con una termoclina definida por la isoterma de 15 °C. En la zona sur del Perú la profundidad media de la termoclina en el verano es de 66 m según FLORES, ESPINO, LUQUE Y QUISPE (2013), que se obtuvo a partir de una serie de tiempo 1961-2011 entre 50 mn y 100 mn. Entre 100 y 600 m de profundidad, se encontró una capa caracterizada por presencia de AESS que contiene la mayor parte de la ZMO y finalmente tenemos una capa más profunda que mostro mayor homogeneidad. El estudio de MIX, TIEDEMANN y BLUM (2003) indica que a profundidades mayores a 1 000 m hay una zona de transición con las Aguas Profundas Circumpolar Antárticas, caracterizadas por ser ricas en oxígeno y bajas en nutrientes.

El oxígeno disuelto presenta valores mayores en superficie sobre 30-50 m de profundidad, asociados a la interacción océano-atmósfera que genera transferencia de gases y a procesos fotosintéticos como productividad primaria asociada al incremento de fitoplancton. Por debajo de 50 m, se ubica la ZMO, asociada con AESS y con espesor aproximado de 700 m. La disminución de oxígeno se asocia a la respiración microbiana que es el principal factor que disminuye la concentración de oxígeno, complementado a la poca ventilación de estas aguas subsuperficiales, y a procesos de gran escala y de circulación termohalina (GRACO, LEDESMA, FLORES & GIRÓN, 2007). Por debajo de la ZMO la concentración de oxígeno disuelto, se incrementa ligeramente a valores entre 1 y 3 mL/L, debido a las presencias de AAI y APP. En estudios previos frente a Pisco (verano 2009, BIC Meteor Crucero 77 Leg 4), se exploró la ZMO en la zona oceánica (330 mn de la costa) y hasta 4000 m de profundidad, evidenciándose presencia de aguas deficientes en oxígeno (ZMO <22,5 μM o 0,5 mL/L), aproximadamente desde 146 m extendiéndose hasta 577 m de profundidad, con un espesor aproximado de 432 m (LEDESMA *et al.*, 2011). Además, se encontró que, a 4 000 m el oxígeno disuelto presentó concentración de 3,4 mL/L, condiciones asociadas a la circulación y a la historia propia de las masas de agua (LEDESMA *et al.*, 2011). En la zona de la dorsal se detectó la ZMO con un espesor de 700 m aproximadamente y en los montes submarinos se encontraron valores de oxígeno disuelto entre 2,25 y 3,0 mL/L, asociados a las APP. Cabe resaltar que el contenido de oxígeno de esta masa de agua puede crear

an average thermocline depth of 66 m during the summer, based on a 1961-2011 time series analysis within the range of 50 nm to 100 nm. Between 100 and 600 m in depth, a layer was observed containing the majority of the OMZ, predominantly consisting of the ESSW. Furthermore, a deeper layer exhibited greater homogeneity. MIX, TIEDEMANN & BLUM (2003) indicated a transition zone beyond 1,000 m in depth, characterized by the presence of Circumpolar Deep Waters (CDW) of Antarctic origin, known for their elevated oxygen levels and low nutrient concentrations.

Dissolved oxygen concentrations are highest near the surface, typically between 30-50 m depth, attributed to ocean-atmosphere interactions facilitating gas exchange and photosynthetic processes such as primary productivity driven by increased phytoplankton abundance. Below 50 m, the OMZ is present, characterized by ESSW and spanning approximately 700 m in thickness. Oxygen depletion within the OMZ is primarily influenced by microbial respiration, limited subsurface water ventilation, and large-scale thermohaline circulation (GRACO, LEDESMA, FLORES & GIRÓN, 2007). Below the OMZ, dissolved oxygen concentrations gradually increase to values between 1 and 3 mL/L, owing to the presence of AAIW and PDW. Previous studies conducted off the coast of Pisco, at 330 nm offshore and up to a depth of 4,000 m (summer 2009, R/V Meteor Cruise 77 Leg 4) revealed an oxygen-deficient OMZ (<22.5 μM or 0.5 mL/L) extending from approximately 146 m to 577 m in depth, with a thickness of about 432 m (LEDESMA *et al.*, 2011). Furthermore, at 4,000 m in depth, dissolved oxygen concentration was measured at 3.4 mL/L, reflecting the circulation patterns and history of water masses (LEDESMA *et al.*, 2011). Along the Nazca Ridge, the OMZ showed an approximate thickness of 700 m, while dissolved oxygen values between 2.25 and 3.0 mL/L were observed on the seamounts, indicating the influence of PDW. It is noteworthy that the oxygen content of this water mass can create stable conditions for the existence of benthic organisms' habitats.

Regarding nutrients, phosphate distribution exhibited concentrations ranging from 0.5 to 1.0 μM within the upper 500 m, reflecting

condiciones estables para la existencia de hábitats de organismos bentónicos.

Con respecto a los nutrientes, en el caso de fosfatos la distribución muestra concentraciones entre 0,5 y 1,0 μM en los primeros 500 m lo que se asocia a una zona de mayor consumo por el fitoplancton y al efecto de las masas de agua pobres en fosfatos, sobre todo las ASS. No se observó una fosfoclina muy definida. Concentraciones mayores se presentaron en algunas estaciones, como en la 7 sobre uno de los montes, con valores cercanos a 1,8 μM , y en la zona de la estación 1 por debajo de 1 500 m. En la ZMO las concentraciones de silicatos se encontraron entre 10 y 30 μM y se incrementaron por debajo de la ZMO con valores de concentración mayores a 40 μM . Este incremento se asocia con procesos de disolución de estructuras silíceas (GRACO *et al.*, 2007) y ocurren en una capa homogénea donde la temperatura empieza a reducirse debido a la presencia de las AAI (ZUTA & GUILLÉN, 1970) y APP, que se reflejan en los procesos biogeoquímicos (TSUCHIYA & TALLEY, 1998). En el caso de los nitratos hubo incremento de este nutriente por debajo de la ZMO; en superficie los valores menores se observan al igual que en los otros nutrientes. Valores entre 10-15 μM se presentan en la ZMO y por debajo existe un importante incremento resultado de la remineralización y de la señal de las masas de agua profundas. Por debajo de 1 700 m los cambios son muy pequeños asociados a la presencia de APP. En relación a los nitritos se observan ligeros incrementos hasta 1,5 μM a 400 m de profundidad en gran parte de la ZMO lo cual resulta de procesos asociados con la disminución de oxígeno y reducción de nitratos lo cual es característico frente a Perú, además de procesos como desnitrificación, anammox entre otros (GRACO *et al.*, 2007; HAMERSLEY *et al.*, 2007).

Las condiciones oceanográficas y químicas que observamos en este estudio, concuerdan con lo reportado por Mix *et al.* (2013). Las masas de agua y corrientes que fluyen hacia el sur entre 100 y 400 m de profundidad se caracterizan por niveles de oxígeno relativamente bajos, altos nutrientes y alta salinidad y que coinciden con la distribución de la ZMO observada. Por su parte las AAI, que se extienden hasta 1 500 m de profundidad, tienen alto contenido de oxígeno y mínimo de salinidad con nutrientes altos, como igualmente lo observamos sobre la dorsal en particular en silicatos y nitratos. Finalmente, el agua del fondo que fluye hacia el norte, por debajo de ~3 000 m de profundidad, re-

heightened phytoplankton uptake and the influence of phosphate-depleted water masses, particularly SSW. The presence of a well-defined phosphate gradient was not evident. Some stations displayed higher concentrations, such as station 7 on a seamount with values nearing 1.8 μM , and the area around station 1 below 1,500 m. Silicate concentrations within the OMZ ranged from 10 to 30 μM , exhibiting an increase below the OMZ with concentrations surpassing 40 μM . This rise is linked to siliceous structure dissolution (GRACO *et al.*, 2007) and occurs within a homogeneous layer, coinciding with temperature reduction due to the occurrence of AAIW (ZUTA & GUILLÉN, 1970) and PDW, influencing biogeochemical processes (TSUCHIYA & TALLEY, 1998). Nitrates displayed an increment below the OMZ, with lower values observed near the surface akin to other nutrients. Concentrations between 10-15 μM were found within the OMZ, followed by a noticeable increase below, resulting from remineralization and the signal from deep water masses. Subsequent changes below 1,700 m were minimal and associated with the presence of PDW. Nitrite concentrations exhibited slight increments up to 1.5 μM at a depth of 400 m within much of the OMZ, resulting from processes associated with oxygen decline, nitrate reduction (typical off the Peruvian coast), and additional processes such as denitrification and anammox (GRACO *et al.*, 2007; HAMERSLEY *et al.*, 2007).

The oceanographic and chemical conditions observed in this study align with findings reported by Mix *et al.* (2013). Water masses and currents flowing southward between 100 and 400 m in depth exhibit relatively low oxygen levels, high nutrient concentrations, and elevated salinity, corresponding to the observed distribution of the OMZ. Conversely, AAIW, extending down to 1,500 m in depth, display high oxygen content, minimal salinity, and high nutrient levels, particularly in silicates and nitrates along the ridge. Furthermore, bottom water flowing northward below ~3,000 m in depth, characterized by relatively high oxygen and nutrient concentrations, is observed at the base of seamounts up to 2,000 m in depth, coinciding with the presence of PDW.

lativamente rica en oxígeno y con altos nutrientes, estaría observándose en la base de los montes hasta 2 000 m y en presencia de las APP.

Finalmente, la alta productividad observada en la zona durante el estudio debe responder a alta disponibilidad y al consumo de nutrientes. Sin embargo, esta condición no parece ser característica como lo indican las anomalías positivas de clorofila-*a*. El análisis realizado en el expediente publicado por el SERNANP (2021) indica condiciones de baja clorofila-*a* en el área asociada a los montes submarinos de la Dorsal de Nazca de acuerdo a la climatología estacional del Satélite *MODIS Aqua* entre los años 2002 y 2019 obtenida en el portal OceanColor (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio - NASA de los Estados Unidos).

5. CONCLUSIONES

La dorsal de Nazca se encuentra en una zona con influencia de masas de aguas y corrientes que determinan sus características físicas y químicas. Las masas de agua son: 1) las Aguas Superficiales Subtropicales (ASS) más cálidas, salinas y con alto contenido de oxígeno disuelto, 2) entre 50 y 750 m se encuentra la Zona Mínimo de Oxígeno (ZMO) con espesor de 700 m, aproximadamente y se identifica la contribución de las Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) en mayor proporción, con incremento en nutrientes; 3) por debajo de 700 m y hasta 1 500 m se encuentran las Aguas Antárticas Intermedias (AAI) con incremento gradual del oxígeno, altos nutrientes y mínimo de salinidad y, 4) por debajo de 1500 m y hasta cerca de 2 800 m están las Aguas Profundas del Pacífico (APP), más frías y salinas.

La información de clorofila-*a* superficial obtenida durante el estudio sugiere que la zona puede tener una productividad significativa que cambia con la estación del año, la que podría sustentar algunas especies clave en la columna de agua de esta zona.

Finalmente, necesitamos mayor investigación a escalas temporales que permitan establecer la dinámica oceanográfica, las respuestas biogeoquímicas, los aspectos de conexión existentes por efecto de las corrientes y conocer los flujos verticales y laterales de energía y materia, así como su influencia en los diferentes ecosistemas que se estructuran en la Dorsal de Nazca.

The observed high productivity in the study area is likely a response to abundant nutrient availability and utilization. However, this condition does not appear to be a prevailing characteristic, as indicated by the positive anomalies of chlorophyll-*a*. According to the analysis conducted in the report published by the Peruvian National Service of Natural Areas Protected by the State (SERNANP, 2021), the area associated with the seamounts of the Nazca Ridge exhibits low chlorophyll-*a* levels based on the seasonal climatology of the MODIS Aqua satellite from 2002 to 2019, obtained from the OceanColor portal (National Aeronautics and Space Administration - NASA, United States).

5. CONCLUSIONS

The Nazca Ridge is located in a region influenced by water masses and currents that shape its physical and chemical characteristics. The identified water masses are as follows: 1) Subtropical Surface Waters (SSW), characterized by warmer temperatures, higher salinity, and abundant dissolved oxygen content; 2) The Oxygen Minimum Zone (OMZ), spanning approximately 700 m in thickness between 50 and 750 m in depth, primarily influenced by Equatorial Subsurface Waters (ESSW) with increased nutrient concentrations; 3) Antarctic Intermediate Waters (AAIW), occupying the depth range from below 700 m to 1,500 m, exhibiting a gradual rise in oxygen levels, high nutrient content, and minimal salinity; and 4) Pacific Deep Waters (PDW), extending from 1,500 m to nearly 2,800 m in depth, colder in temperature and saltier in composition.

The data on surface chlorophyll-*a* obtained during the study indicates the presence of significant seasonal productivity in the area, which could provide support for key species within the water column of this zone.

Ultimately, additional investigation at temporal scales is required to elucidate the oceanographic dynamics, biogeochemical responses, interconnectivity facilitated by currents, and the vertical and lateral fluxes of energy and matter. These insights are essential for comprehending the diverse ecosystems that thrive within the Nazca Ridge.

Agradecimientos

El presente estudio se llevó a cabo bajo estrecha coordinación y colaboración entre las instituciones: IMARPE, DHN, MINAM, SERNANP, RREE, las que permitieron su ejecución, logística y financiamiento.

Agradecimiento al Cmdte. Renzo Esquivel Calderón y la dotación del BAP Carrasco que en estrecha coordinación remota con IMARPE logró ejecutar exitosamente la fase de campo de las mediciones y muestreo oceanográfico.

Agradecimiento al Valmte. Hector Soldi, quien tuvo un papel importante en las coordinaciones para la viabilidad logística y financiera del estudio.

Acknowledgments

This study was conducted through close coordination and collaboration among the following institutions: IMARPE, DHN, MINAM, SERNANP, RREE, whose support enabled its implementation, logistics, and funding.

We extend our gratitude to Cmdr. Renzo Esquivel Calderón and the crew of BAP Carrasco for their successful execution of the field phase of oceanographic measurements and sampling, achieved through remote coordination with IMARPE.

Special thanks to Vice Admiral Hector Soldi for his pivotal role in coordinating the logistical and financial feasibility of the study.

6. REFERENCIAS

- ANCAPICHÚN, S. & GARCÉS-VARGAS, J. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Ciencias Marinas*, 41(1), 1-20. <https://doi.org/10.7773/cm.v41i1.2338>
- FLORES, R., ESPINO, M., LUQUE, G. & QUISPE, J. (2013). Patrones de Variabilidad Ambiental en el Mar Peruano. *Rev. peru. biol.* Número especial, 20(1), 21-28. <https://doi.org/10.15381/rpb.v20i1.2630>
- GÁLVEZ-LARACH, M. (2009). Montes submarinos de Nazca y Salas y Gómez: una revisión para el manejo y conservación. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3), 479-500. <https://doi.org/10.3856/vol37-issue3-fulltext-16>
- GRACO, M., LEDESMA, J., FLORES, G. & GIRÓN, M. (2007). Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Rev. peru. biol.*, 14(1), 117- 128. <https://doi.org/10.15381/rpb.v14i1.2165>
- GRADOS, C., CHAIGNEAU, A., ECHEVIN, V. & DOMINGUEZ, N. (2018). Upper Ocean Hydrology of the Northern Humboldt Current System at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Progress in Oceanography*, 165, 123-144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.05.005>
- HAGEN, R. & MOBERLY, R. (1994). Tectonic Effects of a Subducting Aseismic Ridge: The Subduction of the Nazca Ridge at the Peru Trench. *Mar. Geophys. Res.*, 16, 145-161. <https://doi.org/10.1007/BF01224757>
- HAMERSLEY, M. R., LAVIK, G., WOEBKEN, D., RATTRAY, J., LAM, P., HOPMANS, E. C., SINNINGHE DAMSTE, J. S., KRÜGER, S., GRACO, M., GUTIÉRREZ, D. & KUYPERS, M. M. (2007). Anaerobic ammonium oxidation in the Peruvian oxygen minimum zone. *Limnol. Oceanogr.*, 52(3), 923-933. <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.3.0923>
- 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://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/2160>
- MIX, A.C., TIEDEMANN, R. & BLUM, P. (2003). Leg 202 Shipboard Scientific Party. *Proceedings of the Ocean Drilling Program (OPD) Initial Reports, College Station, 202*, 1-145. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.ir.202.101.2003>
- SCHNEIDER, W., FUENZALIDA, R., RODRÍGUEZ-RUBIO, E., GARCÉS-VARGAS, J. & BRAVO, L. (2003). Characteristics and formation of eastern South Pacific Intermediate Water. *Geophys. Res. Lett.*, 30(11), 1581. <https://doi.org/10.1029/2003GL017086>
- SERNANP. (2021). Expediente técnico: Reserva Nacional Dorsal de Nazca (RNDN00462021), pp. 109. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1952627-reserva-nacional-dorsal-de-Nazca>
- SILVA, N., ROJAS, N. & FEDELE, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004-1020. <https://doi.org/10.1016/j.dsr1.2008.12.013>
- STRICKLAND, J. & PARSONS, T. (1972). A Practical Handbook of Sea Water Analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, (167), 1-311. <https://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791>
- TASSARA, A., GÖTZE, H., SCHMIDT, S. & HACKNEY, R. (2006). Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research*, 111(B09404), 1-26. <https://doi.org/10.1029/2005JB003976>
- TSUCHIYA, M. & TALLEY, L. (1998). A Pacific hydrographic section at 881°W: water-property distribution. *Journal of Geophysical Research*, 13(C6), <https://doi.org/10.1029/97JC03415>
- WOODS, M. & OKAL, E. (1994). The structure of the Nazca ridge and Sala y Gomez sea mount chain from the dispersion of Rayleigh waves. *Geophys. J. Int.*, 117(1), 205-222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03313.x>
- ZUTA, S. & GUILLÉN, O. (1970). Oceanografía de las Aguas Costeras del Perú. *Bol Inst Mar Perú*, 2(5), 157-324. <https://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/949>