

EFFECTOS DE EL NIÑO COSTERO 2017 EN LA ESTRUCTURA TERMOHALINA Y FLUJOS GEOSTRÓFICOS FRENTE A LA COSTA NORTE DEL PERÚ

EFFECTS OF THE 2017 COASTAL EL NIÑO ON THERMOHALINE STRUCTURE AND GEOSTROPHIC FLUXES OFF THE NORTHERN PERUVIAN COAST

Jorge Quispe¹ Luis Vásquez¹ Walter García¹
David Correa¹ Luis Pizarro¹ Enrique Tello
Noel Domínguez¹ Octavio Morón² Roberto Flores

<https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.344>

RESUMEN

QUISPE J, VÁSQUEZ L, GARCÍA W, CORREA D, PIZARRO L, TELLO E, DOMÍNGUEZ N, MORÓN O, FLORES R. 2021. Efectos de El Niño Costero 2017 en la estructura termohalina y flujos geostroficados frente a la costa norte del Perú. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 385-408. - Se describen los efectos de El Niño Costero 2017 (ENC 2017) en la estructura termohalina, masas de agua y flujos geostroficados dentro de las 100 millas náuticas frente a Paita y Chicama, con base en datos satelitales de vientos e información hidrográfica recolectada en secciones oceanográficas realizadas entre diciembre 2016 y junio 2017. Entre enero y marzo 2017, se registraron anomalías en la velocidad del viento del sur, en el rango de -3,5 a -1,0 m/s, propiciando la estratificación térmica de la capa superior de la columna de agua, así como la intrusión desde el norte de aguas ecuatoriales superficiales (AES) hasta Chicama y de aguas tropicales superficiales (ATS) hasta Paita. En esta última localidad, la temperatura superficial del mar (TSM) registró sus valores máximos de 27,4 °C en febrero en la zona costera (ZC; < 30 mn) y 28,9 °C en marzo en la zona oceánica (ZO; > 30 mn). En Chicama, la TSM alcanzó 25,7 °C en la ZC y 27,9 °C en la ZO, ambas en febrero. Frente a Paita, las anomalías térmicas en superficie alcanzaron sus máximos en febrero (+5,4 °C, ZC; +5,0 °C, ZO), mientras frente a Chicama fue en marzo 2017, los máximos fueron +4,3 °C (ZC) y +4,5 °C (ZO). En cambio, al integrar la capa subsuperficial tanto en la ZC como en la ZO, las máximas anomalías térmicas fueron detectadas en marzo en ambas secciones. En la ZC de Paita, los flujos fueron intensos con dirección al sur en la capa superior de 40 m en enero y en febrero, y en la capa subsuperficial en marzo. En la ZC de Chicama, durante todo el período los flujos fueron débiles, con dirección al norte en la capa superior de 30 m, y al sur en la capa subsuperficial. En la ZO, en ambas secciones los flujos integrados fueron débiles en enero y febrero, en marzo tuvieron dirección al norte. De abril a mayo se presentaron flujos intensos al sur, ocupando la mayor parte de la columna de agua, con valores máximos entre 50 y 150 m de profundidad en ambas secciones, posiblemente asociados al paso de una onda cálida atrapada a la costa, de origen ecuatorial.

PALABRAS CLAVE: estructura termohalina, el Niño Costero 2017, flujo geostrofico

ABSTRACT

QUISPE J, VÁSQUEZ L, GARCÍA W, CORREA D, PIZARRO L, TELLO E, DOMÍNGUEZ N, MORÓN O, FLORES R. 2021. Effects of the 2017 coastal El Niño on the thermohaline structure and geostrophic fluxes off the northern Peruvian coast. *Bol Inst Mar Peru*. 36(2): 385-408. - We used satellite wind data and hydrographic information collected in transect surveys between December 2016 and June 2017 to describe the effects of the 2017 coastal El Niño (2017 CEN) on the thermohaline structure, water masses, and geostrophic fluxes within 100 nm off Paita and Chicama. Southern wind speed anomalies, between -3.5 to -1.0 m/s, were recorded (January-March 2017) leading to thermal stratification of the upper layer of the water column, as well as the southward advection of equatorial surface waters (ESW) and tropical surface waters (TSW) to Chicama and Paita, respectively. At the latter location, SST peaked at 27.4 °C in February in the coastal zone (CZ; < 30 nm) and 28.9 °C in March in the oceanic zone (OZ; > 30 nm), while in Chicama, SST reached 25.7 °C in the CZ and 27.9 °C in the OZ, both in February. SSTA off Paita peaked in February (+5.4 °C, CZ; +5.0 °C, OZ). In March 2017, off Chicama, SSTA peaked at +4.3 °C (CZ) and +4.5 °C (OZ). When anomalies are integrated over the water column, the thermal anomalies peaked in March at both transects. Between January and February, the geostrophic velocities in the Paita CZ indicated intense southerly fluxes in the upper 40 m layer and the subsurface layer in March. Conversely, in the Chicama CZ, the fluxes were weak (<10 cm/s on average), heading north in the upper 30 m layer and south in the subsurface layer throughout the entire period. Integrated fluxes in the Paita and Chicama OZs were weak in January and February and headed north in March. Intense southerly fluxes were detected at both transects, between April and May 2017, occupying most of the water column (mainly from depths between 50 and 150), likely resulting from the passage of a downwelling equatorial coastal-trapped wave.

KEYWORDS: thermohaline structure, the 2017 coastal El Niño, geostrophic fluxes

1 IMARPE, DGIOCC, Área Funcional de Investigaciones en Oceanografía Física, jquispe@imarpe.gob.pe

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

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema Norte de la Corriente de Humboldt (SNCH) es influenciado por la dinámica en conjunto del Pacífico tropical y afectado periódicamente por eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña). Están asociados al ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS) que alteran por meses el régimen de vientos, lluvias, corrientes marinas, temperatura del mar, así como concentraciones de oxígeno en el Pacífico Sudoriental (ARNTZ & FAHRBACH, 1989; CHAVEZ *et al.*, 2008). Durante los eventos El Niño (EN), el calentamiento produce un desplazamiento hacia el sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), aumentando las precipitaciones en la costa norte de Perú y sur del Ecuador. Ello ocasionó pérdidas significativas en infraestructura, así como actividades económicas asociadas a inundaciones, especialmente en los eventos fuertes y extraordinarios (TAKAHASHI *et al.*, 2014).

Los eventos EN impactan en las condiciones ambientales e hidrológicas del Pacífico Sur Este, donde las anomalías del viento del oeste intraestacional en el Pacífico ecuatorial occidental intensifican la presencia de ondas Kelvin (OK) ecuatoriales descendentes (KESSLER *et al.*, 1995). Estas se propagan hacia el este hasta las costas de Ecuador, desencadenando la profundización de la termoclina y disminución de nutrientes frente a la costa de Perú (BARBER & CHAVEZ, 1983; ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017). El afloramiento de aguas frías con concentraciones de nutrientes y productividad primaria se ve fuertemente alterado, esto lleva a modificaciones en todos los niveles de la cadena trófica (BARBER & CHAVEZ, 1983). Además, las aguas cercanas a la costa de altas condiciones térmicas en el Pacífico oriental (la parte norte del Pacífico sur oriental) en la zona norte de Perú y Ecuador, favorece el desarrollo de una convección profunda en la atmósfera, desencadenando intensas lluvias e inundaciones en la zona costera árida (TAKAHASHI, 2004).

Los patrones de circulación del Pacífico oriental tropical, fueron descritos por KESSLER (2006). Tanto en la región del Pacífico Tropical Sudeste (PTSE) como frente a la costa peruana, a nivel superficial, la Corriente Sur Ecuatorial (CSE) transporta las aguas más frías del PTSE al Pacífico Central. En la capa subsuperficial (100-300 m) la Corriente Submarina Ecuatorial (CSE), conocida como Corriente de Cromwell, transporta grandes volúmenes de agua hacia la costa sudamericana, a velocidades que pueden alcanzar los 100 cm/s (ICOCHEA y ROJAS, 2001; KESSLER, 2006). La circulación superficial desde la costa peruana hacia el Ecuador está compuesta por la Corriente Costera Peruana (CCP) y la Corriente Oceánica Peruana (COP), controladas principalmente por el esfuerzo del viento. Lejos de la costa, con dirección hacia el sur, fluye la

1. INTRODUCTION

El Niño Southern Oscillation (ENSO) alter, through periodically warm (El Niño) and cold (La Niña) events, the overall dynamics of the tropical Pacific, where the Northern Humboldt Current System (NCHS) is located. These alterations include changes in the wind regime, rainfall, ocean currents, sea temperature, as well as oxygen concentrations in the Southeast Pacific (ARNTZ & FAHRBACH, 1989; CHAVEZ *et al.*, 2008). During El Niño (EN), warming produces a southward shift of the intertropical convergence zone (ITCZ), increasing rainfall on northern Peru and southern Ecuador, resulting in significant losses in infrastructure, as well as economic activities associated with flooding, especially in strong and extraordinary events (TAKAHASHI *et al.*, 2014).

EN events impact environmental and hydrological conditions in the Southeast Pacific. Intra-seasonal westerly wind anomalies in the western equatorial Pacific intensify the presence of downwelling equatorial Kelvin waves (EKW) (KESSLER *et al.*, 1995) which propagate eastward to the Ecuadorian coasts, triggering thermocline deepening and nutrient depletion off the Peruvian coast (BARBER & CHAVEZ, 1983; ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017). The upwelling of nutrient-rich cold waters (primary productivity) is strongly altered, resulting in modifications at all levels of the trophic chain (BARBER & CHAVEZ, 1983). Furthermore, the nearshore waters of high thermal conditions in the eastern Pacific (the northern part of the Southeast Pacific) in northern Peru and Ecuador favor the development of deep convection in the atmosphere, triggering intense rainfall and flooding in the arid coastal zone (TAKAHASHI, 2004).

KESSLER (2006) described the circulation patterns of the eastern tropical Pacific. The South Equatorial Current (SEC) transports the cooler waters of the Southeast Tropical Pacific (TSEP) to the Central Pacific, both in the TSEP and off the Peruvian coast, at the surface level. The Equatorial Undercurrent (EU), also known as the Cromwell Current, transports, in the subsurface layer (100-300 m), large volumes of water towards the South American coast, at speeds that can reach 100 cm/s (ICOCHEA & ROJAS, 2001; KESSLER, 2006). The surface circulation from the Peruvian coast towards the equator is formed by the Peru Coastal Current (PCC) and the Peru Oceanic Current (POC), which are mainly controlled by wind stress. The Peru-Chile Countercurrent (PCCC) flows southward, away from the coast. Likewise, there is a surface

Contra-Corriente-Peruano-Chilena (CCPCh). Además, en el extremo norte existe, un flujo superficial hacia el sur, la Corriente Costera Ecuatoriano-Peruana (CCEP).

En la capa subsuperficial costera se presenta la Corriente Subsuperficial Perú Chile (CSPCh), que fluye hacia el sur a lo largo del talud superior y la plataforma continental. Esta es alimentada por CSSE, Contracorriente Subsuperficial Primaria (CCSSp) y Contracorriente Subsuperficial Secundaria (CCSSs). Las dos últimas son conocidas como jets de Tsuchiya, (MONTES *et al.*, 2010; CHAIGNEAU *et al.*, 2013). La CSPCh tiene un rol clave en la ventilación de la capa subsuperficial, en la zona de mínima de oxígeno, así como en la alimentación del afloramiento costero. Esta corriente fue descrita a partir de la distribución de propiedades físicas y biogeoquímicas de la masa de agua (GUNTHER, 1936), estimaciones de circulación utilizando la aproximación geostrofica (WOOSTER & GILMARTIN, 1961; WYRTKI, 1963; SILVA & NESHYBA, 1979-1980) y en base a mediciones directas (CHAIGNEAU *et al.*, 2013).

El ciclo ENOS influye en la estructura termohalina, como en la circulación del Pacífico Ecuatorial (WANG & FIEDLER, 2016). Durante EN se profundiza la termoclina en el PTSE, asociada al debilitamiento de vientos alisios como a la circulación de Walker, modificando la circulación superficial y subsuperficial (KESSLER, 2006). Sin embargo, ENC 2017 presentó características distintas en su desarrollo y cobertura espacial respecto a los eventos EN asociados al ciclo ENOS (TIMMERMANN *et al.*, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018; ESPINOZA *et al.*, 2019). Se debió a cambios de la circulación atmosférica y de vientos del sudeste en particular, en el origen del evento. En este marco, se propone determinar el impacto de ENC 2017 sobre la hidrología de las aguas frente al norte del Perú, caracterizando los cambios en la circulación geostrofica, masas de agua y estructura termohalina dentro de las 100 mn adyacentes al litoral.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio y recolección de datos

Los datos provienen de dos secciones (transectas), hasta las 100 mn de distancia a la costa frente a Paita (5°S) y a Chicama (08,34°S) (Fig. 1). En cada una se realizaron siete estaciones hidrográficas (EHs), se recolectaron datos verticales continuos de presión, temperatura y conductividad mediante un perfilador de Profundidad, Temperatura y Conductividad CTD 19 Plus V2, marca *Sea Bird Electronics*. Tanto en la navegación como ubicación de EHs se usó un GPS de marca Garmin.

flow to the south in the extreme north, the Ecuador-Peru Coastal Current (EPCC).

In the coastal subsurface layer, the Peru-Chile Undercurrent (PCUC) flows southward along the upper slope and continental shelf. It is fed by the EU, the primary Southern Subsurface Countercurrent (pSSCC), and the secondary Subsurface Countercurrent (sSSCC). The latter two are known as Tsuchiya jets (MONTES *et al.*, 2010; CHAIGNEAU *et al.*, 2013). The PCUC is essential for the ventilation of the subsurface layer, in the oxygen minimum zone, as well as in feeding the coastal upwelling. This current was described from the distribution of physical and biogeochemical properties of the water mass (GUNTHER, 1936), circulation estimates using the geostrophic approach (WOOSTER & GILMARTIN, 1961; WYRTKI, 1963; SILVA & NESHYBA, 1979-1980), and direct measurements (CHAIGNEAU *et al.*, 2013).

The ENSO cycle influences the thermohaline structure, such as the Equatorial Pacific circulation (WANG & FIEDLER, 2016). During EN, the thermocline deepens in the TSEP, associated with the weakening of trade winds and the Walker circulation, thus modifying the surface and subsurface circulation (KESSLER, 2006). Nevertheless, 2017 CEN had different characteristics in its development and spatial coverage compared to other events of the ENSO cycle (TIMMERMANN *et al.*, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018; ESPINOZA *et al.*, 2019). It was due to changes in atmospheric circulation and southeasterly winds in particular, at the origin of the event. Therefore, we aim to determine the impact of 2017 CEN on the hydrology of the waters off northern Peru, by characterizing the changes in the geostrophic circulation, water masses, and thermohaline structure within 100 nm offshore.

2. MATERIAL AND METHODS

Study area and data collection

Two transects located up to 100 nm off Paita (5°S) and Chicama (08.34°S) were used to collect data (Fig. 1). Seven hydrographic stations (HSs) were carried out in each transect, and continuous vertical pressure, temperature, and conductivity data were collected using a Sea-Bird Electronics CTD 19 Plus V2 Depth, Temperature, and Conductivity profiler. A Garmin GPS was used for navigation and location of the HSs.

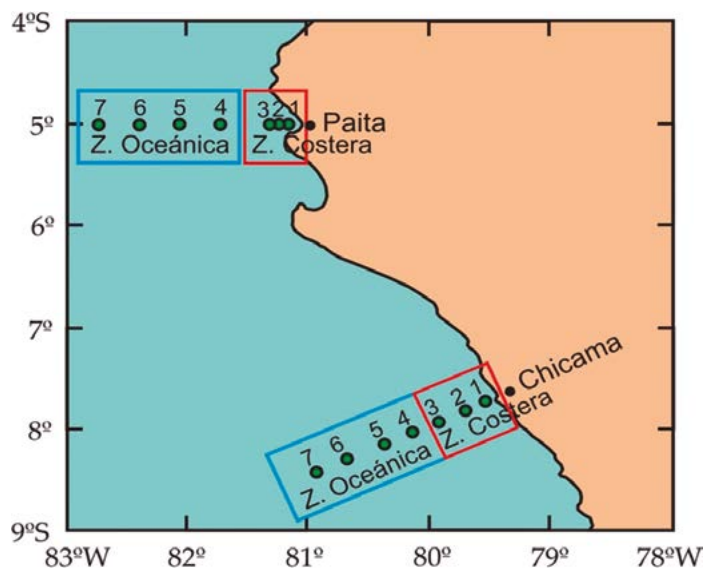


Figura 1.- Mapa de estaciones del programa por resultados (PPR). Los puntos representan las estaciones hidrográficas. Las etiquetas sobre las estaciones indican el número de la línea y de estación durante los monitoreos bio-oceanográficos realizados con frecuencia mensual para la zona costera y oceánica

Figure 1. Map of stations of the Budget for Results (BfR) program. The dots represent the hydrographic stations. The labels on the stations indicate the line and station number during monthly bio-oceanographic monitoring for the coastal and oceanic zone

Se usaron datos de vientos satelitales del escaterómetro ASCAT, registrados en el litoral costero frente a Paita (5°S) y Chicama (7°45’S), tanto a 40 km (~ 20 mn) como a 100 km (~50 mn) de la costa. Esta información forma parte del programa operacional meteorológico (MetOp) de la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) y del *Centre de Recherche et d’Exploitation Satellitaire* (CERSAT), en *L’Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer* (IFREMER) de Francia (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat>). El escaterómetro mide la velocidad y dirección del viento sobre la superficie del mar, mediante la determinación de rugosidad del mar. Equivale a una altura promedio de 10 metros sobre el nivel del mar, con resolución espacial resultante de 0,25° (aproximadamente 28 km) en longitud y latitud. La metodología y algoritmos de cálculo del viento satelital fue elaborada por BENTAMY *et al.* (2002, 2012).

We used satellite wind data from the ASCAT scatterometer, recorded off Paita (5°S) and Chicama (7°45’S), both 40 km (~20 nm) and 100 km (~50 nm) offshore. This information is part of the meteorological operational program (MetOp) of the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) and the *Centre de Recherche et d’Exploitation Satellitaire* (CERSAT), at *L’Institut Français de Recherche pour l’Exploitation de la Mer* (IFREMER) in France (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat>). The scatterometer measures wind speed and direction over the sea surface by determining sea roughness, which is equivalent to a mean height of 10 masl, with a resulting spatial resolution of 0.25° (approximately 28 km) in longitude and latitude. The methodology and algorithms for the satellite wind calculation were developed by BENTAMY *et al.* (2002, 2012).

Para caracterizar las condiciones promedio de anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM), se emplearon: el índice ICEN (ENFEN, 2012), basado en la media móvil de tres meses de TSM en la región Niño 1+2, e índice LABCOS (QUISPE y VÁSQUEZ, 2015), con media móvil de tres meses de TSM registrada en el litoral desde Paita hasta San Juan de Marcona. Colaboraron los laboratorios costeros del IMARPE y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.

To characterize the mean sea surface temperature anomaly (SSTA) conditions, the following were used: the ICEN index (ENFEN, 2012), based on the three-month moving average of SST in the Niño 1+2 region, and the LABCOS index (QUISPE & VÁSQUEZ, 2015), with a three-month moving average of SST recorded in the coast from Paita to San Juan de Marcona. IMARPE’s coastal laboratories and the Directorate of Hydrography and Navigation of the Peruvian Navy collaborated with this study.

Tabla 1.- Escala de vientos para las zonas costera y oceánica frente a Perú (CORREA *et al.*, 2018)Table 1. Wind scale for coastal and oceanic zones off Peru (CORREA *et al.*, 2018)

Muy débiles	Débiles	Moderados	Fuertes	Muy Fuertes
Menor igual a 0,7 m/s.	Mayor a 0,7 m/s y menor e igual a 4,1 m/s	Mayor a 4,1 m/s y menor e igual a 6,8 m/s	Mayor a 6,8 m/s y menor e igual a 10,4 m/s	Mayor a 10,4 m/s.

Las anomalías del viento satelital se calcularon utilizando una climatología pentadal (promedio cada 5 días), el periodo base fue de octubre 1999 a diciembre 2014, integrando vientos del satélite QuickSCAT de 1999 a 2007 y ASCAT de 2008 a 2014. La climatología del viento se encuentra disponible con resolución espacial de 28 km y frecuencia pentadal. En la clasificación de vientos, se usó la propuesta de escala de vientos tanto para la zona costera como oceánica frente a Perú (Tabla 1, CORREA *et al.*, 2018).

Se utilizaron datos de TSM registrados en las estaciones costeras del IMARPE ubicadas en el litoral de Paita y Chicama, para calcular las ATSM (Boletín de la temperatura superficial del mar en el Litoral Peruano- IMARPE, setiembre 2016-agosto 2017). Además, se computó el índice LABCOS (QUISPE y VÁSQUEZ, 2015), basado en la media trimestral corrida sobre datos de ATSM registrados en Laboratorios Costeros del IMARPE desde Paita hasta Ilo.

Los datos de temperatura, presión y conductividad obtenidos con el CTD se emplearon para calcular variables derivadas: temperatura potencial (TP), salinidad absoluta (SA) y densidad potencial (DP) con el programa Gibbs-Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox de la International Thermodynamic Equation of Seawater-2010 (TEOS-10). Es así pues las variables potenciales como conservativas pueden ser precisamente interpoladas (KING *et al.*, 2012). Para describir y cuantificar los efectos de ENC 2017 en el transporte de propiedades de diciembre 2016 a junio 2017, se agruparon las EHs en una Zona Costera (ZC) y Zona Oceánica (ZO) (Fig. 1). En la ZC se tomó a las EHs que se encontraban dentro de la plataforma continental (< 200 m) y comprendidas dentro de las 30 mn. Los promedios usados fueron, en la ZC hasta 100 m de profundidad y en la ZO hasta 300 m para la construcción de series de tiempo. Tanto para el análisis como visualización de datos se emplearon subrutinas en MATLAB del programa TEOS-10 y el programa computacional Ocean Data View (ODV). Se calcularon anomalías termohalinas integradas en la columna de agua para la ZC y ZO frente a Paita y Chicama, tomando como referencia la climatología de DOMÍNGUEZ *et al.* (2017). En la determinación de masas de agua, se usaron rangos de temperatura y salinidad propuestos según GRADOS *et al.* (2017).

Satellite wind anomalies were estimated using a pentadal climatology (average every 5 days). The base period was from October 1999 to December 2014, integrating winds from the QuickSCAT satellite from 1999 to 2007 and ASCAT from 2008 to 2014. Wind climatology is available with 28 km spatial resolution and pentadal frequency. In the wind classification, the proposed wind scale for both the coastal and oceanic zones off Peru was used (Table 1, CORREA *et al.*, 2018).

SST data recorded at IMARPE's coastal stations located in Paita and Chicama were used to estimate the SSTA (Boletín de la temperatura superficial del mar en el Litoral Peruano- IMARPE, September 2016-August 2017). Also, the LABCOS index (QUISPE & VÁSQUEZ, 2015), was calculated, based on the quarterly moving average on SSTA data recorded in IMARPE's Coastal Laboratories from Paita to Ilo.

The temperature, pressure, and conductivity data obtained with the CTD were used to estimate derived variables: potential temperature (PT), absolute salinity (AS), and potential density (PD) with the Gibbs-Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox program of the International Thermodynamic Equation of Seawater-2010 (TEOS-10). Thus, the potential variables as conservative can be precisely interpolated (KING *et al.*, 2012). From, December 2016 to June 2017, the HSs were clustered into a Coastal Zone (CZ) and Oceanic Zone (OZ) to describe and quantify the effects of 2017 CEN on property transport (Fig. 1). The HSs within the continental shelf (< 200 m) and 30 nm were considered in the CZ. The averages used were up to a depth of 100 m in the CZ and up to 300 m in the OZ for the construction of the time series. Subroutines in MATLAB of the TEOS-10 program and the Ocean Data View (ODV) software were used for data analysis and visualization. Integrated thermohaline anomalies were calculated in the water column for the CZ and OZ off Paita and Chicama, using the climatology of DOMÍNGUEZ *et al.* (2015) as a reference. For determining water masses, proposed ranges of temperature and salinity were used according to GRADOS *et al.* (2017).

La velocidad de las corrientes marinas, se obtuvo a partir de ecuaciones del balance geostrofico (POND & PICKARD, 1983), su nivel de referencia fue 500 m de profundidad. Se calcularon los flujos integrados como promedio mensual en la ZC y ZO. Este método en zonas someras, incluye la teoría desarrollada por PEDLOSKY (2007); del mismo modo se determinó el transporte de volumen integrado.

La estratificación frente a Paita y Chicama, se determinó a partir de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N) en ciclos/h, utilizando datos de la DP obtenidos con el programa TEOS-10. El mismo análisis se realizó en la ZC, a partir de promedios mensuales sobre 100 m de profundidad dentro de las 30 mn, mientras en la ZO se usaron promedios entre 40-100 mn y con profundidad de 300 m (KONYAEV & SABININ, 1992).

3. RESULTADOS

En enero 2017, la TSM aumentó en comparación al valor de diciembre 2016, evidenciando incrementos tanto en ZC de $\sim 8,5$ °C (Paita) y $\sim 6,8$ °C (Chicama) como en ZO de $\sim 6,4$ °C (Paita) y $\sim 4,8$ °C (Chicama). Estos valores dieron los primeros indicios de ENC 2017. En febrero y marzo del mismo año, respecto a diciembre 2016, la TSM en la ZC de Paita aumentó en $\sim 10,3$ °C y $\sim 9,8$ °C; mientras en la ZC de Chicama, estos incrementos fueron $8,5$ °C y $\sim 8,4$ °C, respectivamente. Las anomalías térmicas en superficie (Paita), alcanzaron valores máximos en febrero $+5,4$ °C (ZC) y $+5,0$ °C (ZO); en Chicama fueron $+4,3$ °C (ZC) y $+4,5$ °C (ZO). En abril, disminuyeron en promedio, frente a la costa norte $+0,76$ °C (Paita) y $+0,55$ °C (Chicama), reflejando la rápida declinación del evento.

Índices térmicos a nivel superficial

El índice LABCOS (QUISPE y VÁSQUEZ, 2015), presentó valores positivos desde diciembre del 2016, superando $+1,0$ °C entre enero y abril 2017. Se alcanzaron valores de mayor magnitud en febrero con $+1,89$ °C y marzo $+2,06$ °C. Esto indicó el desarrollo de condiciones cálidas de fuerte magnitud en la franja adyacente a la costa peruana. A partir de mayo hasta agosto 2017, hubo tendencia descendente a condiciones neutras (Fig. 2a). El Índice Costero El Niño-ICEN (ENFEN, 2012), aumentó repentinamente desde diciembre 2016 a mayo 2017, registrando valores máximos $+0,93$ °C en febrero y $+1,11$ °C en marzo (Fig. 2b). Ello demostró la presencia de un evento cálido ENC de magnitud moderada (ENFEN, 2017).

Las figuras 2c y 2d, muestran la anomalía de TSM mensual correspondiente a los registros de las estaciones de Paita y Chicama en el litoral. En general, los valores de ATSM mostraron anomalías negativas (Paita $-0,37$ °C y Chicama $-0,18$ °C) en

The velocity of marine currents was obtained from geostrophic balance equations (POND & PICKARD, 1983), their reference level was a depth of 500 m. Integrated fluxes were calculated as monthly averages in the CZ and OZ. This method in shallow zones includes the theory developed by PEDLOSKY (2007). Likewise, the integrated volume transport was determined.

The stratification off Paita and Chicama was determined from the Brunt-Väisälä frequency (N) in cycles/h, using PD data obtained with the TEOS-10 software. The same analysis was performed in the CZ, based on monthly averages over a depth of 100 m within 30 nm, while in the OZ, averages between 40-100 nm and with a depth of 300 m were used (KONYAEV & SABININ, 1992).

3. RESULTS

In January 2017, SST increased compared to December 2016, with increases in both CZ of ~ 8.5 °C (Paita) and ~ 6.8 °C (Chicama) and OZ of ~ 6.4 °C (Paita) and ~ 4.8 °C (Chicama). These were the first signs of 2017 CEN. When compared to December 2016, SST in the Paita CZ increased by ~ 10.3 °C and ~ 9.8 °C; while in the Chicama CZ, these increases were 8.5 °C and ~ 8.4 °C, respectively, between February and March 2017. Surface thermal anomalies (Paita), peaked in February at $+5.4$ °C (CZ) and $+5.0$ °C (OZ), while in Chicama, they were $+4.3$ °C (CZ) and $+4.5$ °C (OZ). In April, they decreased on average, off the north coast, by $+0.76$ °C (Paita) and $+0.55$ °C (Chicama), due to the rapid decline of the event.

Surface thermal indexes

Since December 2016, the LABCOS index (QUISPE & VÁSQUEZ, 2015) had positive values, exceeding $+1.0$ °C between January and April 2017. Values of greater magnitude were reached in February with $+1.89$ °C and March $+2.06$ °C. This was indicative of the development of warm conditions of strong magnitude off the Peruvian coast. There was a downward tendency to neutral conditions from May to August 2017 (Fig. 2a). The El Niño Coastal Index-ICEN (ENFEN, 2012), suddenly increased from December 2016 to May 2017, peaking at $+0.93$ °C in February and $+1.11$ °C in March (Fig. 2b). This evidenced the presence of a warm moderate ENC (ENFEN, 2017).

Figures 2c and 2d show the monthly SSTA corresponding to the records of the Paita and Chicama stations on the coast. SSTA values generally showed negative anomalies (Paita -0.37 °C and Chicama -0.18 °C)

diciembre 2016, cambiando a positivas (Paita +2,42 °C y Chicama +1,47 °C) en enero 2017. Superaron los +4 °C en febrero y registraron sus valores máximos en marzo 2017 (Paita +5,26 °C y Chicama +5,20 °C).

Vientos costeros

Desde setiembre hasta inicios de diciembre 2016 se registraron vientos de intensidad por debajo de lo normal frente a la costa norte del Perú, principalmente en la franja oceánica (entre 100 y 300 km). En diciembre, se presentaron vientos de velocidad débil a moderada (<6,8 m/s) tanto en la ZC (dentro de los 40 km) como en la ZO.

Las anomalías del viento (AV) presentaron variaciones en tres periodos. Durante el primero (de octubre 2016 a enero 2017) con AV débiles, en el rango negativo de -2,0 a -0,5 m/s, coincidiendo con la etapa previa a temprana de ENC 2017. El segundo, se caracterizó por la predominancia de AV de -3,5 a -1,0 m/s, desde enero hasta mediados de marzo, coincidiendo con el desarrollo principal de ENC 2017. El tercero, exhibió AV variables entre -2,0 y +2,0 m/s, se produjo de mediados de marzo a primera quincena de mayo, asociado a la declinación del evento. Cabe indicar que al sur de Talara (4°S), hubo mayor ocurrencia de

in December 2016, changing to positive (Paita +2.42 °C and Chicama +1.47 °C) in January 2017. They exceeded +4 °C in February and peaked in March 2017 (Paita +5.26 °C and Chicama +5.20 °C).

Coastal winds

Winds of below-normal intensity were recorded from September to early December 2016 off the northern Peruvian coast, mainly between 100 and 300 km offshore. In December, weak to moderate wind speeds (<6.8 m/s) were present in both the CZ (within 40 km) and the OZ.

Wind anomalies (WA) showed variations in three periods. During the first one (from October 2016 to January 2017) there were weak WAs, in the negative range of -2.0 to -0.5 m/s, coinciding with the pre-early stage of 2017 CEN. The second was characterized by predominantly WAs of -3.5 to -1.0 m/s, from January to mid-March, coinciding with the main development of 2017 CEN. Finally, the third, which was characterized by variable WA between -2.0 and +2.0 m/s, occurred from mid-March to the first fortnight of May, associated with the event’s waning. It is noteworthy that south of Talara (4°S), there was a greater

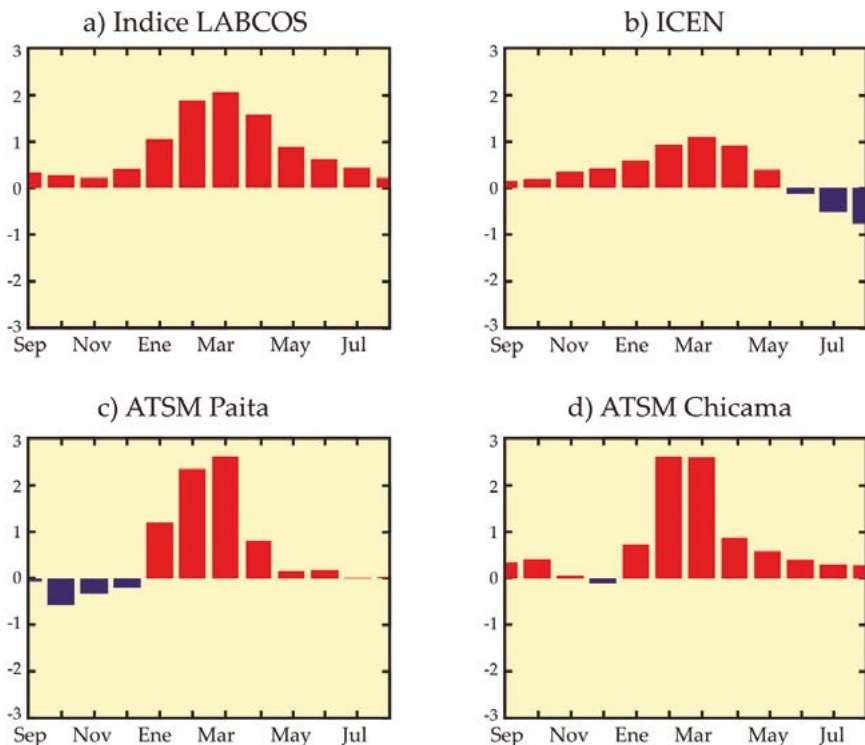


Figura 2.- Panel superior: variación temporal a escala mensual de los índices térmicos a nivel superficial. a) Índice LABCOS, b) Índice ICEN. Panel inferior: variación temporal a escala mensual de las series de tiempo de la ATSM en la zona costera, c) Frente a Paita, d) Frente a Chicama. Cada barra representa el promedio mensual durante el período setiembre 2016-agosto 2017

Figure 2. Upper panel: monthly time variation of the SSTA time series in the coastal zone, c) Off Paita, d) Off Chicama. Each bar represents the monthly average for the period September 2016-August 2017

vientos moderados del sur en la zona costera. Desde inicios de abril, se registraron vientos moderados a fuertes del sur en la ZO; manteniéndose los vientos débiles al norte de Talara. Esto coincidió con el posicionamiento estacional hacia el hemisferio norte de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT), que normalmente ocurre en abril de cada año (VILLEGAS *et al.*, 2012) y la declinación del evento cálido (Fig. 3). De mayo a octubre 2017, las AV frente a la costa del norte de Perú presentaron un comportamiento normal.

occurrence of moderate southerly winds in the coastal zone. From early April, moderate to strong southerly winds were recorded in the OZ and weak winds were maintained north of Talara, which coincided with the seasonal positioning towards the northern hemisphere of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ), which normally occurs in April each year (VILLEGAS *et al.*, 2012) and the warm event's waning (Fig. 3). From May to October 2017, WAs off the northern Peruvian coast presented normal behavior.

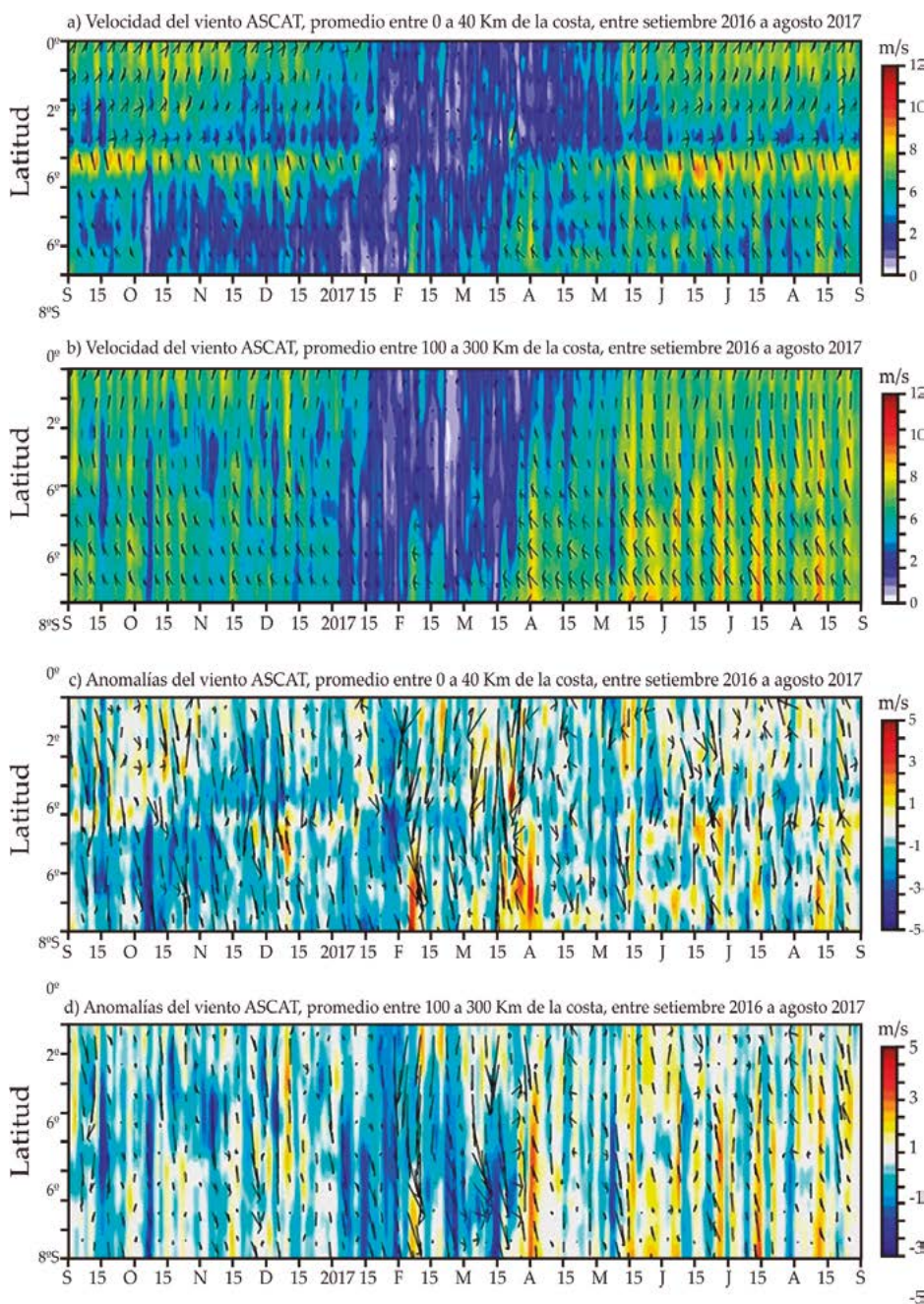


Figura 3.- Diagrama de Hovmöller. a) Velocidad promedio del viento de ASCAT entre 0 y 40 km, b) Velocidad promedio del viento de ASCAT entre 100 y 300 km, c) Anomalía del viento satelital de ASCAT entre 0 y 40 km, d) Anomalía del viento satelital de ASCAT entre 100 y 300 km. Periodo setiembre 2016 - agosto 2017

Figure 3. Hovmöller diagram. a) ASCAT average wind speed between 0 and 40 km, b) ASCAT average wind speed between 100 and 300 km, c) ASCAT satellite wind anomaly between 0 and 40 km, d) ASCAT satellite wind anomaly between 100 and 300 km. September 2016 - August 2017

DISTRIBUCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

Temperatura y anomalías térmicas

De diciembre 2016 a junio 2017, Paita y Chicama presentaron cambios térmicos en la estructura vertical, tanto por la intensificación como profundización de la termoclina. La TSM promedio a nivel superficial frente a Paita, registró sus valores máximos de 27,4 °C en la ZC (febrero) y 28,9 °C en la ZO (marzo). Frente a Chicama, de 25,7 °C en la ZC y 27,9 °C en la ZO, ambas en febrero. Entre mayo-junio en ambas secciones disminuyeron las condiciones térmicas reflejándose en la disminución de la TSM (Figs. 4, 5).

Se presentó un patrón de calentamiento asociado al desarrollo de la termoclina, con gradientes térmicos que se intensificaron en los primeros 50 m de profundidad. Frente a Paita, en diciembre, se presentaron gradientes de 0,06 °C/m en la ZC y 0,11 °C/m en la ZO, mientras en febrero los máximos alcanzaron 0,19 °C/m (ZC) y 0,23 °C/m (ZO). Frente a Chicama, en diciembre, fueron de 0,05 °C/m (ZC) y 0,11 °C/m (ZO); los máximos valores también se presentaron en febrero, 0,19 °C/m (ZC) y 0,25 °C/m (ZO). Entre marzo y junio los gradientes disminuyeron en intensidad en ambas localidades (Figs. 4, 5).

DISTRIBUTION OF PHYSICAL PROPERTIES

Temperature and thermal anomalies

Both Paita and Chicama showed thermal changes in the vertical structure from December 2016 to June 2017, resulting from the intensification and deepening of the thermocline. The mean SST off Paita peaked at 27.4 °C in the CZ (February) and 28.9 °C in the OZ (March), while off Chicama, it peaked at 25.7 °C in the CZ and 27.9 °C in the OZ, both in February. Thermal conditions decreased in both sections between May and June, so a decrease in SST was observed (Figs. 4, 5).

There was a warming pattern associated with the development of the thermocline, with thermal gradients that intensified in the first 50 m of depth. In December, gradients of 0.06 °C/m in the CZ and 0.11 °C/m in the OZ were observed off Paita, while in February the maximum gradients reached 0.19 °C/m (CZ) and 0.23 °C/m (OZ). For Chicama, gradients of 0.05 °C/m (CZ) and 0.11 °C/m (ZO) were observed in December and their peaks occurred in February at 0.19 °C/m (CZ) and 0.25 °C/m (OZ). Between March and June, the gradients decreased in intensity at both locations (Figs. 4, 5).

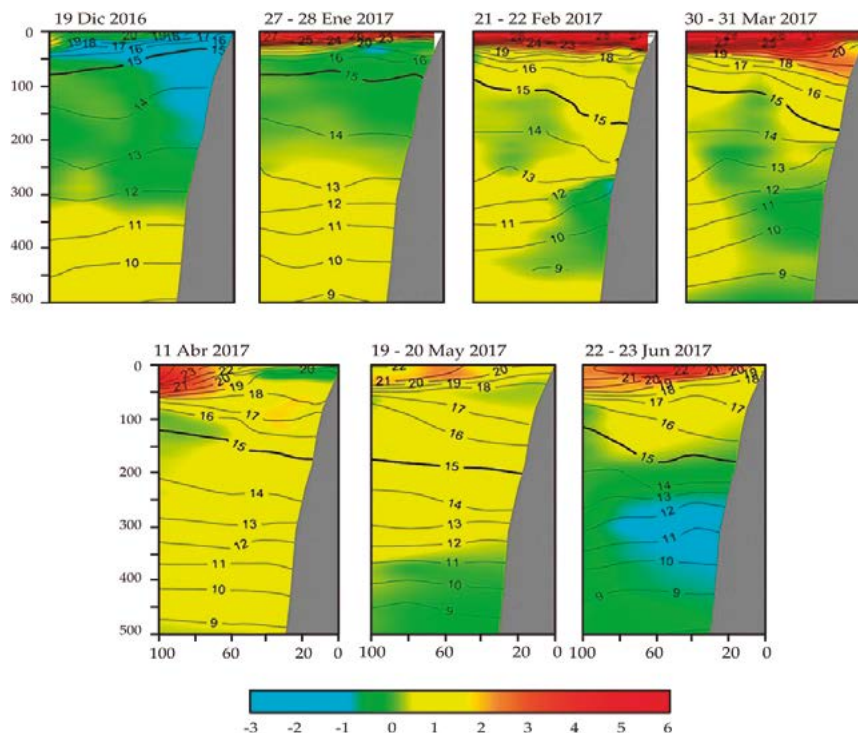


Figura 4.- Distribución vertical de la temperatura potencial (°C) (contornos) y anomalías térmicas (colores) en la sección Paita en relación a la distancia de la costa (nm). Diciembre 2016 - junio 2017

Figure 4. Vertical distribution of potential temperature (°C) (contours) and thermal anomalies (colors) in the Paita section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - June 2017

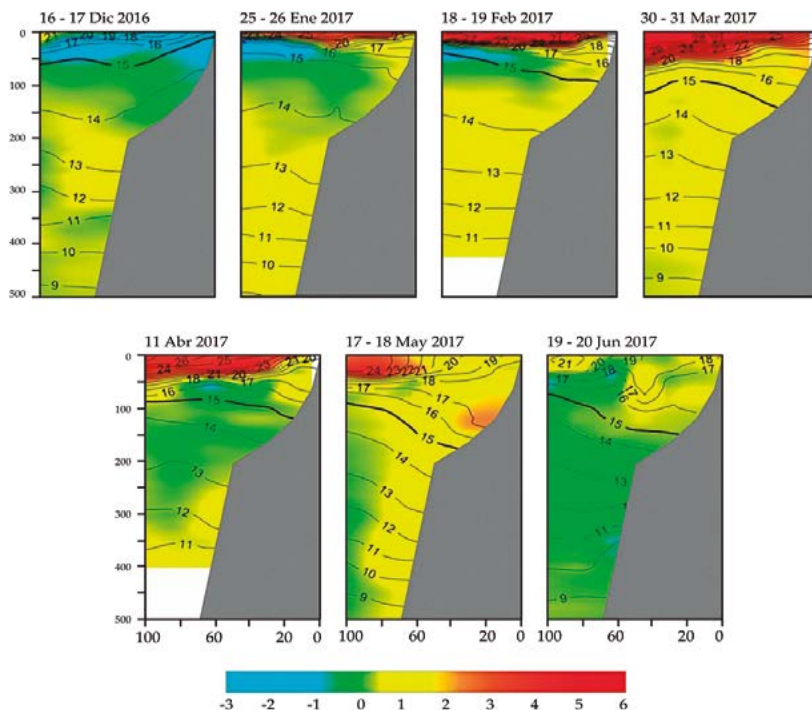


Figura 5.- Distribución vertical de la temperatura potencial (°C) (contornos) y anomalías térmicas (colores) en la sección Chicama en relación a la distancia de la costa (mn). Diciembre 2016 - agosto 2017

Figure 5. Vertical distribution of potential temperature (°C) (contours) and thermal anomalies (colors) in the Chicama section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - August 2017

En cuanto a la isoterma de 15 °C, la sección Paita, en diciembre 2016, presentó tendencia ascendente desde 75 m de profundidad en la ZO hasta 25 m en la ZC (Fig. 4a). En enero 2017 su distribución fue casi horizontal, alrededor de 75 m, para luego ubicarse de 100 m (ZO) a 200 m (ZC) entre febrero y abril (Figs. 4c, 4d, 4e); para mayo la isoterma alcanzó la mayor profundización, a 150 m (ZO) y a 220 m (ZC) (Fig. 4f). A partir de junio se observó su ascenso de la ZC y ZO (Fig. 4g).

Frente a Chicama en la ZC, mientras la isoterma de 15 °C en diciembre 2016 se ubicó a 10 m por debajo de la superficie (Fig. 5a), en enero y febrero 2017 se profundizó a 90 m, alcanzando en marzo 150 m (ZC) y 125 m (ZO) (Fig. 5d). En abril ascendió a 90 m (ZO) y a 125 m (ZC) (Fig. 5e) profundizándose en mayo hasta 175 m en la ZC (Fig. 5f), ascendiendo en junio (Fig. 5g). Por otro lado, en ambas localidades, a partir de abril las isotermas en la ZC mostraron elevación hacia la superficie, posiblemente por la persistencia de vientos más intensos a partir de la segunda quincena de abril (Fig. 3). Ello generó la reactivación de los procesos de surgencia (Fig. 5).

Las anomalías térmicas en Paita registraron en diciembre 2016 el máximo valor negativo (- 3,0 °C) en la ZC sobre 50 m de profundidad y dentro de 40 mn (Fig. 4a). De enero a marzo 2017, prevalecieron

In December 2016, the 15 °C isotherm off Paita showed an upward tendency from a depth of 75 m in the OZ to 25 m in the CZ (Fig. 4a). In January 2017, its distribution was almost horizontal, around 75 m, and then located from 100 m (OZ) to 200 m (CZ) between February and April (Figs. 4c, 4d, 4e). In May, the isotherm reached the greatest depth, at 150 m (OZ) and 220 m (CZ) (Fig. 4f). From June onwards, its ascent from the CZ and OZ was observed (Fig. 4g).

In the CZ off Chicama, the 15 °C isotherm was located 10 m below the surface during December 2016 (Fig. 5a). In January and February 2017, it deepened to 90 m, reaching 150 m (CZ) and 125 m (OZ) in March (Fig. 5d). In April, it ascended to 90 m (OZ) and 125 m (CZ) (Fig. 5e) deepening in May to 175 m in the CZ (Fig. 5f), then ascending in June (Fig. 5g). Furthermore, in both localities, from April onwards, the isotherms in the CZ ascended towards the surface, likely as a result of the persistence of stronger winds from mid-April onwards (Fig. 3). This generated the reactivation of upwelling processes (Fig. 5).

In Paita, thermal anomalies in December 2016 recorded the maximum negative value (- 3.0 °C) in the CZ over a depth of 50 m and within 40 nm (Fig. 4a). From January to March 2017, positive thermal anomalies predominated with peaks

anomalías térmicas positivas con máximos en marzo sobre 100 m en la ZC y sobre 50 m en la ZO (Fig. 4d). En abril, las anomalías estuvieron presentes en la ZO sobre 50 m de profundidad, mientras que en la ZC se registraron condiciones térmicas neutras (Fig. 4e). En junio 2017 se registraron anomalías térmicas negativas entre 250 y 400 m de profundidad, (Fig. 4g). En cambio, frente a Chicama (diciembre 2016) en la subsuperficie se registraron las mismas, pero sobre 50 m de profundidad (Fig. 5a). De enero a marzo 2017, las anomalías térmicas positivas se profundizaron en la vertical, alcanzando su máxima magnitud en marzo sobre 60 m de profundidad en la ZO (Fig. 5b, 5c, 5d). Estas disminuyeron en la columna de agua de abril a junio 2017, (Fig. 5e, 5f, 5g). Las variaciones en las anomalías térmicas, en ambas secciones verticales, tuvieron incidencia en el ascenso y profundización de la isoterma de 15 °C.

En la ZC, la capa vertical integrada hasta los 100 m, de setiembre a diciembre 2016, exhibió anomalías térmicas negativas con magnitudes máximas de -1,8 °C (octubre, Paita) y -1,0 °C (diciembre, Chicama). De enero a junio 2017, prevalecieron anomalías térmicas positivas en esta capa, registrándose los valores máximos en marzo (+3,6 °C en Paita y +2,3 °C en Chicama). En la ZO, considerando la capa vertical integrada hasta 300 m, de setiembre a diciembre 2016 predominaron anomalías térmicas negativas con magnitudes máximas de -0,9 °C (octubre, Paita) y -2,1 °C (diciembre, Chicama). De enero a junio 2017, prevalecieron anomalías térmicas positivas con valores máximos en marzo (+1,2 °C, Paita y +2,7 °C, Chicama) (Tabla 2).

in March above 100 m in the CZ and above 50 m in the OZ (Fig. 4d). In April, anomalies were present in the OZ above a depth of 50 m, while neutral thermal conditions were recorded in the CZ (Fig. 4e). In June 2017, negative thermal anomalies were recorded at depths between 250 and 400 m (Fig. 4g). Conversely, in the subsurface off Chicama (December 2016) thermal anomalies were recorded, but above a depth of 50 m (Fig. 5a). From January to March 2017, positive thermal anomalies deepened in the vertical, peaking in March above a depth of 60 m in the OZ (Fig. 5b, 5c, 5d). These decreased in the water column from April to June 2017 (Fig. 5e, 5f, 5g). Variations in the thermal anomalies, in both vertical sections, had an impact on the ascent and deepening of the 15 °C isotherm.

From September to December 2016, the integrated vertical layer up to 100 m in the CZ showed negative thermal anomalies with peaks of -1.8 °C (October, Paita) and -1.0 °C (December, Chicama). From January to June 2017, positive thermal anomalies predominated in this layer, with peaks recorded in March (+3.6 °C in Paita and +2.3 °C in Chicama). In the OZ, considering the integrated vertical layer up to 300 m (September-December 2016), negative thermal anomalies prevailed with peaks of -0.9 °C (October, Paita) and -2.1 °C (December, Chicama). From January to June 2017, positive thermal anomalies prevailed with peaks in March (+1.2 °C, Paita, and +2.7 °C, Chicama) (Table 2).

Tabla 2.- Anomalías de la temperatura (°C) en la zona costera y oceánica en las secciones de Paita y Chicama. Cada valor indica el promedio mensual integrado en la vertical sobre 100 m en la zona costera y 300 m en la zona oceánica en la sección Paita y Chicama. Setiembre 2016 - agosto 2017

Table 2. Temperature anomalies (°C) in the coastal and oceanic zones in the Paita and Chicama sections. Each value indicates the monthly average integrated into the vertical above 100 m (CZ) and 300 m (OZ) for both sections. September 2016 - August 2017

Año	Mes	Paita (ZC)	Paita (ZO)	Chicama (ZC)	Chicama (ZO)
2016	Set	-1.13	-0,35	-0,72	-1,55
2016	Oct	-1,78	-0,91	-0,68	-2,33
2016	Nov	-0,77	-0,59	-0,87	-1,29
2016	Dic	-1,59	-0,43	-1,03	-2,13
2017	Ene	0,76	0,5	0,22	0,38
2017	Feb	3,22	1,00	1,28	2,66
2017	Mar	3,62	1,22	2,32	2,96
2017	Abr	1,82	1,22	0,88	1,32
2017	May	1,55	1,21	1,69	0,96
2017	Jun	1,53	0,78	0,99	0,83
2017	Jul	0,29	0,28	0,16	-0,39
2017	Ago	-0,79	-0,60	-0,29	-1,49

Salinidad y anomalías halinas

En Paita durante diciembre 2016, se registraron valores máximos de salinidad de ~35,0 ups sobre 100 m de profundidad, entre 40 y 100 mn (Fig. 6a). De enero a marzo, fueron menores a 34,7 ups sobre 25 m de profundidad (Fig. 6b, c, d). En abril, la salinidad disminuyó desde 60 mn en superficie hasta 100 mn sobre 50 m de profundidad (Fig. 6e). En mayo, presentó una capa subsuperficial entre 25 y 100 m con valores mayores a 35,1 ups (Fig. 6f). Para junio, la distribución de salinidad presentó una capa superficial (< 25 m) con valores menores a 34,7 ups entre 20 y 100 mn. Se manifestó otra mayor a 35,1 ups, por debajo de esta, a lo largo de la sección y hasta 120 m de profundidad en promedio (Fig. 6g).

En diciembre 2016, predominaron en Chicama, valores de salinidad de 35,0 ups sobre 100 m de profundidad, pero fuera de las 80 mn. En la capa superficial se registraron salinidades de 35,1 ups (Fig. 7a). En enero y febrero predominó 35,0 ups entre 80 y 125 m de profundidad (Fig. 7b, c). En superficie, 35,0 ups estuvo entre 60 y 100 mn mientras que, dentro de las 40 mn se encontraron salinidades de 34,7 y 34,8 ups (Fig. 7c). En marzo y abril se observaron salinidades de 34,4 a 34,8 ups, tanto en ZO como en ZC. En la segunda, se debió posiblemente a la contribución del agua de río que tuvo mayor incidencia en marzo (ENFEN, 2017) (Fig. 7 d, e). De abril a junio en la ZO se registraron las mayores salinidades de 35,1 a 35,4 ups, para luego proyectarse hacia la costa con mayor amplitud en junio (Fig. 7d, e, f, y g).

Las anomalías de salinidad en diciembre 2016 presentaron variaciones mínimas. A partir de enero se observaron anomalías negativas, registrando en febrero los mayores valores, -0,34 ups (Paita) y -0,04 ups (Chicama). Destacó la presencia de anomalías positivas de hasta +0,13 ups entre mayo y julio en Paita y +0,07 ups en junio frente a Chicama (Tabla 3).

Masas de agua y diagramas T-S

Los diagramas T-S, de las secciones de Paita y Chicama, confirman la coexistencia y/o alternancia de masas de aguas de la región ecuatorial, subtropical así como aguas costeras frías, resultantes del afloramiento y mezcla de tipos de agua (Figs. 4-7 y 8) (ZUTA y GUILLÉN, 1970; TSUCHIYA y TALLEY, 1998; SCHNEIDER *et al.*, 2003; LLANILLO *et al.*, 2012; GRADOS *et al.*, 2018; entre otros).

En el diagrama T-S se observó en febrero y marzo 2017, en menor medida, salinidades <34,0 con temperaturas muy altas. Si bien el rango de temperaturas está por encima de los valores propuestos por GRADOS *et al.* (2018), las aguas tropicales superficiales (ATS),

Salinity and haline anomalies

In December 2016, maximum salinity values of ~35.0 PSU over a depth of 100 m were recorded in Paita between 40 and 100 nm (Fig. 6a). From January to March, they were lower at 34.7 PSU over a depth of 25 m (Fig. 6b, c, d). In April, salinity decreased from 60 nm at the surface to 100 nm over a depth of 50 m (Fig. 6e). In May, values greater than 35.1 PSU were present in the subsurface layer between 25 and 100 m (Fig. 6f). By June, values less than 34.7 PSU were present in the surface layer (< 25 m) between 20 and 100 nm, while another one greater than 35.1 PSU was observed, below this, along the section and up to a depth of 120 m on average (Fig. 6g).

In December 2016, salinity values of 35.0 PSU were predominant in Chicama over a depth of 100 m, but outside the 80 nm. In the surface layer, salinities of 35.1 PSU were recorded (Fig. 7a). In January and February, 35.0 PSU predominated at depths between 80 and 125 m (Fig. 7b, c). At the surface, 35.0 PSU were between 60 and 100 nm while, within 40 nm, salinities of 34.7 and 34.8 PSU were found (Fig. 7c). In March and April, salinities of 34.4 to 34.8 PSU were observed in both, OZ and CZ. In the latter, the freshwater input, which had a higher incidence in March, is likely to be the main reason for these values (ENFEN, 2017) (Fig. 7 d, e). From April to June in the OZ, the highest salinities values of 35.1 to 35.4 PSU were recorded, and then they shifted towards the coast with greater amplitude in June (Fig. 7d, e, f, and g).

In December 2016, salinity anomalies showed minimal variations, while from January onwards, negative anomalies were observed, with the highest values being recorded in February, -0.34 PSU (Paita) and -0.04 PSU (Chicama). Positive anomalies of up to +0.13 PSU were observed between May and July (Paita) and +0.07 PSU in June (Chicama) (Table 3).

Water masses and T-S diagrams

The T-S diagrams of the Paita and Chicama sections confirm the coexistence and/or alternation of equatorial and subtropical water masses, as well as cold coastal waters, resulting from the upwelling, and mixing waters (Figs. 4-7 y 8) (ZUTA & GUILLÉN, 1970; TSUCHIYA & TALLEY, 1998; SCHNEIDER *et al.*, 2003; LLANILLO *et al.*, 2012; GRADOS *et al.*, 2018, among others).

In the T-S diagram, salinities <34.0 with very high temperatures were observed in February and March 2017 to a lesser extent. Although the temperature range is above the values proposed by GRADOS *et al.* (2017), the tropical surface waters (TSW) fit in the

sí caben en la clasificación de FIEDLER & TALLEY (2006), señalando mayor incidencia en la ZC, la intrusión de esa masa de agua y su mezcla con aguas ecuatoriales superficiales (AES); las altas temperaturas se deberían a la fuerte estratificación en dichos meses. Por consiguiente, en la Sección Paita (SP), se encontraron (Fig. 6):

1. ACF (diciembre 2016), con TP entre 16 y 18 °C y salinidad de 35,0 ups.
2. AES relativamente cálidas (TP >24 °C con salinidad menor a 34,8 ups) y DP promedio de 22,5 kg/m³ sobre 25 m de profundidad. Esa masa de agua se detectó de enero a marzo y también en junio, posiblemente debido a la advección de una onda Kelvin cálida (ENFEN, 2017).
3. ASS con salinidad >35,1 ups, TP >18 °C y DP promedio de 24,5 kg/m³ sobre 50 m de profundidad. Esa masa de agua fue detectada principalmente en mayo y junio.
4. AESS con TP de 14 °C-18 °C y DP promedio de 25,4 kg/m³ entre 50 y 200 m de profundidad.
5. ATS y mezcla de AES con ATS, en febrero 2017, menor intensidad en marzo, con salinidades <34,0 y temperaturas altas.
6. Aguas de mezcla conformadas por AES, ASS y aguas del afloramiento (ACF). Sin embargo, se debe considerar la influencia de las descargas continentales debido a las intensas precipitaciones registradas entre enero y abril (ENFEN, 2017).

Por su parte en la sección Chicama (SCH) se identificaron (Fig. 7):

1. ACF (diciembre 2016), con TP entre 16 y 18 °C; salinidad entre 34,9 y 35 ups y AES en enero con TP entre 19 y 25 °C, salinidad de 34,8 ups.
2. AES con TP >24 °C, salinidad menor a 34,8 ups y DP promedio de 24,1 kg/m³ sobre 50 m de profundidad, con mayor dominancia en la ZC (febrero y marzo), mientras que en la ZO se mezcló con las ASS, con DP promedio de 24,7 kg/m³.
3. Aguas de baja salinidad (34,4 a 34,8 ups), observadas en abril se debió debido al aporte continental en la ZC (ENFEN, 2017).
4. Las ASS con 18 °C, TP <24 °C, y salinidades altas de 35,1 a 35,4 ups estuvieron presentes en forma permanente desde marzo hasta junio.

classification of FIEDLER & TALLEY (2006), indicating a higher incidence in the CZ, as well as the intrusion of that water mass and its mixing with equatorial surface waters (ESW). The high temperatures would be explained by the strong stratification in those months. Consequently, in the Paita Section (PS), the following were found (Fig. 6):

1. CCW (December 2016), with PT between 16 and 18 °C and salinity of 35.0 PSU.
2. Relatively warm ESW (PT >24 °C with salinity less than 34.8 PSU) and mean PD of 22.5 kg/m³ over a depth of 25 m. This water mass was detected from January to March and also in June, possibly due to the advection of a warm Kelvin wave (ENFEN, 2017).
3. SSW with salinity >35.1 PSU, PT >18 °C, and average PD of 24.5 kg/m³ over a depth of 50 m. This water mass was detected mainly in May and June.
4. ESSW with PT of 14 °C-18 °C and mean PD of 25.4 kg/m³ at depths between 50 and 200 m.
5. TSW and mixing waters (ESW+TSW) in February 2017, lower intensity in March, with salinities <34.0 PSU and high temperatures.
6. Mixing waters formed by ESW, SSW, and upwelling waters (CCW). However, the river inputs must be considered due to the heavy rainfall recorded between January and April (ENFEN, 2017).

In the Chicama section (ChS), the following were identified (Fig. 7):

1. CCW (December 2016), with PT between 16 and 18 °C, salinity between 34.9 and 35 PSU, and ESW in January with PT between 19 and 25 °C, salinity of 34.8 PSU.
2. ESW with PT >24 °C, salinity less than 34.8 PSU and mean PD of 24.1 kg/m³ over a depth of 50 m, with greater dominance in the CZ (February and March), while in the OZ it was mixed with SSW, with mean PD of 24.7 kg/m³.
3. Low salinity waters (34.4 to 34.8 PSU), observed in April, were the result of continental input in the CZ (ENFEN, 2017).
4. SSWs with 18 °C, PT <24 °C, and high salinities of 35.1 to 35.4 PSU were permanently present from March to June.

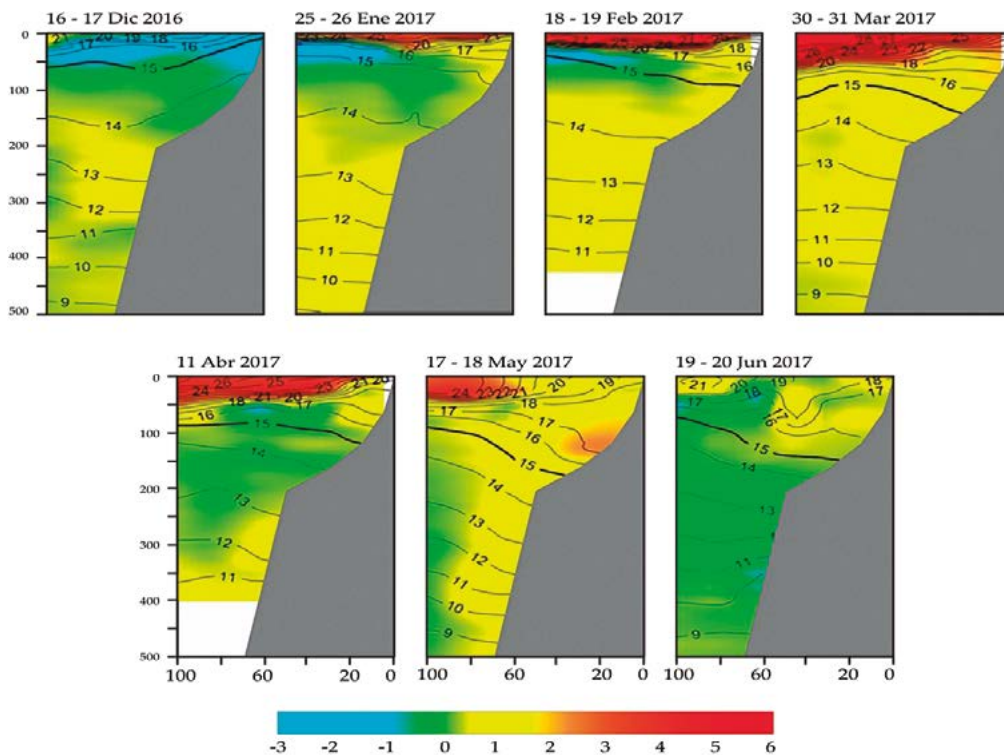


Figura 6.- Distribución vertical de la salinidad (ups) en la sección Paita en relación a la distancia de la costa (nm). Diciembre 2016 - junio 2017. Los rangos de salinidad indican la presencia de diferentes masas de agua durante el periodo de estudio

Figure 6. Vertical distribution of salinity (PSU) in the Paita section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - June 2017. Salinity ranges indicate the presence of different water masses during the study period

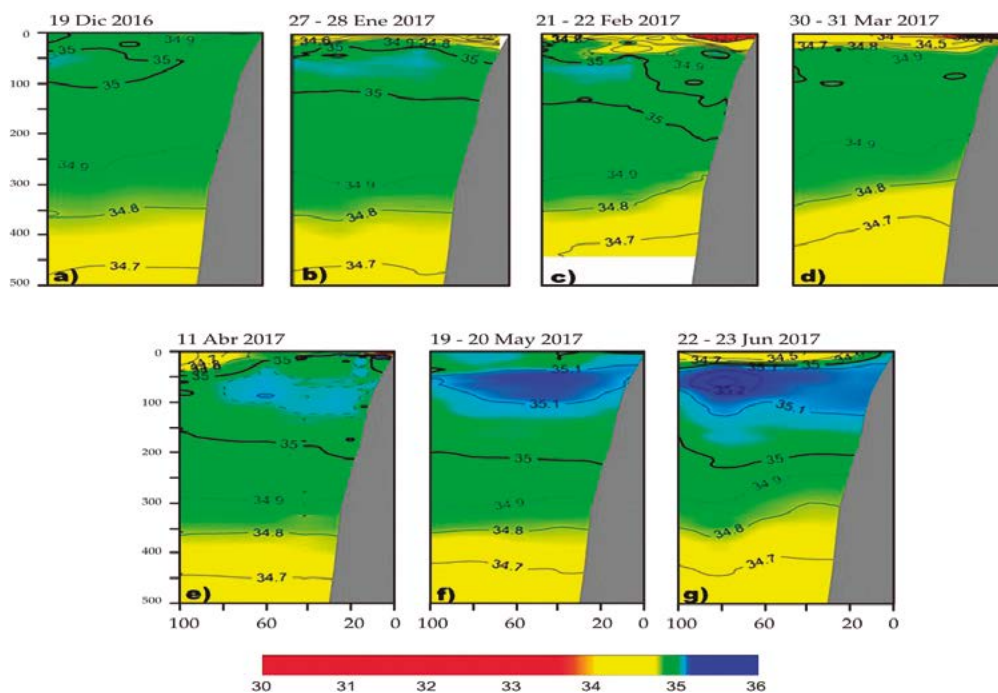


Figura 7.- Distribución vertical de la salinidad (ups) en la sección Chicama en relación a la distancia de la costa (nm). Diciembre 2016 - junio 2017. Los rangos de salinidad indican presencia de diferentes masas de agua durante el periodo de estudio

Figure 7. Vertical distribution of salinity (PSU) in the Chicama section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - June 2017. Salinity ranges indicate presence of different water masses during the study period

Tabla 3.- Anomalías de salinidad (ups) en la zona costera y oceánica en las secciones de Paita y Chicama. Cada valor indica el promedio mensual integrado en la vertical sobre 100 m en la zona costera y 300 m en la zona oceánica. Setiembre 2016 - agosto 2017

Table 3. Salinity anomalies (PSU) in the coastal and oceanic zones in the Paita and Chicama sections. Each value indicates the monthly average integrated into the vertical above 100 m (CZ) and 300 m (OZ). September 2016 - August 2017

Año	Mes	Paita (ZC)	Paita (ZO)	Chicama (ZC)	Chicama (ZO)
2016	Set	0,00	-0,03	-0,04	-0,02
2016	Oct	0.03	-0,01	0,01	0,02
2016	Nov	-0.03	-0,02	-0,01	-0,03
2016	Dic	0.01	0,00	-0,02	-0,02
2017	Ene	-0,07	0,00	0,00	-0,01
2017	Feb	-0,34	-0,02	-0,04	-0,02
2017	Mar	-0,26	-0,07	-0,08	0,01
2017	Abr	0,05	0,02	-0,01	-0,01
2017	May	0,13	0,07	0,04	0,00
2017	Jun	0,13	0,04	0,07	0,01
2017	Jul	0,13	0,08	0,05	0,04
2017	Ago	0,06	0,00	0,02	0,01

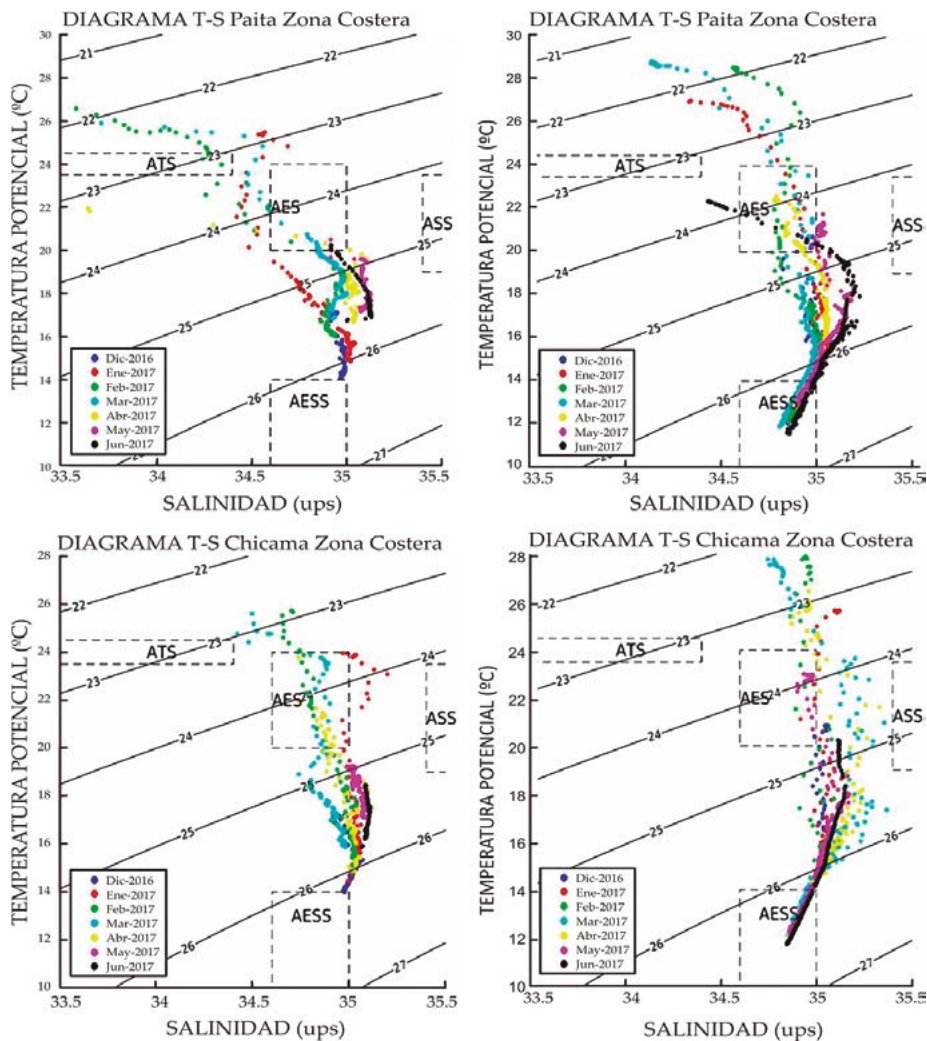


Figura 8.- Diagrama T-S en la sección Paita y Chicama (diciembre 2016 – junio 2017). Panel superior Paita: izquierdo (ZC), derecho (ZO). Panel inferior Chicama: izquierdo (ZC), derecho (ZO)

Figure 8. T-S diagram in the Paita and Chicama section (December 2016 - June 2017). Paita upper panel: left (CZ), right (OZ). Lower Chicama panel: left (CZ), right (OZ)

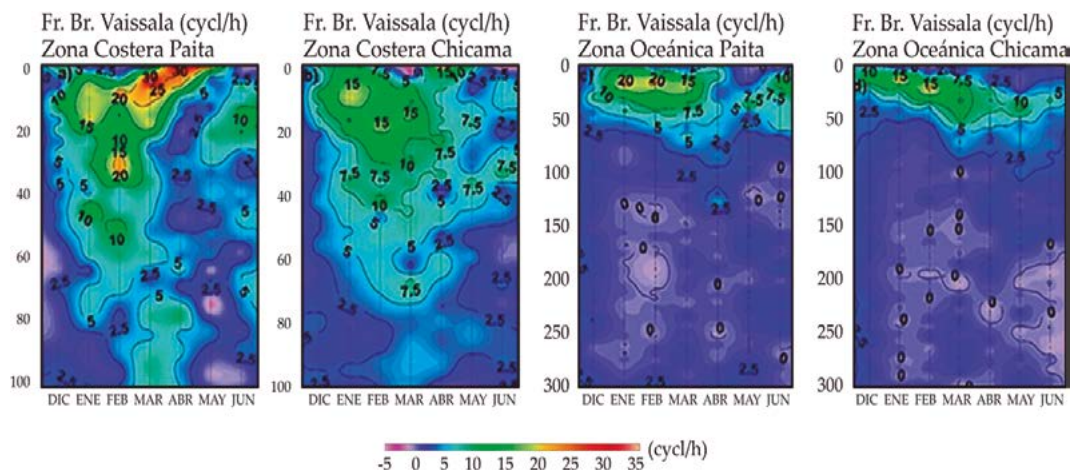


Figura 9.- Perfiles verticales de la frecuencia de Brunt-Väisälä (cycl/h), a) ZC sección Paita, b) ZC sección Chicama. c) ZO sección Paita y d) ZO sección Chicama. Cada figura representa el promedio mensual sobre 100 m de profundidad dentro de las 30 mn en la ZC y sobre 300 m de profundidad en la ZO entre 40-100 mn. Diciembre 2016 - junio 2017

Figure 9. Vertical profiles of the Brunt-Väisälä frequency (cycl/h), a) Paita’s CZ, b) Chicama’s CZ section. c) Paita’s OZ, and d) Chicama’s OZ. Each figure represents the monthly average over a depth of 100 m within 30 nm (CZ) and over 300 m (OZ) between 40-100 nm. December 2016 - June 2017

Cambios en la estratificación de la columna de agua

En la Fig. 9 se presentan los valores obtenidos para la frecuencia de Brunt-Väisälä (FBV) durante el periodo diciembre 2016-junio 2017. Estos fueron máximos sobre 50 m de profundidad en ZC y 100 m en ZO. Frente a Paita, la mayor estratificación en la ZC se registró entre febrero y abril con valores de FBV > 20 ciclos/h sobre 10 m de profundidad; mientras en la ZO los valores máximos (> 15 ciclos/h) se encontraron sobre 30 m de profundidad entre enero y marzo. En general, frente a Paita, se observó mayor estratificación en la ZC respecto a la ZO (Fig. 9a, c). Frente a Chicama, la diferencia de la estratificación entre ambas zonas fue mínima, siendo enero y febrero donde la FBV alcanzó su valor máximo (FBV=15 ciclos/h).

FLUJOS GEOSTRÓFICOS

Se presentan las secciones verticales de Paita y Chicama, de las velocidades geostroficas (VGs) relativa a 500 m de profundidad de diciembre 2016 a junio 2017.

Sección Paita

En diciembre 2016, la ZO se caracterizó por presencia de flujos en dirección al norte con velocidades del orden de 40 cm/s por fuera de ~20 mn de la costa y sobre ~50 m de profundidad (Fig. 10a). En enero 2017 en la ZC se presentaron flujos en dirección al sur sobre ~100 m de profundidad, velocidades entre 10 y 20 m/s dentro de 20 mn, así como flujos en dirección al norte con 40 cm/s sobre 25 m de profundidad y por fuera de 30 mn (Fig. 10b). Para

Changes in the stratification of the water column

Fig. 9 shows the values obtained for the Brunt-Väisälä frequency (BVF) between December 2016-June 2017. These were maximum over a depth of 50 m in the CZ and 100 m in the OZ. Off Paita, the greatest stratification in the CZ was recorded between February and April with BVF values > 20 cycles/h over a depth of 10 m. In the OZ, the maximum values (> 15 cycles/h) were found over a depth of 30 m between January and March. The stratification was generally greater in the CZ than in the OZ (Fig. 9a, c). The difference in stratification between the two zones off Chicama was minimal, with the BVF peaking in January and February (BVF=15 cycles/h).

GEOSTROPHIC FLUXES

Below we present the Paita and Chicama vertical sections of the geostrophic velocities (GVs) relative to a depth of 500 m from December 2016 to June 2017.

Paita Section

In December 2016, the OZ was characterized by the presence of northward flows with velocities around 40 cm/s outside ~20 nm offshore and over a depth of ~50 m (Fig. 10a). During January 2017, southward flows over a depth of ~100 m, with velocities between 10 and 20 m/s within 20 nm, as well as northward, flows with 40 cm/s over a depth of 25 m and outside 30 nm (Fig. 10b) characterized the CZ. In February, southward flows predominated with velocities of 10 cm/s

febrero predominaron flujos en dirección al sur con velocidades de 10 cm/s sobre 100 m en la ZC y velocidades de 20 cm/s sobre 50 m entre 40 y 60 mn (Fig. 10c). Durante marzo primó un núcleo de flujos con dirección al sur, velocidades de 10 a 30 cm/s entre 25 y 125 m de profundidad, de 10 a 60 mn (Fig. 10d). En abril, los flujos fueron al sur con velocidades entre 10 y 30 cm/s sobre 350 m de profundidad y entre 30 y 60 mn (Fig. 10e). Finalmente, en mayo continuaron los flujos en dirección al sur con velocidades entre 10 y 20 cm/s sobre 100 m de profundidad y de 10 a 80 mn (Fig. 10f). Para junio, el núcleo de flujos tuvo dirección al norte con velocidad entre 20 y 40 cm/s sobre 75 m de profundidad y de 30 a 90 mn (Fig. 10g).

over 100 m in the CZ and velocities of 20 cm/s over 50 m between 40 and 60 nm (Fig. 10c). In March, a southward flow core prevailed, with velocities of 10 to 30 cm/s at depths between 25 and 125 m, from 10 to 60 nm (Fig. 10d). There were southward flows in April, with velocities between 10 and 30 cm/s over a depth of 350 m and between 30 and 60 nm (Fig. 10e). Finally, in May, southerly flows continued with velocities between 10 and 20 cm/s over a depth of 100 m and from 10 to 80 nm (Fig. 10f). By June, the core flows were northward with velocities between 20 and 40 cm/s over a depth of 75 m and from 30 to 90 nm (Fig. 10g).

Sección Chicama

En diciembre 2016 predominaron flujos con dirección al norte y velocidades de 10 cm/s sobre 50 m de profundidad entre 10 y 30 mn (Fig. 11a). En enero cambiaron la dirección al sur con velocidades de 10 a 20 cm/s sobre 50 m y entre 60 y 90 mn frente a la costa (Fig. 11b). En febrero continuaron, aunque más débiles y de menor amplitud, así como un núcleo de flujos con dirección al norte con velocidades de

Chicama section

Northerly fluxes and velocities of 10 cm/s over a depth of 50 m and between 10 and 30 nm predominated in December 2016 (Fig. 11a). In January, they shifted southward with velocities of 10 to 20 cm/s over 50 m and between 60 and 90 nm offshore (Fig. 11b). In February they continued, although weaker and with less amplitude, as well as a core of northerly fluxes with velocities of 10 cm/s over 50 m (Fig. 11c). During March, alternating

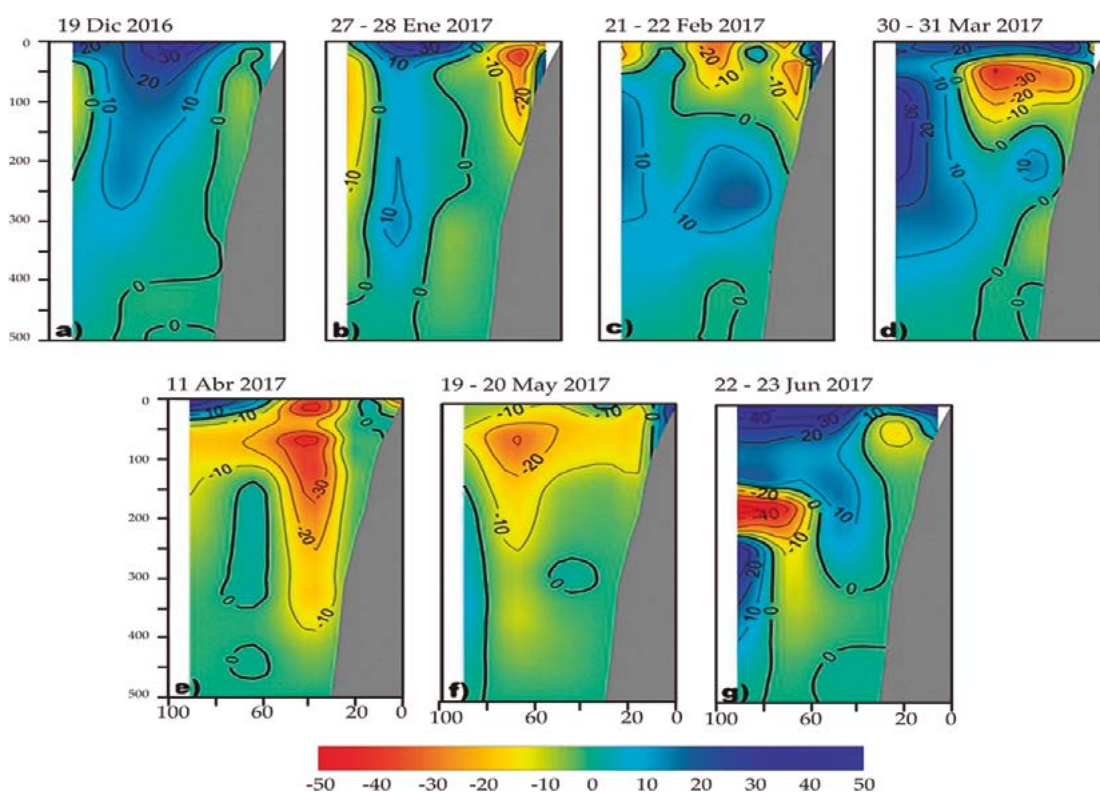


Figura 10.- Distribución vertical del flujo geostroficó (cm/s) en la sección Paita en relación a la distancia de la costa (mn). Diciembre 2016 - junio 2017. Los valores positivos de flujos con dirección norte mientras que los valores negativos indican flujos de dirección sur

Figure 10. Vertical distribution of geostrophic flux (cm/s) in the Paita section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - June 2017. Positive values indicate northerly flows while negative values indicate southerly flows

10 cm/s sobre 50 m (Fig. 11c). En marzo, prevalecieron alternados, uno al norte con velocidad de 30 cm/s sobre 25 m de profundidad entre 20 y 50 mn, y otro con dirección sur, fuera de 50 mn con velocidad de 20 cm/s sobre 100 m de profundidad (Fig. 11d). Para abril continuaron los flujos alternados uno al norte sobre 25 m de profundidad entre 10 y 40 mn y otro homogéneo con dirección al sur con velocidad de 10 cm/s sobre 100 m de profundidad, entre 50 y 70 mn (Fig. 11 e). Predominaron flujos alternos en mayo, uno débil superficial con dirección al norte sobre 10 m de profundidad entre 10 y 20 mn y otro flujo intenso hacia el sur sobre 250 m de profundidad, velocidad de 10 a 30 cm/s entre 40 y 90 mn (Fig. 11f). En junio los flujos con dirección al norte aumentaron su magnitud de 20 a 40 cm/s sobre 50 m de profundidad y entre 30 y 70 mn. En cambio, se observaron flujos con dirección al sur de hasta 20 cm/s, con un núcleo entre 50 y 100 m de profundidad y de 45 a 65 mn, y otro sobre 125 m de profundidad y entre 80 y 100 mn (Fig. 11g).

fluxes prevailed, one to the north with a velocity of 30 cm/s over a depth of 25 m between 20 and 50 nm, and another with a southerly direction, outside 50 nm with a velocity of 20 cm/s over a depth of 100 m (Fig. 11d). In April, alternating fluxes continued one to the north over a depth of 25 m between 10 and 40 nm and another homogeneous southerly flux with a velocity of 10 cm/s over a depth of 100 m, between 50 and 70 nm (Fig. 11 e). Alternating fluxes predominated in May, a weak shallow northerly a depth of 10 m at 20 nm and another intense southerly flux over 250 m, with a velocity ranging from 10 to 30 cm/s between 40 and 90 nm (Fig. 11f). In June, the northerly fluxes increased in magnitude from 20 to 40 cm/s over a depth of 50 m and between 30 and 70 nm. On the other hand, southerly fluxes of up to 20 cm/s were observed, with a core at a depth of 50 to 100 m and between 45 and 65 nm, and another at a depth of 125 m and between 80 and 100 nm (Fig. 11g).

Perfiles promedio de velocidades geostróficas (VG)

En la figura 12, se muestran los perfiles promedio de velocidades geostróficas (VGs) para el período diciembre 2016 - junio 2017 en la ZC sobre 100 m de profundidad y en la ZO sobre 300 m, en ambas secciones.

Mean geostrophic velocity (GV) profiles

Figure 12 shows the mean geostrophic velocity (GV) profiles between December 2016 - June 2017 above a depth of 100 m (CZ) and above 300 m (OZ) in both sections.

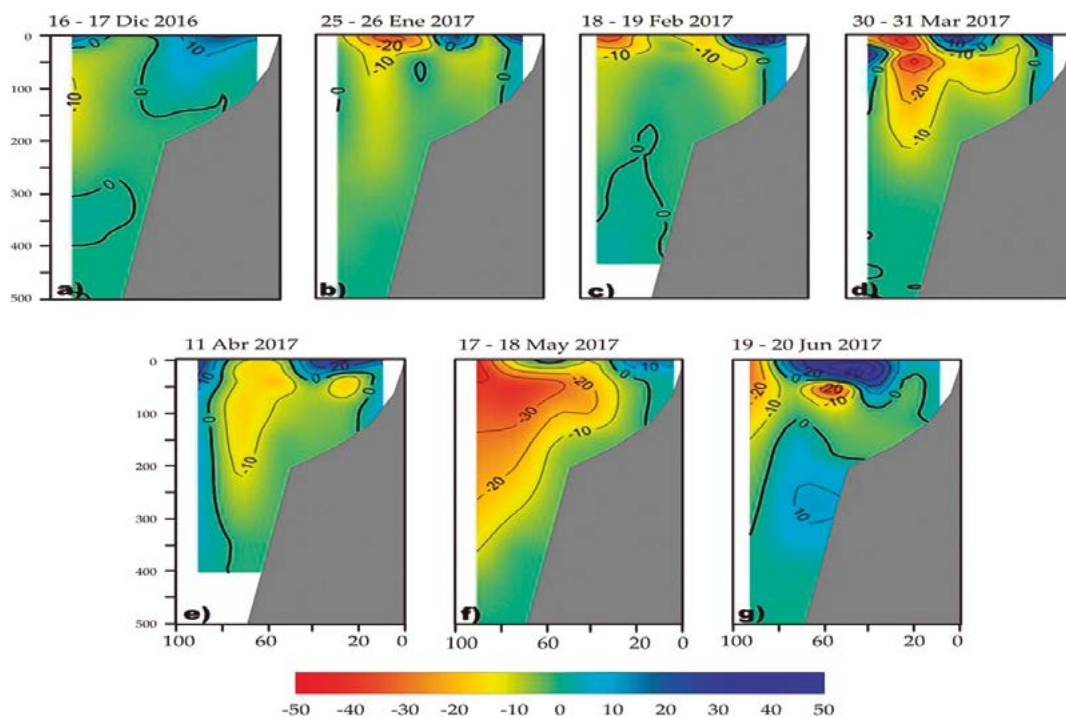


Figura 11.- Distribución vertical del flujo geostrófico (cm/s) en la sección Chicama en relación a la distancia de la costa (mn). Diciembre 2016 - junio 2017. Los valores positivos indican flujos de dirección norte mientras que los valores negativos indican flujos de dirección sur

Figure 11. Vertical distribution of geostrophic flux (cm/s) in the Chicama section in relation to distance from the coast (nm). December 2016 - June 2017. Positive values indicate northerly fluxes while negative values indicate southerly fluxes

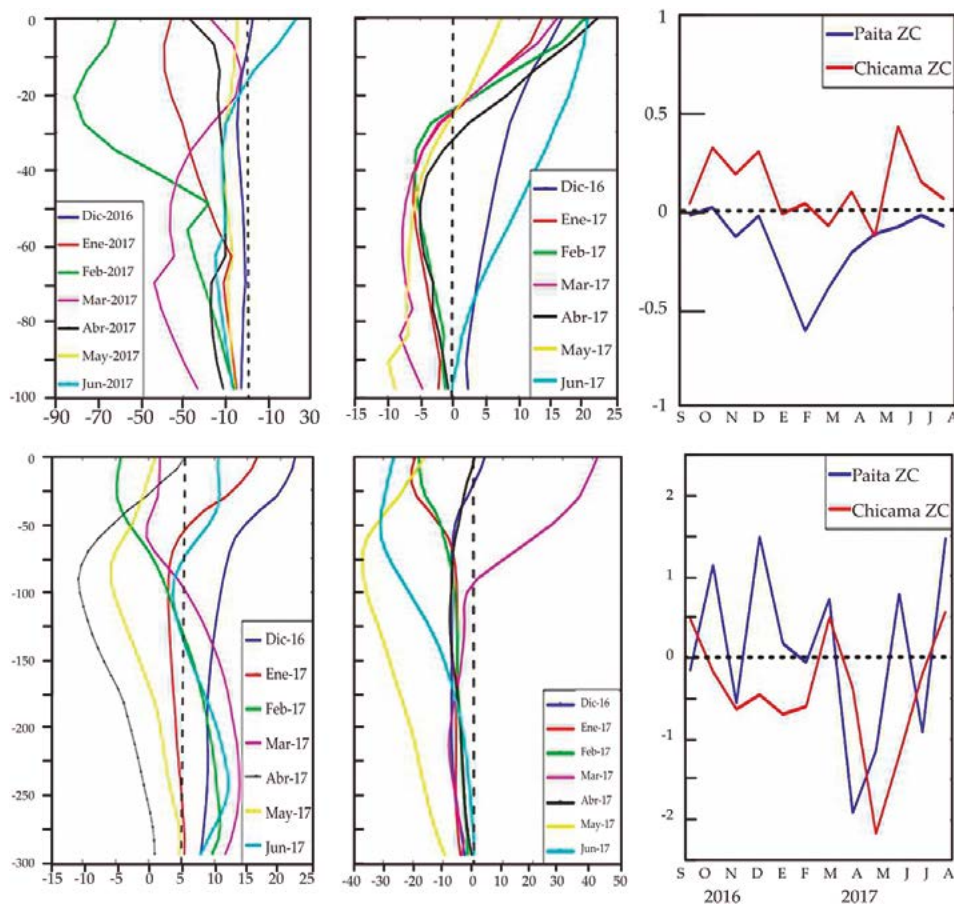


Figura 12.- Perfiles verticales de velocidades geostroficadas (cm/s), entre diciembre 2016 y junio 2017, en la ZC; a) Sección Paita, b) Sección Chicama; y en la ZO: c) Sección Paita y d) Sección Chicama. Cada perfil representa el promedio mensual sobre 100 m de profundidad dentro de las 30 mn en la ZC y sobre 300 m de profundidad en la ZO (40-100 mn). Transporte de volumen integrado en la ZC (e) y en la ZO (f) de las secciones Paita y Chicama. Panel superior: zona costera; panel inferior: zona oceánica. Columna izquierda Paita, Columna derecha Chicama

Figure 12. Vertical profiles of geostrophic velocities (cm/s), between December 2016 and June 2017, in the CZ; a) Paita Section, b) Chicama Section, and in the OZ: c) Paita Section and d) Chicama Section. Each profile represents the monthly average over a depth of 100 m within 30 nm in the CZ and over a depth of 300 m in the OZ (40-100 nm). Integrated volume transport in the CZ (e) and OZ (f) of the Paita and Chicama sections. Upper panel: coastal zone; lower panel: oceanic zone. Left column Paita, right column Chicama

La mayor variabilidad de VG se presentó en las capas de 0 a 50 m y de 0 a 100 m en la ZC de Paita, así como en ZO de Chicama, también se registraron las máximas VG con dirección al norte y sur. En la ZC de Paita los flujos dominantes fueron hacia el sur; en caso de Chicama, los flujos dominantes fueron al norte sobre 50 m y con dirección al sur por debajo de 50 m. La ZO de Paita se comportó de forma muy dinámica, pasando de flujos con dirección del norte al sur; en cambio frente a Chicama los flujos fueron casi siempre con dirección al sur.

Transporte de volumen integrado (TGV)

Las figuras 12e, 2f muestran series de tiempo del transporte de volumen geostrofico (TVG) mensual calculado para la ZC y ZO, tanto de Paita como de Chicama. Se obtienen a partir de ecuaciones de balance geostrofico e integrado en profundidad.

The greatest GV variability was in the 0 to 50 m and 0 to 100 m layers in the Paita’s CZ as well as in the Chicama’s OZ, with maximum northerly and southerly GVs also recorded. In the Paita’s CZ, southerly fluxes predominated, while for Chicama, the dominant fluxes were to the north above 50 m and southward below 50 m. The Paita’s OZ was very dynamic, with fluxes going from north to south, but off Chicama, the fluxes were almost always southward.

Integrated volume transport (GVT)

Figures 12e, 2f show the time series of monthly geostrophic volume transport (GVT) estimated for the CZ and OZ of both Paita and Chicama. They are obtained from geostrophic and depth-integrated balance equations.

En la ZC de Paita el TVG dominante fue principalmente hacia el sur, exhibiendo una débil intensidad hasta diciembre 2016 y a partir de junio, alcanzando su máximo valor en febrero 2017 (-0,62 Sv) (Fig. 12e línea azul). En cambio, en la ZO el TVG se caracterizó por presentar valores positivos (al norte) en diciembre, enero, marzo y junio, con máximo de +1,48 Sv en diciembre. Mientras en febrero, abril y mayo, tuvo dirección al sur, con máximo en abril (-2,1 Sv).

En la ZC de Chicama, el TVG fue hacia el norte entre octubre y diciembre 2016 (varió de +0,2 a 0,3 Sv). Entre enero y marzo su magnitud fue débil (< 0,1 Sv) alternando de dirección. Sus fluctuaciones fueron más intensas a partir de abril, alcanzando el valor máximo en junio, con dirección norte (+0,43 Sv) (Fig. 12e). En la ZO de Chicama, el TVG fue hacia el sur desde noviembre 2016 hasta febrero 2017, con magnitud promedio de 0,5 a 0,6 Sv. En marzo, el TVG se invirtió hacia el norte (+0,5 Sv), mientras de abril a junio 2017 el TVG mostró altos al sur, con el máximo en mayo (-2,15 Sv) (Fig. 12f).

4. DISCUSIÓN

Las manifestaciones de El Niño Costero 2017 en la estructura termohalina, fueron observadas a través de cambios en: masas de agua, circulación y estratificación. Se puede inferir que el evento se desarrolló en tres etapas; inició en enero, máxima intensidad del calentamiento, principalmente superficial, en febrero - marzo, declinación entre abril y mayo.

Los mecanismos de estratificación mostraron influencia directa durante ENC 2017, debido al debilitamiento de los vientos y alta radiación estacional. Esto contribuyó al rápido calentamiento, así como un acoplamiento océano-atmósfera, ello activó la retroalimentación positiva entre calentamiento costero, convección profunda atmosférica y vientos costeros. Estos procesos acoplados (PENG *et al.*, 2019) permitieron mayor estratificación conforme se desarrolló el evento. El proceso de estratificación frente a Paita se dio a inicios del evento en la ZO, para luego ampliarse a la ZC durante febrero y marzo. Este desfase se debería a que los vientos en la ZO mostraron mayores anomalías negativas respecto a las anomalías en la ZC al inicio del evento (Fig. 3). Frente a Chicama ocurrió algo similar, la mayor estratificación en la ZO se presentó entre enero y febrero, en cambio en la ZC la estratificación fue importante en marzo por el debilitamiento del viento y a la advección hacia el sur de aguas cálidas del norte (AES).

In the Paita's CZ, the dominant GVT was mainly to the south, showing a weak intensity until December 2016 and from June onwards, peaking in February 2017 (-0.62 Sv) (Fig. 12e blue line). In contrast, in the OZ, the GVT was characterized by presenting positive values (to the north) in December, January, March, and June, peaking at +1.48 Sv in December. In February, April, and May, it was southward, with a peak of - 2.1 Sv in April.

In the Chicama's CZ, a northerly VGT was observed between October and December 2016 (ranging from +0.2 to 0.3 Sv). Between January and March, its magnitude was weak (< 0.1 Sv) shifting direction. From April onwards, its fluctuations were more intense, peaking in June, with a northerly direction (+0.43 Sv) (Fig. 12e). In Chicama's OZ, the VGT was southward from November 2016 to February 2017, (varying between 0.5 to 0.6 Sv). In March, the VGT shifted to the north (+0.5 Sv), while from April to June 2017, the VGT peaked to the south (in May with -2.15 Sv) (Fig. 12f).

4. DISCUSSION

2017 CEN altered the thermohaline structure through changes in water masses, circulation, and stratification. Therefore, we can infer that it was a three-stage event: it started in January, peaking in the intensity of the warming, mainly on the surface, in February-March, and waning between April and May.

During 2017 CEN, stratification mechanisms showed direct influence due to weakening winds and high seasonal radiation, thus contributing to the rapid warming, as well as an ocean-atmosphere coupling, this activated the positive feedback between coastal warming, atmospheric deep convection, and coastal winds. These coupled processes (PENG *et al.*, 2019) allowed further stratification as the event unfolded. The stratification process off Paita occurred at the beginning of the event in the OZ and then extended into the CZ during February and March. This lag, which was caused by the winds in the OZ, showed greater negative anomalies compared to the anomalies in the CZ at the beginning of the event (Fig. 3). In Chicama, the greatest stratification in the OZ occurred between January and February, while in the CZ the stratification was significant in March as a result of the weakening of the wind and the advection of warm waters from the north (ESW) to the south.

Los índices térmicos, el ICEN y LABCOS para fines del 2016 indicaban condiciones normales. Sin embargo, el persistente debilitamiento de los vientos del sureste observados desde diciembre 2016, con pulsos de vientos del norte (Fig. 3), contribuyó al rápido cambio de condición térmica frente a Paita y Chicama. Así alcanzó la condición cálida débil en enero y moderada en febrero y marzo, según el ICEN (ENFEN, 2017). Aunado a los vientos débiles (anomalías entre -1 y -3,5 m/s) los flujos geostroficados mantuvieron la dirección predominante hacia el sur, intensificando el transporte de aguas tropicales y ecuatoriales superficiales de norte a sur (aguas cálidas y de baja salinidad). Esto alteró la estructura termohalina vertical frente a Paita y Chicama, observando gradientes intensos tanto de temperatura como salinidad entre enero y abril, principalmente sobre los primeros 50 m de profundidad.

Además del desplazamiento inusual de AES hasta Chicama, durante febrero y marzo, las que jugaron un rol importante en la modificación de la estructura termohalina en la zona costera fueron: las abundantes descargas de los ríos, debido a extraordinarias precipitaciones registradas, cuya acumulación entre enero y marzo fue una de las más altas en los últimos 100 años (TAKAHASHI y MARTÍNEZ, 2017). Por último, la llegada de una onda Kelvin cálida y su propagación como onda atrapada a la costa (OAC) en febrero-marzo (ECHEVIN *et al.*, 2018; QUISPE *et al.*, 2021; ANCULLE *et al.*, 2021) contribuyó al incremento del calentamiento y estratificación, sobre todo en el norte-centro del litoral peruano.

En general, los mecanismos locales tuvieron un rol preponderante en el desarrollo del ENC 2017, a diferencia de los eventos de 1982-1983 y 1997-1998 que estuvieron asociados a mecanismos globales (ESPINOZA *et al.*, 2021). Durante el evento, la advección de las ATS y AES mostraron cambios importantes en su distribución, desplazándose las AES inclusive más al sur de Chicama. En cambio, en los eventos EN, la salinidad tiende a elevarse significativamente por la aproximación a la costa de las ASS (GRADOS *et al.*, 2018).

5. CONCLUSIONES

- ENC 2017, a diferencia de la evolución de los eventos EN en general, se caracterizó por presentar un calentamiento repentino y muy rápido a inicios del 2017. Se debió mayormente al debilitamiento del viento del sureste, que registró anomalías negativas de 1 a 3,5 m/s, propiciando el desplazamiento al sur de aguas tropicales y ecuatoriales y la estratificación térmica intensa sobre 30 m de profundidad.

ICEN and LABCOS indexes for late 2016 indicated normal conditions. The persistent weakening of southeasterly winds observed since December 2016, with pulses of northerly winds (Fig. 3), contributed to the rapid change of thermal condition off Paita and Chicama. According to ICEN (ENFEN, 2017), it reached a weak warm condition in January and moderate in February and March. Coupled with the weak winds (anomalies between -1 and -3.5 m/s) the geostrophic fluxes maintained the predominant southward direction, intensifying the transport of tropical and equatorial surface waters from north to south (warm and low salinity waters). This altered the vertical thermohaline structure off Paita and Chicama, with intense temperature and salinity gradients observed between January and April, mainly over the first 50 m of depth.

Between February and March, besides the unusual displacement of ESW to Chicama, the following played an important role in the modification of the thermohaline structure in the coastal zone: abundant river inputs due to extraordinary rainfall, whose accumulation between January and March was one of the highest in the last 100 years (TAKAHASHI & MARTÍNEZ, 2017). Finally, the arrival of a warm Kelvin wave and its propagation as a coastal-trapped wave (CTW) in February-March (ECHEVIN *et al.*, 2018; QUISPE *et al.*, 2021; ANCULLE *et al.*, 2021) contributed to increased warming and stratification, particularly in the north-central Peruvian coast.

Local mechanisms generally played a key role in the development of 2017 CEN, unlike the 1982/83 and 1997/98 events, which were associated with global mechanisms (ESPINOZA *et al.*, 2021). During the event, the advection of the TSW and ESW showed important changes in their distribution, with the latter moving even further south of Chicama. On the other hand, in EN events, salinity tends to rise significantly due to the approach to the coast of the SSWs (GRADOS *et al.*, 2018).

5. CONCLUSIONS

- 2017 CEN, unlike general EN events, was characterized by sudden and very rapid warming in early 2017. It was mostly due to the weakening of the southeast wind, which recorded negative anomalies of 1 to 3.5 m/s, favoring the southward displacement of tropical and equatorial waters and intense thermal stratification over a depth of 30 m.

- La distribución térmica mostró que las mayores temperaturas se localizaron en la ZO de ambas localidades, alcanzando valores de 28,9 °C en marzo frente a Paita y de 27,9 °C en febrero frente a Chicama. Sin embargo, las anomalías térmicas máximas se registraron en la ZC frente a Paita (+5,4 °C) en febrero, seguida de la ZO frente a Chicama (+4,5 °C) en marzo.
- La advección de las aguas del norte modificó la estructura termohalina local, registrando ATS hasta Paita dentro de las 20 mn y sobre los 15 m de profundidad, durante febrero y marzo. Mientras las AES alcanzaron Chicama durante febrero y marzo sobre 20 m. Por otro lado, el aporte de agua dulce desde la zona continental debido a las precipitaciones, contribuyó en la modificación de la estructura termohalina en la ZC, sobre todo en marzo y abril, que se registraron las mayores descargas (caudales) de los ríos.
- Respecto a la estratificación, fue más importante durante enero y febrero en la ZO; en cambio, durante marzo y abril fue la ZC la que presentó mayor gradación.
- Los TVG muestran diferencias en los cambios espaciales y temporal de los flujos entre Paita y Chicama. Los flujos integrados con dirección al sur prevalecieron en la ZC de Paita, pero no en Chicama al inicio de ENC 2017. En la ZO de Paita predominaron flujos al sur a partir de otoño. En cambio, en la ZC de Chicama, prevalecieron flujos con dirección al norte, pero en la ZO fueron con dirección al sur durante todo el evento.
- The thermal distribution showed that peaks were located in the OZ of both localities, reaching values of 28.9 °C in March off Paita and 27.9 °C in February off Chicama. Nonetheless, the maximum thermal anomalies were recorded in the CZ off Paita (+5.4 °C) in February, followed by the OZ off Chicama (+4.5 °C) in March (+4.5 °C).
- During February and March, the advection of northern waters modified the local thermohaline structure, with TSW reaching Paita within 20 nm and above a depth of 15 m. While the ESW reached Chicama during the same period over 20 m. The freshwater input due to rainfall contributed to the modification of the thermohaline structure in the CZ, especially in March and April, when the greatest discharges (flows) of the rivers were recorded.
- The stratification, was more important during January and February in the OZ. Conversely, during March and April, it was the CZ that presented the greatest gradation.
- The VGTs show differences in spatial and temporal changes in fluxes between Paita and Chicama. Southerly integrated fluxes predominated in the Paita's CZ, but not in Chicama at the beginning of the event. Southerly fluxes still predominated in the Paita's OZ starting in autumn. On the other hand, in the Chicama's CZ, northerly fluxes prevailed, but in the OZ, they were southward throughout the event.

Agradecimientos

Deseamos expresar agradecimiento al Dr. Dimitri Gutiérrez Aguilar, Director General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático del IMARPE, por su paciencia, tiempo y dedicación para revisar el presente trabajo y sus aportes brindados, de esa manera permitió que se terminara el presente estudio de manera exitosa.

El trabajo fue parte del Proyecto "Estudio y monitoreo de los efectos del fenómeno el Niño en el ecosistema marino frente al Perú" del programa "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres -PP 0068" y actividad "Generación de información y monitoreo del Fenómeno el Niño" que está enmarcado en el Programa Presupuestal "Presupuesto por Resultados" (PpR) y que está inmerso en el programa de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático del IMARPE.

Acknowledgments

We would like to thank Dr. Dimitri Gutiérrez Aguilar, General Director of IMARPE's Oceanographic Research and Climate Change area, for his patience, time, and dedication in reviewing this work and his contributions, which allowed us to complete this study.

This work was part of the project "Study and monitoring of the effects of the El Niño phenomenon on the marine ecosystem off Peru" of the program "Reduction of vulnerability and emergency response to disasters -PP 0068" and the activity "Generation of information and monitoring of the El Niño phenomenon", which is part of the Budgetary Program "Budget for Results" (BfR) and is part of the IMARPE's Oceanography and Climate Change Research Program.

REFERENCIAS / REFERENCES

- ANCULLE T, GRACO M, VÁSQUEZ L, GARCÍA W, GUTIÉRREZ D. 2021. Contribución de las ondas Kelvin a las anomalías térmicas de las aguas costeras frente al Perú durante El Niño 2015 – 2016, El Niño Costero 2017. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 362 - 384.
- ARNTZ W E, FAHRBACH E. 1989. El Niño: experimento climático de la naturaleza. Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México
- BARBER R T, CHAVEZ F P. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.222.4629.1203>.
- BENTAMY A, CROIZÉ-FILLON D C. 2012. Gridded surface wind fields from MeteoP/ASCAT measurements. *International J. Remote Sensing*. 33(6): 1729-1754.
- BENTAMY A, KATSAROS K, DRENNAN W M, FORDE E B. 2002. Daily surface wind fields produced by merged satellite data. *American Geophys Union. Geophysical Monograph Series*. 127: 343-349.
- CHAIGNEAU A. *et al.* 2013. Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data. *J. Geophys. Ocean*. 118: 5251-5266.
- CHAVEZ F, BERTRAND A, GUEVARA-CARRASCO R, SOLER P, CSIRKE J. 2008. El sistema de la corriente de Humboldt del norte: breve historia, estado actual y una mirada hacia el futuro. *Progress in Oceanography*. 79: 95–105.
- CORREA D, VÁSQUEZ L, GUTIÉRREZ D. 2018. Propuesta de escala de vientos para la zona costera y oceánica frente a Perú. Presentación en taller interno IMARPE. Callao, setiembre 2018.
- DOMÍNGUEZ N, GRADOS C, VÁSQUEZ L, GUTIÉRREZ D, CHAIGNEAU A. 2017. Climatología termohalina frente a las costas del Perú. Periodo: 1981-2010. Programa Presupuestal 068: Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres. *Inf Inst Mar Perú*. 44(1): 5-13.
- ECHÉVIN V, COLAS F, ESPINOZA D, VÁSQUEZ L, ANCULLE T, GUTIÉRREZ D. 2018. Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño off Northern Peru and Ecuador. *Frontiers in Marine Science*. DOI. 10.3389/fmars.2018.00367
- ENFEN 2012: Definición operacional de los eventos “El Niño” y “La Niña” y sus magnitudes en la costa del Perú. Nota Técnica ENFEN. 2p.
- ENFEN. 2017. Informe Técnico Extraordinario N°001-2017. <http://www.enfen.gob.pe>
- ESPINOZA D, ECHÉVIN V, COLAS F, TAM J, GUTIÉRREZ D, GRACO M, LEDESMA J, QUISPE C. 2019. Oxygen Variability during ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*. DOI: 10.3389/fmars
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHÉVIN V, COLAS F, TAM J, LEDESMA J, VÁSQUEZ L. 2017. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *J. Geophys. Res. Oceans*. 122, 5423–5444. doi: 10.1002/2016JC012439
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHÉVIN 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.
- FIEDLER P C, TALLEY L D. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review, *Prog. Oceanogr.* 69(2-4): 143-180.
- GRADOS C, CHAIGNEAU A, ECHÉVIN V, DOMÍNGUEZ N. 2018. Upper ocean hydrology of the Northern Humboldt System seasonal, interannual and interdecadal scales. *Progress in Oceanography*. 165: 123-144.
- GUNTHER E R. 1936. A report on oceanographic investigations in the Peru Coastal Current, Discovery Rep. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 13: 107–276.
- ICOCHEA L, ROJAS E. 2001. La Corriente Cromwell y sus variaciones en 0°N110°W. Fórum la merluza peruana (*Merluccius gayi peruanus*): biología y pesquería. Pp. 20-28.
- KESSLER W S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69: 181-217.
- KESSLER W S, MCPHADEN M J, WEICKMANN K M. 1995. Forcing intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. *Geophys. J. Res.* 100: 613–610. doi: 10.1029/95JC00382
- KONYAEV K, SABININ K. 1992. Ondas Internas del Océano. San Petersburgo: Hidrometeoizdat. 272 pp.
- LLANILLO P J, KARSTENSEN J, PELEGRI J L, STRAMMA L. 2012. Physical and biogeochemical forcing of oxygen changes in the tropical eastern South Pacific along 86°W: 1993 versus 2009.
- MONTES I, COLAS F, CAPET X, SCHNEIDER W. 2010. On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent. *J. Geophys. Res.* 115: C09003.
- PEDLOSKY J. 2007. The Coastal Bottom Boundary Layer: A Note on the Model of Chapman and Lentz. *J. Phys. Oceanogr.* 37: 2776-2784.
- PENG Q, XIE S -P, WANG D, ZHENG X -T, ZHANG H. 2019. Coupled ocean-atmosphere dynamics of the 2017 extreme coastal El Niño. *Nature Communication*. doi:10.1038/s41467-018-08258-8
- POND S, PICKARD G L. 1983. Introductory dynamical oceanography. 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford.
- QUISPE-CCALLUARI C, CHAMORRO A, ARELLANO C, TAM J. 2021. Comparación de Ondas de Kelvin Ecuatoriales y Ondas Atrapadas a la Costa ocurridas durante El Niño 2015-16 y durante El Niño Costero 2017 frente a Perú: Simulaciones y Observaciones. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 349 - 361.
- QUISPE J, VÁSQUEZ L. 2015. Índice “LABCOS” para la caracterización de eventos El Niño y La Niña frente a la costa del Perú, 1976-2015. Instituto del Mar del Perú. Boletín Trimestral Oceanográfico. 1(1-4): 14-18.
- SILVA N, NESHYBA S. 1979-1980. Masas de agua y circulación geostrofica frente a la costa de Chile austral. *Inst. Antárt. Chil. Ser. Cient.* 25/26: 5-32.
- SCHNEIDER W, FUENZALIDA E, RODRÍGUEZ J, GARCÉS V, BRAVO L. 2003. Characteristics and formation of Eastern South Pacific Intermediate Water, *Geophys. Res. Lett.*, 30(11), 1581, doi: 10.1029/2003GL017086
- TAKAHASHI K. 2004. The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997-98 and 2002 El Niño events. *Ann. Geophys.* 22, 3917–3926. doi: 10.5194/angeo-22-3917-2004
- TAKAHASHI K, MARTINEZ R, MONTECINOS A, DEWITTE B, GUTIÉRREZ D, RODRIGUEZ-RUBIO E. 2014. Regional applications of observations in the eastern Pacific: Western South America, Whitepaper for TPOS2020, 8a.
- TIMMERMANN A, CAPOTONDI A, COBB K, LENGAGNE M, MCPHADEN M, STEIN K, DEWITTE B, TAKAHASHI K, WITTENBERG A, BAYR T, CHIKAMOTO Y, DOMMENGET D, GROTHE P, GUILYARDI E, HAYASHI M, INESON S, KANG

- D, KIM S. 2018. Review "El Niño-Southern Oscillation Complexity. Nature. Vol. 559. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>
- TSUCHIYA M, TALLEY L. 1998. A Pacific hydrographic section at 88°W: Water property distribution. Journal of Geophysical Research. Vol. 103. NC6: 12,899-12,918.
- VILLEGAS N, BARRIENTOS J C, MÁLIKOV I. 2012. Relación entre parámetros océano-atmosféricos y la producción del café verde en Colombia. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 6(1): 88-95.
- WANG C, FIEDLER P C. 2016. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. Prog. Oceanogr. 69: 239-266.
- WOOSTER W S, GILMARTIN M. 1961. The Peru-Chile Undercurrent. J. Mar. Res. (19): 97-122.
- WYRTKI K. 1963. The horizontal and vertical field of motion in the Peru Current. Bull. Scripps Inst. Oceanogr. 8: 313 - 344.
- ZUTA S, GUILLÉN O. 1970. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. Bol Inst Mar Perú. 2(5): 157-324.