FITOPLANCTON EN EL MAR PERUANO EN INVIERNO Y PRIMAVERA, ETAPA INICIAL DEL EVENTO EL NIÑO 2015

PHYTOPLANKTON IN THE PERUVIAN SEA DURING WINTER AND SPRING, ONSET OF THE 2015 EL NIÑO EVENT

Liz Romero[1] *Avy Bernales*[1]
Wilson Carhuapoma[2] *Sonia Sánchez*[1]

RESUMEN

Romero, L., Bernales, A., Carhuapoma, W. & Sánchez, S. (2024). Fitoplancton en el mar peruano en invierno y primavera, etapa inicial del evento El Niño 2015. Inf Inst Mar Perú, 51(4), 403-414.- La comunidad fitoplanctónica del mar peruano fue estudiada durante el crucero de Evaluación de Recursos Pelágicos de invierno-primavera 2015 (Cr. Pelágicos 1508-10) coincidiendo con la etapa inicial del evento El Niño 2015-2016. Los indicadores de masas de agua del fitoplancton presentaron una distribución espacial consistente con el acercamiento de las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) y el repliegue del indicador de aguas costeras frías (ACF) *Protoperidinium obt*usum a la franja costera. El indicador de las Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) *Ceratium breve*, estuvo distribuido hasta 5°S del perfil Paita y frente a Puerto Pizarro, así como a 30 mn de la costa frente a Huarmey y Callao. Los volúmenes de plancton disminuyeron con respecto a periodos El Niño Neutros, alcanzando un valor promedio de 0,79 mL.m^{-3}, con 81,3% de las muestras con valores menores a 1,0 mL.m^{-3}. La mayor abundancia de fitoplancton se observó en el perfil Pacasmayo y Chimbote (1,7 x 10^{6} cel. L^{-1} y 1522,7 cel. L^{-1} a 70 y 24 mn de la costa, respectivamente). La comunidad fitoplanctónica estuvo representada por diatomeas de afloramiento como *Detonula pumila, Chaetoceros socialis, Leptocylindrus danicus, Guinardia striata, Chaetoceros costatus, Ch. debilis* y la diatomea Grupo *Pseudo-nitzschia delicatis*sima (0,17 x 10^{6} cel. L^{-1}). Asimismo, el índice de diversidad de Shannon (H') fluctuó entre 0,61 y 3,09 bits x ind^{-1}. Para concluir, los cambios en la comunidad fitoplanctónica observados desde agosto hasta octubre 2015, durante el evento cálido El Niño, se reflejaron en la disminución de los volúmenes del plancton, en comparación con un año en ausencia de El Niño, sin embargo, se observaron importantes núcleos de abundancia de 1.718.520 cel. L^{-1} frente a Chimbote y Malabrigo.

Palabras clave: fitoplancton marino, diatomeas, inicio El Niño 2015-2016, Perú

ABSTRACT

Romero, L., Bernales, A., Carhuapoma, W. & Sánchez, S. (2024). Phytoplankton in the Peruvian Sea during winter and spring, onset of the 2015 El Niño event. Inf Inst Mar Peru, 51(4), 403-414.- The research cruise targeting pelagic resources, conducted from winter to spring 2015 (Pelagic Cr. 1508-10), studied the phytoplankton community in the Peruvian Sea and coincided with the onset of the 2015/16 El Niño event. The distribution of phytoplankton water mass indicators showed a spatial pattern consistent with the approach of Subtropical Surface Waters (SSW) and the retreat of the Cold Coastal Waters (CCW) indicator *Protoperidinium obtusum* towards the coastal zone. *Ceratium breve*, an indicator of Equatorial Surface Waters (ESW), was found up to 5°S off the Paita profile and near Puerto Pizarro, as well as 30 nm from the coast off Huarmey and Callao. Phytoplankton volumes decreased compared to neutral EN periods, with an average value of 0.79 mL.m^{-3}, and 81.3% of the samples showed values below 1.0 mL.m^{-3}. The highest phytoplankton abundance was observed at the Pacasmayo and Chimbote profiles (1.7 x 10^{6} cells. L^{-1} and 1522.7 cells. L^{-1} at 70 and 24 nm offshore, respectively). The phytoplankton community was mainly composed of upwelling diatoms, including *Detonula pumila, Chaetoceros socialis, Leptocylindrus danicus, Guinardia striata, Chaetoceros costatus, Ch. debil*is, and the diatom *Pseudo-nitzschia delicatissima* (0.17 x 10^{6} cel. L^{-1}). The Shannon diversity index (H') ranged from 0.61 to 3.09 bits x ind^{-1}. In conclusion, the changes in the phytoplankton community observed between August and October 2015 during the EN event were marked by a decrease in plankton volumes compared to a non-El Niño year. However, noticeable concentrations of high abundance were recorded, with 1,718,520 cells. L^{-1} off Chimbote and Malabrigo.

Keywords: marine phytoplankton, diatoms, onset of the 2015/16 El Niño, Peru

1 Instituto del Mar del Perú (Imarpe), DGIOCC, Laboratorio de Fitoplancton y Producción Primaria, lizromero@imarpe.gob.pe
2 Imarpe, DGIOCC, Laboratorio de Hidroquímica

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Afloramiento Peruano (SAP) sostiene una de las pesquerías de engráulidos más productivas del mundo (Chavez *et al*., 2008) debido al papel crucial del fitoplancton en varios procesos biogeoquímicos, ya sea como productores primarios, aportando alta calidad nutricional de ácidos grasos (Rossi *et al*., 2008) o como mediadores clave de la bomba biológica (Basu & Mackey, 2018). La comunidad del fitoplancton, al estar supeditada a la disponibilidad de luz, nutrientes y a la estacionalidad, se ve impactada por la alta variabilidad espaciotemporal del SAP, la cual es a su vez, modulada por el ENSO (*El Niño Southern Oscillatio*n) con sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña). En tal sentido, tenemos el Niño del Pacífico Oriental (EP: *Eastern Pacific*), también conocido como El Niño "Típico" o Canónico, se caracteriza por un calentamiento máximo anómalo de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el Pacífico Tropical Oriental. Por el contrario, El Niño del Pacífico Central (CP: *Central Pacific*), conocido como El Niño Modoki (una palabra japonesa que significa "pseudo") o El Niño de piscina cálida, se caracteriza por un calentamiento débil y anómalo de la TSM a lo largo de la costa occidental de América del Sur y la máxima anomalía de TSM en el Pacífico Tropical Central (Racault *et al*., 2012). Sin embargo, cada evento "El Niño" es único y particular, exhibiendo diferencias en el rango de temperatura del agua a nivel superficial y subsuperficial (Capotondi *et al*., 2015) es así que El Niño 2015-2016, cuya duración se dio desde mayo 2015 hasta marzo 2016, puede ser clasificado como una mezcla de ambos CP y EP (Paek *et al*., 2017).

Durante la primera etapa del evento Extraordinario El Niño 97-98, clasificado así por su magnitud (Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño [Enfen], 2012), las Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) se extendieron hacia el sur del Callao con anomalías térmicas de hasta + 6,2°C, mientras que en la etapa de transición se observó predominio de las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) (Morón & Marquina, 1997). Este calentamiento tuvo impacto negativo en la distribución espacial de la anchoveta (*Engraulis ringens*) y en otros recursos hidrobiológicos de importancia comercial (Gutierrez *et al*., 1999). Además, se registró el efecto negativo sobre la abundancia del fitoplancton, disminuyendo las áreas de afloramiento en el verano de 1997, en especial al norte, con un bajo volumen promedio del plancton de solo 1 mL.m-3 (Delgado *et al*., 2001). Así también, la magnitud de anomalías térmicas del evento El Niño 2015-2016 es comparable con la de los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98 pero con intensidad más limitada a la región este del Pacífico (Paek *et al*., 2017). Este evento en el Pacífico Central ha sido considerado uno de los eventos El Niño (EN) más intensos de los últimos 50 años, aunque frente al SAP este evento no tuvo los mismos impactos que otros "El Niño" extremos del Pacífico Central con relación a la productividad primaria (Espinoza-Morriberón *et al*., 2017). Además, Stramma *et al.* (2016) sugirieron que los niveles de N: P durante el Niño 2015-2016 fueron incluso mayores que en el año 2012, considerando que las biomasas de diatomeas podrían haber sido incrementadas, es por ello que, con el presente trabajo se da a conocer los resultados de la evaluación de la comunidad fitoplanctónica en el ecosistema marino peruano entre agosto y octubre 2015 con el objetivo de determinar los efectos El Niño 2015-2016 en la comunidad fitoplanctónica a nivel superficial y a 10 m de profundidad, en términos de volúmenes de plancton, composición especiológica, abundancia, diversidad e indicadores biológicos de masas de agua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio estuvo comprendida entre 3° y 18°S, desde Puerto Pizarro (Tumbes) hasta Morro Sama (Tacna). Las muestras de fitoplancton fueron recolectadas durante el Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos a bordo de los Buques de Investigación Científica (BIC) José Olaya Balandra y Luis Flores Portugal, realizado entre el 22 de agosto y 3 de octubre 2015. Se recolectaron 116 muestras de red de fitoplancton (malla de 75 μm y 13 cm de abertura de aro) mediante arrastres horizontales durante 5 minutos y a 3 nudos de velocidad (Fig. 1). A su vez, para el análisis cuantitativo del fitoplancton, se recolectaron 17 muestras de agua a 10 metros de profundidad, en frascos de 80 mL, muestras que provinieron de lances de roseta oceanográfica. La preservación de las muestras se realizó con formalina tamponada según Throndsen (1978).

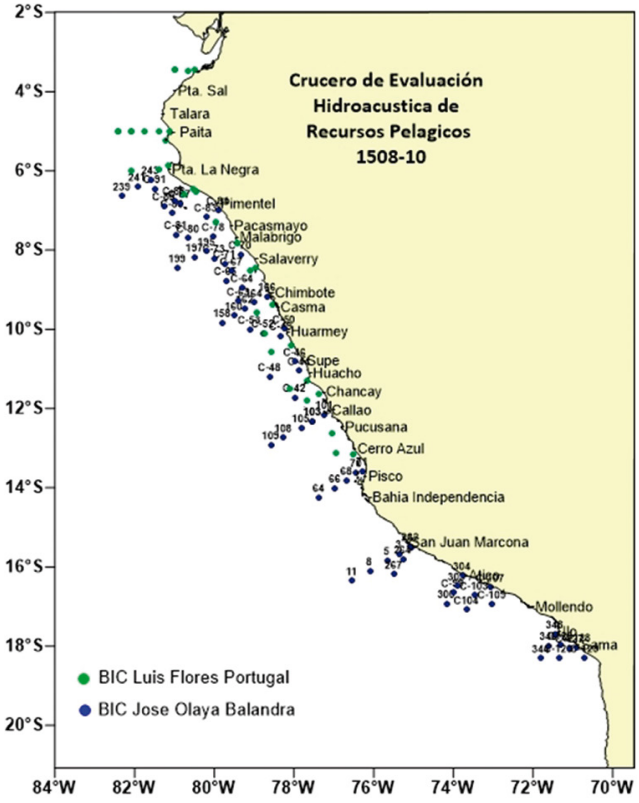

Figura 1.- Carta de posiciones. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y Luis Flores Portugal 1508-09. Figura tomada de Imarpe, 2015

En el Laboratorio de Fitoplancton y Producción Primaria se obtuvieron los volúmenes de plancton mediante el método de centrifugación a 2.400 RPM durante 5 minutos. Para obtener el volumen de plancton se utilizó la siguiente ecuación:

$V = Vc / K$

Donde:

V = Volumen de plancton

Vc = Volumen de plancton centrifugado (mL)

K = 6,627 m^3 (Constante que indica el volumen de agua filtrada por la red)

Los resultados fueron expresados en mililitros de plancton por metro cúbico de agua de mar filtrada ($mL.m^{-3}$). El análisis de muestras de red (semi-cuantitativa) se realizó asignando valores convencionales de acuerdo con su abundancia relativa (Rojas de Mendiola *et al.*, 1985)

Las muestras de agua se analizaron cuantitativamente mediante la metodología Utermöhl (1958) y según IOC UNESCO (Edler & Elbrächter, 2010), expresando los resultados en número de células por litro (cel. L^{-1}). Asimismo, se elaboró una tabla de promedios de abundancias promedio de fitoplancton por perfil oceanográfico de los principales años El Niño, datos del Laboratorio de Fitoplancton y Producción primaria. Las cartas de posiciones, distribución de los volúmenes de plancton y abundancia cuantitativa del fitoplancton total fueron elaboradas utilizando el programa SURFER versión 21. Finalmente, se realizó el análisis de Diversidad (H') de Shannon y Weaver (1949), cuyos resultados son expresados en bits.cel^{-1} en las estaciones de los perfiles Chimbote y Callao, utilizando el programa R (R Core Team, 2014).

Los parámetros oceanográficos como la temperatura del agua fueron medidos con un CTD de la marca Sea Bird a bordo de los BICs y la salinidad se midió con un Portasal Guildline 84A. Para el análisis de nutrientes, se recolectaron muestras de agua de la roseta oceanográfica en botellas de polietileno de 250 mL, las cuales fueron preservadas mediante congelamiento hasta su posterior análisis en el Laboratorio de Hidroquímica de la sede central del Imarpe, usando la técnica espectrofotométrica mediante la metodología descrita por Strickland & Parsons (1972).

3. RESULTADOS

Distribución superficial de temperatura, salinidad, nutrientes e indicadores biológicos de masas de agua

Durante el periodo de estudio predominaron condiciones oceanográficas cálidas, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) osciló entre 16,3 y 25,2 °C, con un valor medio de 19,5 °C, siendo la zona oceánica de Punta Falsa, norte de Punta Sal y de Chimbote a Pisco, en donde las anomalías térmicas registradas fueron mayores a +3 °C (Fig. 2b). En la superficie del mar, las masas de agua predominantes fueron Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) con ingresos hasta las 10 mn de la costa, seguida de Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) y Aguas Tropicales Superficiales (ATS) en menor proporción; asimismo, hubo un repliegue hacia la costa de las aguas costeras frías (acf). Se observaron aguas de mezcla desde la costa hasta las 10 mn, desde San Juan hasta bahía Independencia, desde Cerro Azul hasta Callao y desde Casma hasta Punta La Negra (Fig. 2c) (Imarpe, 2015)

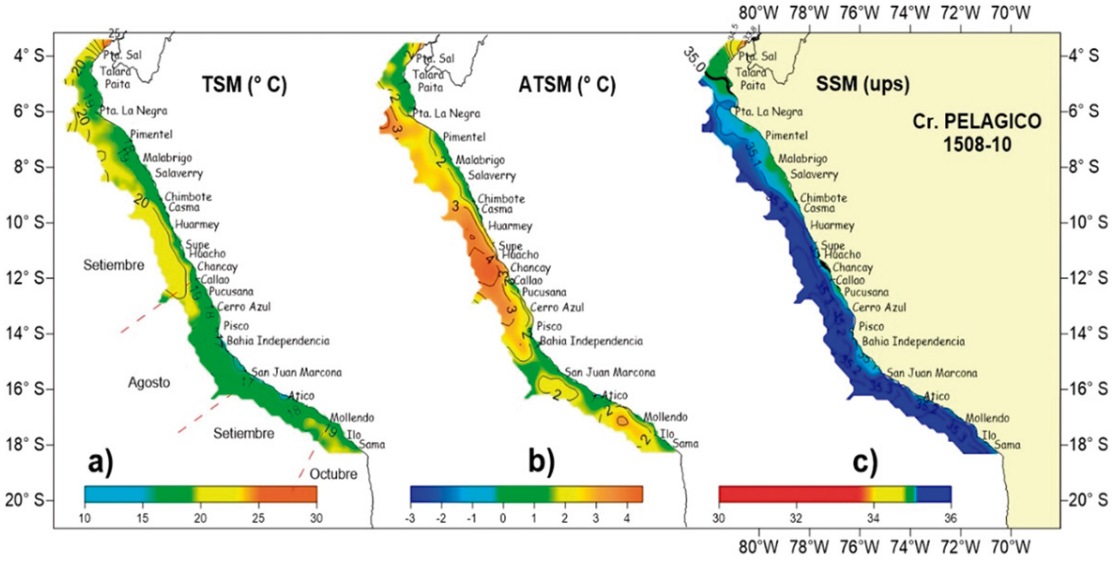

Figura 2.- a) Temperatura Superficial del Mar, b) anomalías de la Temperatura Superficial del Mar y c) Salinidad Superficial del Mar. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y Luis Flores Portugal 1508-09. (Figura tomada de IMARPE, 2015a)

Por otro lado, procesos de afloramiento con temperaturas cercanas a 15 °C se observaron en bahía Independencia, San Juan y principalmente frente a Atico (Imarpe, 2015). En la estación fija Paita de Imarpe, las anomalías de temperatura sub-superficial alcanzaron a +3 °C en los primeros 80 m de profundidad durante la segunda quincena de agosto, periodo en el cual se presentaron anomalías de hasta +6 °C sobre los 40 m. Asimismo, en esta estación se observó presencia de AES por encima de los 60 m de profundidad (ENFEN, 2015a).

La salinidad varió entre 33,336 y 35,491, presentando un promedio de 35,139, registrándose los valores más bajos en las zonas costeras al norte de Punta Sal y desde Salaverry a Pimentel, mientras que los valores más altos se registraron por fuera de las 30 mn entre Cerro Azul hasta Supe.

Con respecto a los nutrientes, se encontraron concentraciones de fosfatos cercanos a 3 µM frente a Chancay y valores cercanos a 2 µM replegados a la costa entre Pisco y San Juan de Marcona, se encontraron también concentraciones de silicatos cercanos a 10 µM en la misma área que los fosfatos, por su parte los nitratos presentaron concentraciones cercanas a 20 µM frente a Paita, Pimentel y entre Callao y San Juan de Marcona y en el resto del área presentaron valores menores a 3 µM (Fig. 3).

Los indicadores de masas de agua del fitoplancton, en relación con las condiciones ambientales, presentaron distribución espacial consistente con el acercamiento de las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) y repliegue de las aguas costeras frías (ACF) a la franja costera (Fig. 4b). El indicador de Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES), *Ceratium breve*, estuvo distribuido hasta 5°S en casi todas las estaciones del perfil Paita y frente a Puerto Pizarro, aunque también fue registrado a 30 mn frente a Huarmey y Callao, lo que es inusual para condiciones normales, esto sugiere desplazamiento de las AES hacia el sur, mientras que, los indicadores de ASS (*Tripos praelongus* y *T. incisus*), fueron determinados en 30 estaciones (25,9% del total estaciones) entre las 30 y 60 mn e inclusive se observó dentro de las 30 mn frente a Supe (C-49) y frente a Atico (E-304). Por su parte, *Protoperidinium obtusum*, indicador de aguas costeras frías (ACF) se encontró replegado a la franja costera (dentro 30 mn) desde Pimentel a Chancay, observándose también frente a San Juan de Marcona (Fig. 4b).

Distribución superficial de los volúmenes de plancton

Los volúmenes de plancton fluctuaron entre 0,05 y 5,31 mL.m^{-3} con valor promedio de 0,79 mL.m^{-3} (Fig. 4a), el valor de volumen de plancton más alto fue registrado frente a Huarmey (Figs. 1, 4a). Se observaron tres focos de abundancia de plancton: el primero ubicado frente a Punta La Negra

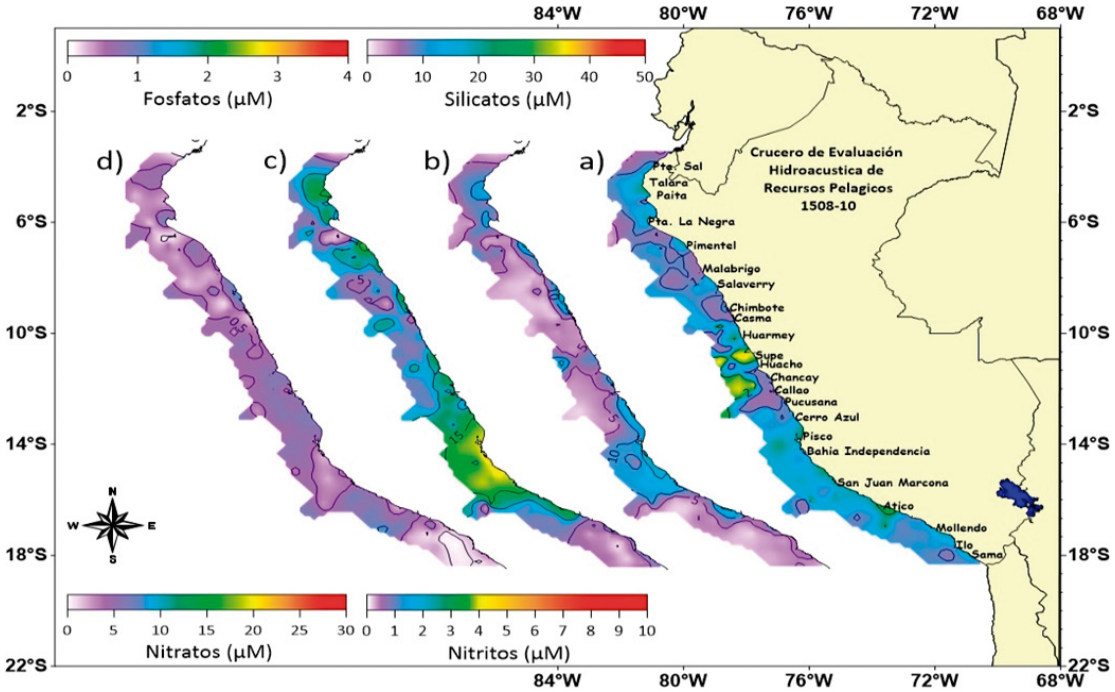

Figura 3.- Distribución superficial de nutrientes a) fosfatos, b) silicatos, c) nitratos, d) nitritos. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y Luis Flores Portugal 1508-09

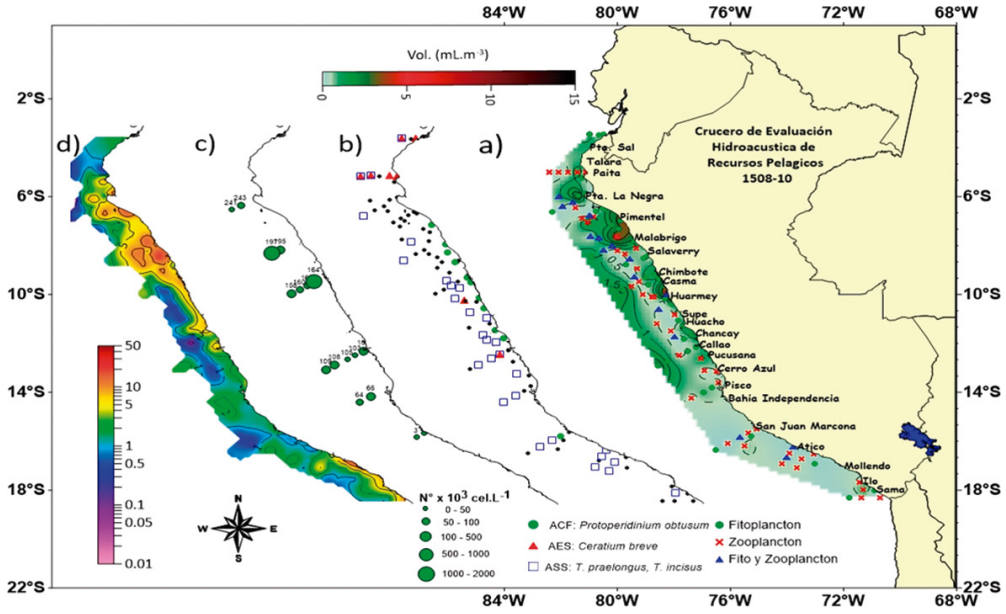

Figura 4.- a) Distribución de volúmenes y predominancia de plancton (mL. m^{-3}), b) Distribución de indicadores biológicos de masas de agua, c) Abundancia del fitoplancton superficial, d) Clorofila-a *in situ*. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y BIC Luis Flores Portugal 1508-10

(6°S), el segundo entre Pimentel y Pacasmayo (7°- 8°S) y el último frente a Huarmey (10°S). Dichos núcleos de abundancia de volúmenes de plancton (~3 $mL.m^{-3}$) estuvieron representados por la codominancia entre el fitoplancton y zooplancton, destacando las diatomeas *Detonula pumila*, *Leptocylindrus danicus* y *Chaetoceros socialis* en los dos primeros núcleos, mientras que en el foco ubicado en Huarmey fue predominante el zooplancton. El predominio del fitoplancton se dio en el 41,2% del total de muestras, mientras que la predominancia del zooplancton y codominancia de ambos grupos fue de 42,1% y 16,7%, respectivamente.

Asimismo, se registraron otros núcleos de abundancia de volúmenes de plancton de regular importancia, superiores a 1 mL.m^{-3}, fuera de las 60 mn entre 8° y 14°S, con predominancia de especies termófilas como *Lioloma delicatulum, Chaetoceros atlanticus, Ch. anastomosans, Ch. concavicornis* y *Rhizosolenia styliformis*, entre otras (Fig. 4b).

Distribución latitudinal de los volúmenes de plancton

Valores promedio del volumen de plancton dentro de las 30 mn no superaron los 2 mL.m^{-3}, los valores máximos fueron de 1,64 y 1,65 mL/m^3 entre 6° y 8°S, frente a Punta La Negra y a Pacasmayo, y entre 9° y 10°S frente a Chimbote con el valor máximo en promedio de 1,83 mL.m^{-3}. Entre 30 y 60 mn, se registraron valores menores a 1,5 mL.m^{-3} y, en las estaciones ubicadas por fuera de las 60 mn, los valores promedio de volúmenes de plancton superaron 2,0 mL.m^{-3}, registrándose valores más altos de 2,11 y 1,98 mL.m^{-3} frente a Chimbote (9°S) y Callao (12°S), respectivamente (Fig. 5).

Distribución, composición y abundancia relativa de la comunidad del fitoplancton

Entre Paita y Pimentel (5°S – 7°S) y dentro de las 30 mn, se detectó predominancia de fases iniciales e intermedias de la sucesión ecológica, presentándose la diatomea central *Detonula pumila* como "MUY ABUNDANTE", acompañada de *Chaetoceros lorenzianus, Ch. affinis, Ch. compressus* y *Thalassiosira subtilis,* entre otras. Entre Pacasmayo y Huarmey (7°S – 10°S), se determinaron fases intermedias de especies como *Coscinodiscus perforatus, Leptocilindrus danicus* y *Lauderia annulata,* con algunos núcleos con abundancia relativa de "ABUNDANTE" de *D. pumila,* mientras que, al sur de Supe, la comunidad fitoplanctónica se caracterizó por la mezcla de especies de aguas cálidas y típicas de afloramiento.

Por fuera de las 30 mn, las diatomeas y dinoflagelados termófilos fueron determinados con una abundancia relativa de PRESENTE, siendo los dinoflagelados el grupo más abundante. Entre las diatomeas destacaron *Planktoniella sol, Chaetoceros atlanticus, Ch. anastomosans, Ch. concavicornis, Proboscia alata* f. *indica*; mientras que, entre los dinoflagelados, lo hicieron *Tripos gibberus, T. incisus, T. pentagonus* y *Protoperidinium oceanicum*.

Abundancia y distribución del fitoplancton a 10 m de profundidad (Cel. x 10^3. L^{-3})

Se determinaron 143 taxa, de las cuales 85 fueron diatomeas (59,4%), 50 fueron dinoflagelados (35,4%), 2 silicoflagelados (1,4%), 3 cocolitofóridos (2,1%) y 3 nanoflagelados (2,1%). La abundancia de fitoplancton total a 10 m fluctuó entre 8 240 y 1 718 520 cel. L^{-1}. Los focos de abundancia estuvieron ubicados en los perfiles de Chimbote y Malabrigo (Fig. 4c). La composición de especies de fitoplancton destacó por presencia y abundancia de *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus danicus, Eucampia zoodiacus,* diatomeas "pennadas" de pequeño tamaño y el incremento en abundancia de algunas especies del género *Protoperidinium* sp.

La mayor abundancia del fitoplancton se observó en el perfil Pacasmayo (Fig. 4c), en la Estación 164 con densidad celular de 1,7 x 10^6 cel.L^{-1} a 70 mn de la costa. La comunidad fitoplanctónica en este perfil estuvo representada por diatomeas como *Detonula pumila* (0,7 x 10^6 cel. L^{-1}), *Chaetoceros socialis* (0,1 x 10^6 cel. L^{-1}), *Leptocylindrus danicus* (0,66 x 10^6 cel. L^{-1}), entre otras diatomeas. También estuvo presente el cocolitofórido *Ophiaster hydroideus* con abundancia de 2 x 10^6 cel. L^{-1}.

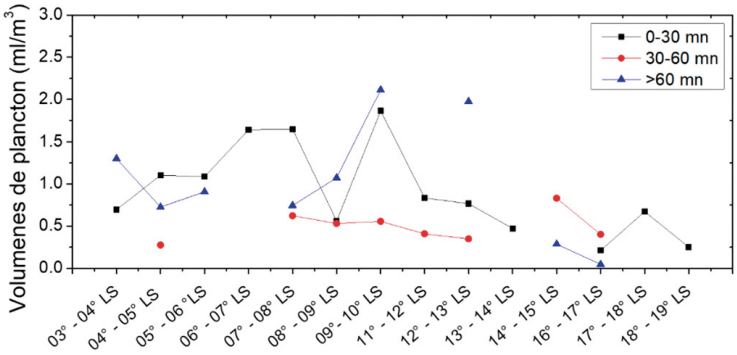

Figura 5.- Distribución latitudinal de volúmenes de plancton (mL/m^3). Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y BIC Luis Flores Portugal 1508-09

En el perfil Chimbote (Figs. 6, 7) se observó abundancia máxima de 1.522.700 cel. L^{-1}, registrado en la Estación 164, a 24 mn de la costa, donde el 97,6% del fitoplancton estuvo conformado por diatomeas de afloramiento como *Leptocylindrus danicus* (0,99 x 10^6 cel. L^{-1}), *Guinardia striata* (0,1 x 10^6 cel. L^{-1}), *Ch. costatus* (0,1 x 10^6 cel. L^{-1}), *Ch. debilis* (0,06 x 10^6 cel. L^{-1}) y la diatomea "pennada" asociada con aguas cálidas del Grupo *Pseudo-nitzschia delicatissima* (0,17 x 10^6 cel. L^{-1}). Los fitoflagelados constituyeron solo el 16% del fitoplancton total. En las estaciones intermedias dominaron los fitoflagelados mientras que, en la más alejada de la costa ubicada a 84 mn, se observó 81,1% de diatomeas, representadas por el Grupo *Pseudo-nitzschia delicatissima* (0,23 x 10^6 cel. L^{-1}), y *Ch. compressus* (9,5 x 10^3 cel. L^{-1}).

En Perfil Callao, se observaron menores densidades celulares totales de fitoplancton que en el perfil Chimbote, con abundancia máxima en la Estación 108 a 78 mn de la costa (486.600 cel. L^{-1}) (Figs. 4c, 6), la comunidad estuvo conformada por diatomeas como *Ch. curvisetus* (328 x 10^3 cel. L^{-1}), *G. striata* (44 x 10^3 cel. L^{-1}), *Chaetoceros anastomosans* (9,4 x 10^3 cel. L^{-1}), *Ch. lorenzianus* (8 x 10^3 cel. L^{-1}), *Ch. decipiens* (5,7 x 10^3 cel. L^{-1}), etc. En las estaciones más costeras (a 8 y 28 mn.) predominaron los nanoflagelados, mientras que en la Estación 105 a 48 mn de la costa se observó predominancia del 62,4% de cocolitofóridos como *Emiliania huxleyi* (12 x 10^3 cel. L^{-1}). A 100 mn de la costa (Est. 109) la comunidad fitoplanctónica estuvo representada también por diatomeas *Ch. anastomosans* (54 x 10^3 cel. L^{-1}), *Cylindrotheca closterium* (21 x 10^3 cel. L^{-1}), *Ch. affinis* (12 x 10^3 cel. L^{-1}), *Thalasiosira subtilis* (3,9 x 10^3 cel. L^{-1}), entre otras, asimismo destacó el cocolitofórido *Emiliania huxleyi* con 7 x 10^3 cel. L^{-1}.

En la Tabla 1, se observan los valores de abundancia de fitoplancton en promedio y por perfiles frente a los principales puertos pesqueros.

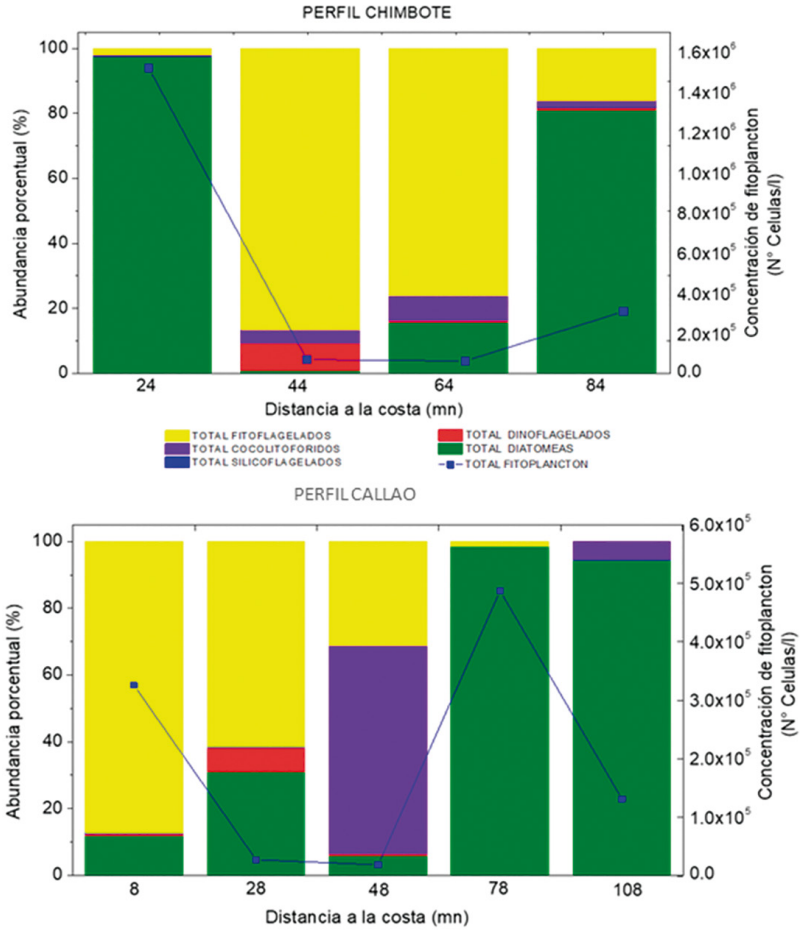

Figura 6.- Abundancia porcentual del fitoplancton por grupos versus Concentración total del fitoplancton (Nº Cel. x L^{-1} x 10^6) por distancias a la costa. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y BIC Luis Flores Portugal 1508-09

Se advierte que dependiendo de la magnitud o tipo de evento El Niño las abundancias son variadas, registrándose valores máximos frente a Paita, Chimbote, Callao y Pisco, coincidiendo con el verano de 1997, primavera del 2011 y verano del 2017 previo al mayor efecto negativo de El Niño Costero que se dio en marzo 2017. Las menores abundancias de fitoplancton frente a Callao se dieron durante el Niño 1986 y frente a Chimbote durante el Niño moderado 2006.

Análisis de diversidad (H')

El índice de diversidad de Shannon (H') fluctuó entre 0,61 y 3,09 bits.ind^{-1} (Fig. 7), los valores más altos se registraron frente a Callao con valores de 2,13 y 3,08 bits.ind^{-1}, cerca de las 30 mn y por fuera de las 100 mn, respectivamente. Adicionalmente, se encontraron valores de 2,28 y 2,19 bits.ind^{-1} frente a Punta Falsa y Marcona, a 50 y 30 mn, respectivamente. En Chimbote, en la franja costera (30 mn) y por fuera de las 60 mn, se registraron valores > 1 bits.ind^{-1}. La mínima diversidad específica (< 1 bits.ind^{-1}) fue observada frente a Pisco hasta por fuera de las 60 mn; frente a Pacasmayo, a 50 mn y frente a Callao a 8 mn, principalmente asociada a altas abundancias celulares de los nanoflagelados y en menor proporción a diatomeas de afloramiento como *Chaetoceros compressus*, *Ch. curvisetus* y *Thalassiosira rotula* (Fig. 7).

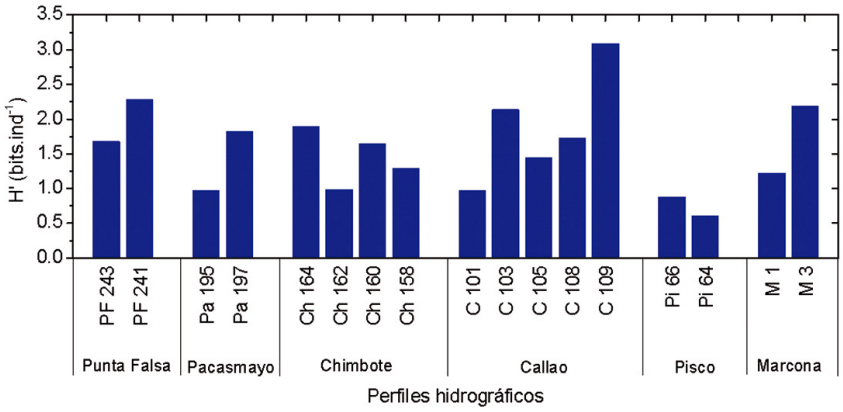

Figura 7.- Distribución del índice de diversidad de Shannon (H') por perfiles hidrográficos. Crucero de Evaluación Hidroacústica de Recursos Pelágicos. BIC José Olaya Balandra y BIC Luis Flores Portugal 1508-09

Tabla 1.- Abundancia de Fitoplancton (Células x L^{-1}) en promedio, por perfil oceanográfico durante eventos cálidos (El Niño), se indica el nombre del crucero del cual fueron tomados los datos. BIOCC = Crucero Bio-oceanográfico, MPH= Crucero de Método de Producción de Huevos o Biomasa Desovante, Pelágicos = Crucero de Evaluación Hidro-acústico de recursos pelágicos

Mes-Año inicial	Mes-Año final	Magnitud	Cruceros	Abundancia Fitoplancton a 10 m (Promedio cel. L^{-1} x 10 ^{6})							
				Paita (5°S)	Punta Falsa (6°S)	Chicama (7°-8°S)	Chimbote (9°-10°S)	Callao (12°-13°S)	Pisco (14°S)	San Juan (15°-16°S)	Ilo (18°S)
Dic-86	Dic-87	Moderado	Mopas Callao 1987_02					0,33			
Dic-86	Dic-87	Moderado	Mopas Callao 1987_08					0,06			
Mar-97	Set-98	Extraordinario	BIOCC 02-04 1997					24,97		0,35	
Ago-06	Feb-07	Moderado	MPH 08-09 2006		5,85		0.37	1,87	3,37	0	
		Moderado	Pelágicos 11-12 2006	11,67	4,56			1,72	3,56		
Ago-08	Oct-08	Débil	MPH 08-09 2008	3,90	6,52	4,79	1,44	1,32	7,44		
Abr-09	Oct-09	Débil	Jurel 12-2009				9,65	3,22	2,27	4,49	
Abr-09	Oct-09	pre-Niño débil	Pelágicos 02-03 2009	5,43	5,66	10,27					3,89
Feb-12	Jun-12	débil a moderado	Pelágicos 02-03-2012	3,84	1,34	6,69	12,46				
Abr-15	Jun-16	Fuerte, PC	Pelágicos 08-09 2015		0,40	11,01	4,93	1,98	1,38	0,23	
Dic-16	May-17	Niño Costero	Pelágicos 02-04 2017	44,10		2,78		10,77	21,73	5,76	4,57

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El evento El Niño 2015–2016 comenzó en otoño de 2015 (ENFEN, 2015b) y fue considerado por el ENFEN como un evento de magnitud fuerte, que alcanzó su máxima intensidad en diciembre 2015 con fuertes anomalías de TSM en la costa del Pacífico (ICEN +2,18 °C en noviembre 2015) (Fig. 8) produciendo migración de anchoveta hacia el sur y hacia la costa frente al ecosistema marino peruano (ENFEN, 2016), estas condiciones oceanográficas, que prevalecieron durante el desarrollo del Crucero 1508-10, mostraron características atípicas para el invierno presentándose más cálido respecto a patrón climatológico (ENFEN, 2015a).

Posterior a este calentamiento la distribución espacial de la anchoveta se normalizó sin afectar sustancialmente la abundancia (Castillo *et al*., 2018). Las anomalías en promedio durante el presente crucero fueron en promedio de +2,41 °C, siendo las zonas más afectadas la zona norte, así como la zona oceánica de Punta Falsa, norte de Punta Sal y de Chimbote a Pisco en donde las anomalías registradas fueron mayores a +3 °C.

Con respecto a los nutrientes en superficie, en las zonas de afloramiento los valores presentaron concentraciones intermedias muy cercanas a la costa en la zona norte, en el resto del área estudiada se encontraron valores bajos que son característicos de eventos El Niño, por efecto de la presencia de ASS y AES. Las concentraciones de nitratos menores a 3 µM y silicatos menores a 5 µM indican el efecto de las masas de aguas cálidas, aunque con menor intensidad comparados con lo observado en el evento el Niño 97-98 (Sánchez *et al*., 2000).

Durante eventos cálidos, el calentamiento del mar tiene efectos negativos en la comunidad del fitoplancton, lo cual se evidencia en la disminución de los volúmenes del plancton, de valores mayores de 3 mL.m^{-3} a menores de 1 mL.m^{-3} (Rojas de Mendiola *et al*., 1985). Según la intensidad del evento cálido, las diatomeas y dinoflagelados propios de aguas cálidas, incursionan hasta muy cerca de la costa, replegando o desapareciendo al fitoplancton de aguas costeras frías (Sánchez Ramírez, 2000). Durante el período de estudio, el volumen del plancton alcanzó un valor promedio de 0,79 mL.m^{-3}, con 81,3% de las muestras con valores menores a 1 mL.m^{-3}, siendo superior a lo observado en el crucero de Evaluación de Recursos Pelágicos del verano 2015 durante el cual se registró un promedio de volúmenes de plancton de solo 0,27 mL.m^{-3} y 97% fueron valores por debajo de 1 mL.m^{-3} (Sánchez *et al*., 2017). Los valores encontrados son consistentes con lo establecido por Rojas de Mendiola *et al.* (1985) para un evento El Niño, sin embargo, se observaron núcleos de abundancia de volúmenes de plancton que alcanzaron los 3 mL.m^{-3}, frente a Punta La Negra, Pimentel y Huarmey, donde predominó el fitoplancton. Dicha situación coincidió con las anomalías positivas de clorofila satelital al norte de los 12°S (~ +1,5 mg.m^{-3}) (Espinoza-Morriberón *et al*., 2017). Lo observado contrasta con el gran impacto que tuvo el Niño 97-98 donde los núcleos de abundancia observados fueron sólo de 1,5 mL.m^{-3} y se ubicaron frente a Chimbote y Callao dentro de las 30 y 60 mn, respectivamente (Delgado *et al*., 2001).

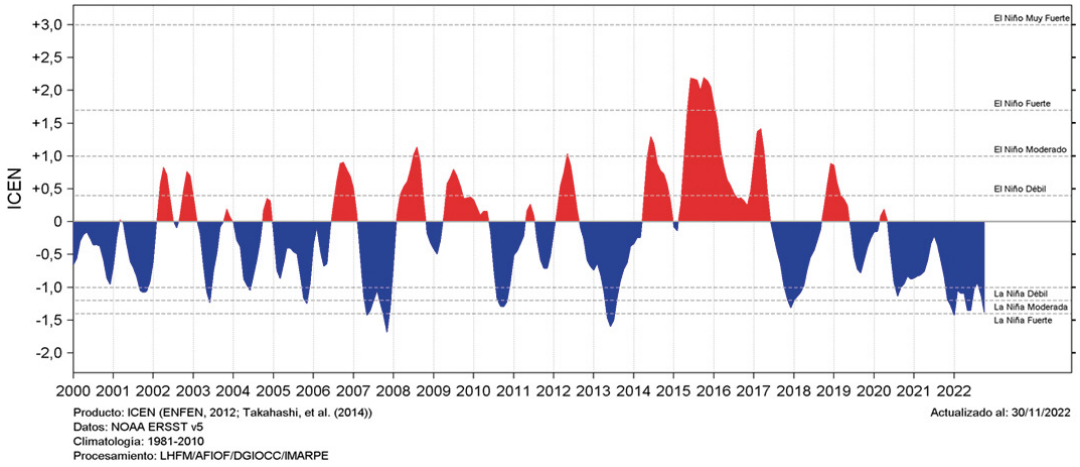

Figura 8.- Índice Costero El Niño (ICEN). El Niño 2015-2026

Los indicadores fitoplanctónicos de masas de agua se utilizan como una herramienta de alerta temprana de eventos anómalos oceanográficos en el mar peruano como el evento El Niño (Ochoa & Gómez, 1997), en el presente trabajo se observó la intrusión de ASS a zonas más costeras lo que se evidenció en la ampliación de la distribución de *Tripos praelongus* y *T. incisus*, incluso dentro de las 30 mn y el desplazamiento hacia el sur de *Ceratium breve* (AES) hasta frente a Callao, esto fue observado también en anteriores eventos como el Niño 1982-1983 (Rojas de Mendiola *et al*., 1985) y durante el Niño 97-98 la distribución de *Protoperidinium obtusum* (acf) estuvo restringido a 20 mn; se registró también el ingreso de ASS con *Tripos praelongus*, como indicador biológico de dicha masa de agua, que permaneció hasta la primavera de 1998 (Delgado *et al*., 2001). En otoño del 2017, se incrementó la temperatura y el volumen de plancton alcanzó 0,62 mL.m^{-3}; *C. breve*, indicador de AES, amplió su distribución a San Juan de Marcona y permaneció hasta el verano 2018.

En el perfil Callao (Fig. 6) a 8 y 48 mn la contribución porcentual de los grupos de fitoplancton fue diferente a la encontrada en los muestreos de la serie de la Línea Callao en agosto del 2015 (Imarpe, 2015), cuando las diatomeas fueron el grupo con mayor contribución en la parte costera (8 mn) y oceánica (48 mn), mientras que en el presente trabajo en la estación a 48 mn los cocolitofóridos predominaron sobre las diatomeas en abundancia porcentual, este grupo es predominante en los frentes y en las áreas oceánicas más cálidas, su incremento está relacionado con el ingreso de Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) a zonas más costeras (Ochoa & Gómez, 1997).

En general, la comunidad fitoplanctónica en eventos cálidos como El Niño, sufre diversas modificaciones dependiendo de su intensidad, entre los factores más indicativos tenemos la drástica disminución de la concentración del fitoplancton y del área de distribución de las diatomeas que se retiran a zonas muy costeras o desaparecen y la amplificación de la distribución de especies termófilas provenientes de las ASS y AES (Sánchez Ramírez, 2000). Asimismo, el mayor ingreso de ASS frente a Callao, habría determinado mayor contribución porcentual de nanoflagelados y cocolitofóridos dentro de las 60 mn, coincidente con lo observado en el monitoreo Línea Callao de Octubre y diciembre 2015 (Imarpe, 2016); mientras que el predominio de acf frente a Chimbote favoreció las altas abundancias celulares y aporte porcentual de las diatomeas en la franja costera frente a Chimbote (Figs. 4c, 6).

Sin embargo, según Stramma *et al.* (2016) se evidenció que durante el Niño 2015-2016 hubo disponibilidad de nutrientes (relación N:P) especialmente en la zona centro y sur del litoral peruano, como parte de este estudio se reportaron concentraciones en un rango de 8 240 y 1 718 520 cel.L^{-1}, abundancias ligeramente inferiores a las registradas en el invierno del 2002, que fue un Niño Pacífico Central moderado similar al presente EN 2015-2016, cuando se registró un rango de 37 a 2 606 000 cel.L^{-1}, siendo la comunidad fitoplanctónica similar, es decir destacaron las diatomeas a 30 mn de la costa. En general, el promedio de la abundancia celular de fitoplancton fue 327 394 cel. L^{-1}, estando en el rango reportado por Rojas de Mendiola *et al*. (1985) que fue de 335 000 cel. L^{-1} en un estudio de 10 años dentro de las 60 millas. Así mismo, se puede demostrar que a través de varios eventos El Niño (Tabla 1), las abundancias en promedio en zonas de afloramiento como Punta Falsa, Chicama, Chimbote y especialmente en Callao, tuvieron picos de abundancia por encima del millón de células siendo evidente que el fitoplancton tiende a aprovechar eficientemente ventanas de condiciones óptimas para su proliferación, llegando incluso a los 24,97 x 106 cel. L^{-1} durante el Niño 1997-1998.

En conclusión, los cambios en la comunidad fitoplanctónica observados durante agosto a octubre del 2015, cuando se presentaba un evento cálido El Niño de tipo Pacífico Central tuvo efecto en la disminución de los volúmenes del plancton (0,79 mL.m^{-3}) en comparación con un año sin El Niño, sin embargo se observaron núcleos de abundancia de fitoplancton (1,7 x 10^{6} cel.L^{-1} frente a Pacasmayo) y principalmente en la zona entre 8 y 12°S, donde la abundancia de diatomeas fue importante y comparable con El Niño Moderado como El Niño 2002.

5. REFERENCIAS

Basu, S. & Mackey, K. R. (2018). Phytoplankton as Key Mediators of the Biological Carbon Pump: Their Responses to a Changing Climate. *Sustainability*, *10*, 869. https://doi.org/10.3390/su10030869

Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J. Y., Braconnot, P., Cole, J., Dewitte, B., Giese, B., Guilyardi, E., Jin, F. F., Karnauskas, K., Kirtman, B., Lee, T., Schneider, N., Xue, Y. & Yeh, S. W. (2015). Understanding ENSO diversity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *96*(6), 921–938. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00117.1

Castillo, R., Dalla Rosa, L., García Diaz, W., Madureira, L., Gutierrez, M., Vásquez, L. & Koppelmann, R. (2018). Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*, 1-13. https://doi.org/10.1111/fog.12419

Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P. & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, *79*(2–4), 95–105. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.012

Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño [Enfen]. (2012). *Definición operacional de los Eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la Costa del Perú*. https://hdl.handle.net/20.500.12542/3229

Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño [Enfen]. (2015a). *Análisis mensual de los impactos de El Niño-Oscilación del Sur en las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas del mes de agosto de 2015 en el Perú y las perspectivas de variabilidad* (Informe Técnico Enfen, Año 1, N° 5, Agosto de 2015). https://www.dhn.mil.pe/Archivos/oceanografia/enfen/informe-tecnico/08-2015.pdf

Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño [Enfen]. (2015b). *Análisis mensual de los impactos de El Niño-Oscilación del Sur en las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas del mes de setiembre de 2015 en el Perú y las perspectivas de variabilidad* (Informe Técnico Enfen, Año 1, N° 6, Setiembre de 2015).

Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño [Enfen]. (2016). *Análisis mensual de los impactos de El Niño-Oscilación del Sur en las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas del mes de enero de 2016 en el Perú y las perspectivas de variabilidad*. (Informe Técnico Enfen, Año 2, N° 1, Enero de 2016).

Delgado, E., Sánchez, S., Chang, F., Villanueva, P. & Fernandez, C. (2001). El Fitoplancton frente a la costa peruana durante El Niño 1997-98. En J. Tarazona, A. Wolf & E. Castillo de Maruenda (Eds.), *El Niño en América Latina: Impactos biológicos y sociales* (pp. 29–38). Omega S.A.

Edler, L. & Elbrächter, M. (2010). The Utermöhl Method for Quantitative Phytoplankton Analysis. In B. Karlson, C. Cusack & E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis* (pp. 13–20). Intergovernmental Oceanographic Commission, Unesco. http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1371

Espinoza-Morriberón, D., Ledesma Rivera, J., Colas, F., Echevin, Vincent, Anculle, T. & Tam Málaga, J. (2017). Productividad en el sistema de afloramiento peruano durante El Niño 2015-2016. *Inf Inst Mar Perú*, *44*(4), 460-466. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3227

Gutierrez, M., Herrera, N. & Marín, D. (1999). Distribución y abundancia de anchoveta y otras especies pelágicas entre los eventos El Niño 1982-83 y 1997-98. *Bol Inst Mar Perú*, *18*(1–2), 77–88. https://hdl.handle.net/20.500.12958/985

Instituto del Mar del Perú [Imarpe]. (2015). *Informe Ejecutivo del Crucero de Evaluación Hidroacústica de los Recursos Pelágicos 1508-10*.

Instituto del Mar del Perú [Imarpe]. (2016). Anuario Científico Tecnológico Imarpe Enero-Diciembre 2015. *Anu cient tecnol Imarpe*, *15*, 5–255. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3062

Morón, O. & Marquina, R. (1997). Aspectos Oceanográficos del mar peruano desde Callao a Paita. Crucero BIC Humboldt 9704. *Inf Inst Mar Perú*, (127), 31–39. https://hdl.handle.net/20.500.12958/727

Ochoa, N. & Gómez, O. (1997). Dinoflagelados del mar peruano como indicadores de masas de agua durante los años 1982-1985. *Bol Inst Mar Perú*, *16*(2), 1–60. https://hdl.handle.net/20.500.12958/956

Paek, H., Yu, J. Y. & Qian, C. (2017). Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Niños different?. *Geophysical Research Letters*, *44*(4), 1848–1856. https://doi.org/10.1002/2016GL071515

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R foundation for statistical computing.

Racault, M. F., Le Quéré, C., Buitenhuis, E., Sathyendranath, S. & Platt, T. (2012). Phytoplankton phenology in the global ocean. *Ecological Indicators*, *14*, 152–163. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.010

Rojas de Mendiola, B., Gomez, O. & Ochoa, N. (1985). Efectos de Niño sobre el fitoplancton. In W. Arntz, A. Landa, & J. Tarazona (Eds.), *"El Niño" Su impacto en la fauna Marina* (Boletín volumen extraordinario, pp. 33–40). Instituto del Mar del Perú, Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit GmbH. https://hdl.handle.net/20.500.12958/1212

Rossi, S., Youngbluth, M. J., Jacoby, C. A., Pagès, F. & Garrofé, X. (2008). Fatty acid trophic markers and trophic links among seston, crustacean zooplankton and the siphonophore *Nanomia cara* in Georges Basin and Oceanographer Canyon (NW Atlantic). *Scientia Marina*, *72*(2), 403–416. https://doi.org/10.3989/scimar.2008.72n2403

Sánchez Ramírez, S. (2000). Variación estacional e interanual de la biomasa fitoplanctónica y concentración de clorofila A frente a la costa peruana durante 1976-2000. *Bol Inst Mar Perú*, *19*(1-2), 29–43. https://hdl.handle.net/20.500.12958/995

Sánchez, G., Calienes, R. & Zuta, R. (2000). The 1997-98 El Niño and its effects on the Coastal Marine Ecosystem off Peru. *CalCOFI Rep*, *41*, 62–86.

Sánchez, S., Quispe, J. & Mendoza, J. (2017). Variabilidad del plancton y efectos de El Niño y la Niña sobre el

Fitoplancton: 2013-2016. *Inf Inst Mar Perú*, *44*(1), 14-19. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3147

Shannon, C. E. & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.

Stramma, L., Fischer, T., Grundle, D. S., Krahmann, G., Bange, H. W. & Marandino, C. A. (2016). Observed El Niño conditions in the eastern tropical Pacific in October 2015. *Ocean Science*, *12*(4), 861–873. https://doi.org/10.5194/os-12-861-2016

Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. (1972). A Practical Handbook of Sea Water Analysis. *Bull Fish. Res. Bd. Canada,* (167), 1-311. https://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791

Thröndsen, J. (1978). Preservation and storage. In A. Sournia (Ed.), *Phytoplankton manual* (pp. 69-74). Unesco. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000030788

Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton- Methodik. *Mitt. d. Intemat. Vereinig. f. Limnologie*, (9), 1–38. https://doi.org/10.1080/05384680.1958.11904091