

FLORACIONES ALGALES NOCIVAS EN LA COSTA PERUANA DURANTE EL NIÑO COSTERO 2017 Y SU RELACION CON LAS CONDICIONES AMBIENTALES

HARMFUL ALGAL BLOOMS (HABs) ON THE PERUVIAN COAST DURING THE 2017 COASTAL EL NIÑO AND THEIR RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Sonia Sánchez¹
Nelly Jacobo

Elcira Delgado
Augusto Franco

Avy Bernales
David Correa²

<https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.347>

RESUMEN

SÁNCHEZ S, DELGADO E, BERNALES A, JACOBO N, FRANCO A, CORREA D. 2021. Floraciones algales nocivas en la costa peruana durante El Niño Costero 2017 y su relación con las condiciones ambientales. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 452-462.- Entre diciembre 2016 y mayo 2017 se registró 40 floraciones algales nocivas (FAN), asociadas al incremento anómalo de la temperatura superficial del mar durante El Niño Costero 2017. Las especies formadoras de FAN fueron dinoflagelados, con 14 especies, seguidos de flagelados y ciliados, con 1 especie cada una. En Paita y Chimbote se observaron floraciones frecuentes de *Noctiluca scintillans*, *Dinophysis acuminata* y *Prorocentrum cordatum*, entre otras, asociadas a valores máximos de TSM de 27,5, 26,0 y 29,0 °C, respectivamente. En Callao y Pisco se registró a *Heterosigma akashiwo*, *Akashiwo sanguinea* y *Heterocapsa* sp., con valores máximos de TSM de 25,9, 25,0 y 26,6 °C, respectivamente. En el caso de *H. akashiwo* y *Dinophysis* sp., sus abundancias se correlacionaron significativamente con la TSM.

PALABRAS CLAVE: fitoplancton, floraciones algales nocivas, El Niño Costero 2017

ABSTRACT

SÁNCHEZ S, DELGADO E, BERNALES A, JACOBO N, FRANCO A, CORREA D. 2021. Harmful algal blooms (HABs) on the Peruvian coast during the 2017 coastal El Niño and their relationship with environmental conditions. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 452-462.- A total of 40 harmful algal blooms (HABs) were recorded between December 2016 and May 2017. These were associated with the anomalous increase in sea surface temperature during the 2017 coastal El Niño (2017 CEN). Dinoflagellates predominated with 14 species, followed by flagellates and ciliates (1 species each). Frequent blooms of *Noctiluca scintillans*, *Dinophysis acuminata*, and *Prorocentrum cordatum*, among others, were observed in Paita and Chimbote, associated with SST peaks of 27.5, 26.0, and 29.0 °C, respectively. *Heterosigma akashiwo*, *Akashiwo sanguinea*, and *Heterocapsa* sp. were recorded in Callao and Pisco, with SST peaks of 25.9, 25.0, and 26.6 °C, respectively. For *H. akashiwo* and *Dinophysis* sp., their abundances were significantly correlated with SST.

KEYWORDS: phytoplankton, harmful algal blooms, the 2017 coastal El Niño

1. INTRODUCCIÓN

Las Floraciones Algas Nocivas (FAN) son proliferaciones excesivas de microalgas que alteran el ecosistema de forma negativa para el hombre, ocasionando eventualmente anoxias, así como mortandades de peces, moluscos bivalvos u otros organismos (GEOHAB, 2001). En las últimas décadas a nivel mundial, se observa un aparente incremento en la intensidad, duración y distribución geográfica de las FAN relacionados con mayor carga de nutrientes, así como a intensificación de monitoreos y el impacto de floraciones emergentes (HEISLER *et al.*, 2008; HALLEGRAFF *et al.*, 2021)

En el litoral, estos eventos se presentan con regular frecuencia en verano, primavera y otoño,

1. INTRODUCTION

The excessive proliferation of microalgae that alters the ecosystem in a negative way for humans, eventually causing anoxia, as well as mortality of fish, bivalve mollusks, or other organisms, is known as Harmful Algal Blooms (HABs) (GEOHAB, 2001).

There has been an apparent increase in the intensity, duration, and geographic distribution of HABs related to increased nutrient loading in recent decades worldwide (HEISLER *et al.*, 2008; HALLEGRAFF *et al.*, 2021). These events occur regularly on the coast in summer, spring, and autumn. Phytoplankton organisms such as dinoflagellates, silicoflagellates,

1 IMARPE, DGIOCC, Laboratorio de Fitoplancton y Producción Primaria. soniasan@imarpe.gob.pe

2 IMARPE, DGIOCC, Laboratorio Costero de Santa Rosa – Imarpe

ocasionados por organismos del fitoplancton como los dinoflagelados, silicoflagelados, flagelados y eventualmente por ciliados (ROJAS DE MENDIOLA, 1979). Cuando su concentración es muy alta ($> 10^5$ cel.L⁻¹), pueden causar decoloraciones en el agua de mar, con tonalidades marrón oscuro, rojo vino, naranja, inclusive verde claro u oscuro. Están asociadas a condiciones ambientales como: i) baja turbulencia, estabilidad en la columna de agua, ii) fuerte radiación solar y iii) alta concentración de nutrientes (ROJAS DE MENDIOLA, 1979; SÁNCHEZ y DELGADO, 1996; SAR *et al.*, 2002).

Algunos investigadores como OCHOA y GÓMEZ (1981, 1988), SÁNCHEZ y DELGADO (1996), SÁNCHEZ *et al.* (1997), DELGADO (2018) registraron eventos FAN previos a eventos cálidos como El Niño (EN), en algunos casos de gran extensión geográfica y permanencia en el litoral. Se han registrado eventos con duración de más de tres meses (mayo-agosto) teniendo a *Akashiwo sanguinea* como especie responsable en el verano de 1986. Otros eventos prolongados fueron detectados, como los ocasionados por *Noctiluca scintillans* en verano 1997 desde Huacho a Chimbote y por *Mesodinium rubrum* en el verano 2014 desde Huacho a Huarney.

El Niño Costero 2017 (ENC 2017) se caracterizó por ser un evento de rápido desarrollo, asociado al debilitamiento de los vientos costeros del sudeste y el colapso del afloramiento costero. El calentamiento se concentró en las capas superficiales (30 m), alcanzando anomalías de 8 °C en la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa centro-norte del Perú (ENFEN, 2017; TAKAHASHI *et al.*, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018). El impacto en la biomasa fitoplanctónica se reflejó en concentraciones bajas de células menores a 1 mL.m⁻³ entre los 04° y 15°S, con una concentración promedio de 0,35 mL.m⁻³ (DELGADO *et al.*, 2019). No obstante, no se ha realizado un balance del impacto de ENC 2017 sobre FAN. Por ello, el objetivo del estudio es evaluar la variabilidad, frecuencia, duración y cobertura de estas durante este evento, así como su relación con las características abióticas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se recolectaron 40 muestras de agua a nivel de superficie con un balde, obteniéndose submuestras de 250 mL, para determinar y cuantificar las densidades celulares de las especies responsables de las FAN, en Paita, Chimbote, Callao y Pisco. Se registró fecha del evento, nombre de la especie, TSM (°C) área geográfica, coordenadas y concentración celular (Tabla 1 en Anexo).

flagellates, and eventually ciliates cause them (ROJAS DE MENDIOLA, 1979). When their concentration is very high ($> 10^5$ cel.L⁻¹), they can cause discolorations in seawater, with dark brown, wine red, orange, and even light or dark green tones. They are associated with environmental conditions such as i) low turbulence, stability in the water column, ii) strong solar radiation, and iii) high concentration of nutrients (ROJAS DE MENDIOLA, 1979; SÁNCHEZ & DELGADO, 1996; SAR *et al.*, 2002).

Some researchers such as OCHOA & GÓMEZ (1981, 1988), SÁNCHEZ & DELGADO (1996), SÁNCHEZ *et al.* (1997), DELGADO (2018) recorded HABs prior to warm events such as El Niño (EN). Some of these events were of great geographic extension and permanence along the coast. Events lasting more than three months (May-August) have been recorded with *Akashiwo sanguinea* as the responsible species, like in summer 1986. Other long-lasting events were detected, such as those caused by *Noctiluca scintillans* in summer 1997 from Huacho to Chimbote and by *Mesodinium rubrum* in summer 2014 from Huacho to Huarney.

The 2017 coastal El Niño (2017 CEN) was a fast-developing event, associated with the weakening of southeasterly coastal winds and the collapse of coastal upwelling. Warming was concentrated in the surface layers (30 m), reaching anomalies of 8 °C in sea surface temperature (SST) off the north-central Peruvian coast (ENFEN, 2017; TAKAHASHI *et al.*, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018). Between 04° and 15°S, its impact on phytoplankton biomass was reflected in low cell concentrations of less than 1 mL.m⁻³, with a mean concentration of 0.35 mL.m⁻³ (DELGADO *et al.*, 2019). Nevertheless, there has been no assessment of 2017 CEN impact on harmful algal blooms. Therefore, this study aims to evaluate the variability, frequency, duration, and range of HABs during this event, as well as their association with abiotic characteristics.

2. MATERIAL AND METHODS

We collected 40 surface water samples to determine and quantify the cell densities of the species responsible for HABs in Paita, Chimbote, Callao, and Pisco. The date of the event, species name, SST (°C), geographic area, coordinates, and cell concentration were recorded (Table 1 in Annex).

Las muestras fueron preservadas con formalina neutralizada al 20%, rotuladas y etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio. Para la determinación taxonómica se consultaron los trabajos de SAR *et al.* (2002), TOMAS (1993), ESQUEDA y HERNÁNDEZ (2010). Los conteos se realizaron en cámaras Sedgwick-Rafter (1 mL). Los resultados se presentan en cel.L⁻¹ y se llevaron a cabo análisis de correlación de Pearson ($p < 0,05$) para determinar la relación entre las especies que producen las FAN con TSM.

Las anomalías de TSM fueron estimadas por el Laboratorio de Hidrofísica Marina (LHFM) de la Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático (DGIOCC). Tomando como referencia la climatología base de TSM de laboratorios costeros del IMARPE (<http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/servicios/series-tiempo>).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONDICIONES AMBIENTALES

El Niño Costero 2017 es considerado como uno de los eventos climáticos más extremos del último siglo en la costa peruana (ENFEN, 2017; TAKAHASHI *et al.*, 2018). Se manifestó en su máxima intensidad en el verano del mismo año, aunque su desarrollo abarcó desde diciembre 2016 hasta mayo 2017, según el ENFEN (2017). La acumulación de aguas anormalmente cálidas a lo largo de la costa favoreció la lluvia intensa en el litoral norte, que activó las quebradas secas. La mayoría de ríos de la costa norte y central superaron los niveles de emergencia, presentando caudales históricos en la mayoría de casos.

Frente a la costa norte y central (Paita, Chicama, Callao y Pisco), se registró debilitamiento significativo del viento a lo largo de la franja costera peruana, dentro de sus 100 km, ello redujo el afloramiento costero entre enero y marzo del 2017. Entre octubre y diciembre 2016 (fase previa a ENC 2017), se produjeron consecutivos eventos de debilitamiento de vientos, entre Chicama y Paita (CORREA *et al.*, 2020a).

Entre enero y los primeros días de febrero 2017, continuaron los eventos de debilitamiento anómalo de vientos, alcanzando velocidades menores a 1,0 m/s, principalmente al norte de Chicama. Luego de ello, hasta marzo, se registraron eventos de intensificación anómala alternados con eventos de debilitamiento. Desde fines de marzo hasta la primera quincena de septiembre, se observó otro evento de intensificación anómala, con velocidades de viento mayores a 6,8 m/s, sobre todo en Chicama. Finalmente, a partir de la segunda quincena de abril hasta mayo, predominaron vientos moderados, junto a eventos de intensificación de vientos desde Paita hasta Pisco (CORREA *et al.*, 2020) (Fig. 1).

The samples were preserved with 20% neutralized formalin, tagged, and labeled for further analysis in the laboratory. The works of SAR *et al.* (2002), TOMAS (1993), ESQUEDA & HERNÁNDEZ (2010) were used for taxonomic determination. Counts were performed in Sedgwick-Rafter chambers (1 mL). The results are presented in cel.L⁻¹ and statistical analyses were carried out (Pearson's correlation: $p < 0.05$) to determine the relationship between the HAB-forming species with SST.

SSTAs were estimated by the Marine Hydrophysics Laboratory of the Directorate-General for Oceanographic Research and Climate Change. The SST base climatology of IMARPE's coastal laboratories was used as a reference (<http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/servicios/series-tiempo>).

3. RESULTS AND DISCUSSION

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

2017 CEN is one of the most extreme climatic events of the last 100 years on the Peruvian coast (ENFEN, 2017; TAKAHASHI *et al.*, 2018). According to ENFEN (2017), its peak occurred in summer 2017, although its development spanned from December 2016 to May 2017. The accumulation of abnormally warm waters along the coast favored intense rainfall on the northern coast, which activated dry creeks. Thus, most rivers along the north and central coast exceeded emergency levels, presenting historic flows in most cases.

Between January and March 2017, there was significant wind weakening along the northern and central coast (Paita, Chicama, Callao, and Pisco), within 100 km offshore, which reduced coastal upwelling. Consecutive wind weakening episodes, between Chicama and Paita, took place before the occurrence of the main event (October-December 2016) (CORREA *et al.*, 2020a).

Anomalous weakening wind events continued between January and early February 2017, reaching speeds below 1.0 m/s, mainly north of Chicama. After that, until March, anomalous intensification events alternating with weakening events were recorded. From late March until the first fortnight of September, another anomalous intensification event was observed, with wind speeds higher than 6.8 m/s, mainly in Chicama. From mid-April to the second fortnight of May, moderate winds predominated, along with wind intensification events from Paita to Pisco (CORREA *et al.*, 2020) (Fig. 1).

Además, se detectaron episodios de intensificación de vientos de Panamá frente a Ecuador y norte del Perú. Estos habrían impulsado el desplazamiento de las Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) al sur, registrando altas temperaturas y bajas salinidades hasta Chicama aproximadamente. Frente a la costa central, las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) se acercaron al litoral, asociadas al debilitamiento del afloramiento costero (ENFEN, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018).

Composición y distribución de las floraciones algales nocivas

Durante el desarrollo de ENC 2017 (diciembre 2016 – mayo 2017) se registraron 40 eventos FAN, siendo responsables los dinoflagelados de 35 (87%), los flagelados de 3 (8%) y los ciliados de 2 (5%) (Fig. 2). El número de eventos superó en 50% al mismo período del año anterior (Fig. 3). Estacionalmente, el mayor número de eventos FAN (23) se registró en verano, a diferencia del otoño, cuando la cantidad de eventos disminuyó al igual que las especies responsables (Tabla 1- Anexo, Fig. 4).

There were episodes of intensified winds from Panama off Ecuador and northern Peru. These would have driven the southward shift of the Equatorial Surface Waters (ESW), resulting in high temperatures and low salinities up to approximately Chicama. Off the central coast, the Subtropical Surface Waters (SSW) moved nearshore, associated with the coastal upwelling weakening (ENFEN, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018).

Composition and distribution of HABs

During 2017 CEN (December 2016 - May 2017), there were 40 HABs events recorded, with dinoflagellates causing 35 (87%), flagellates 3 (8%), and ciliates 2 (5%). There was a growth of 50% compared with the same period of the previous year (Figs. 2, 3). Seasonally, the highest number of HABs was recorded in summer, with a high richness of responsible species, in contrast to autumn, where the number of events decreased as well as the responsible species (Table 1 - Anex, Fig. 4).

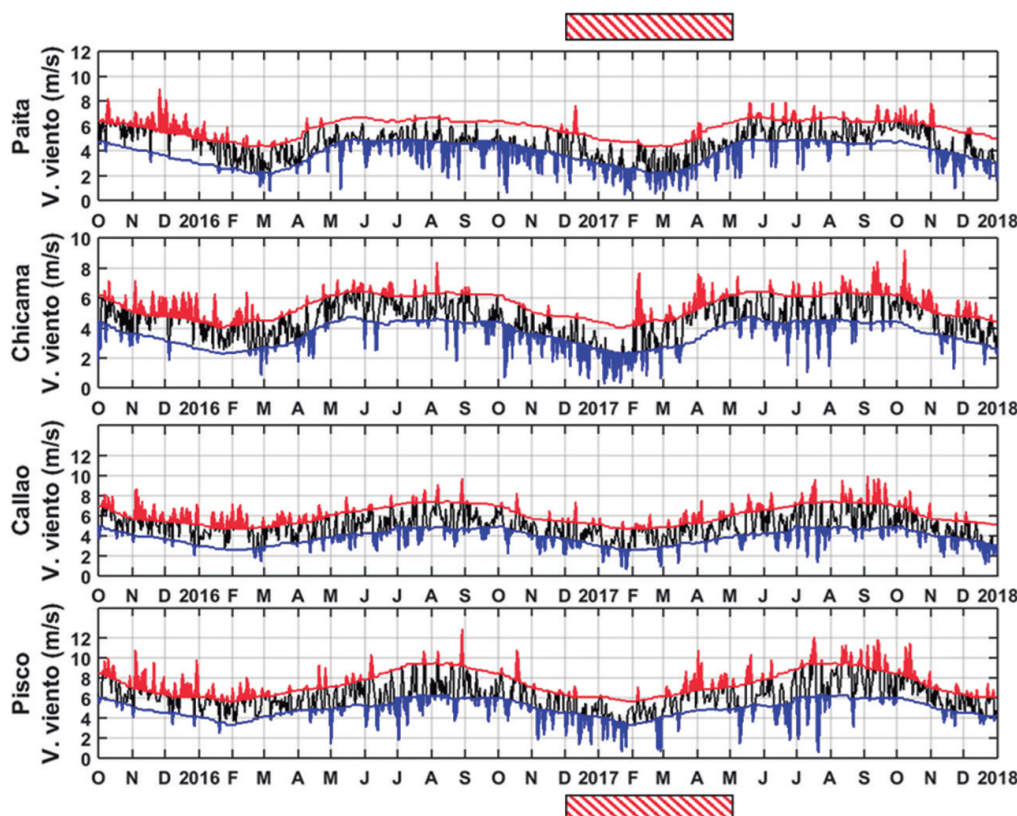


Figura 1.- Eventos de debilitamiento (azul) e intensificación (rojo) de viento registrados antes, durante y después de El Niño Costero 2017 (identificado con barras longitudinales rojas), frente a la costa peruana (Paita, Chicama, Callao y Pisco) desde octubre del 2015 a diciembre del 2017 (CORREA *et al.*, 2020)

Figure 1. Wind weakening (blue) and intensification (red) events recorded before, during, and after 2017 CEN (identified with red longitudinal bars), off the Peruvian coast (Paita, Chicama, Callao, and Pisco). October 2015 - December 2017 (CORREA *et al.*, 2020)

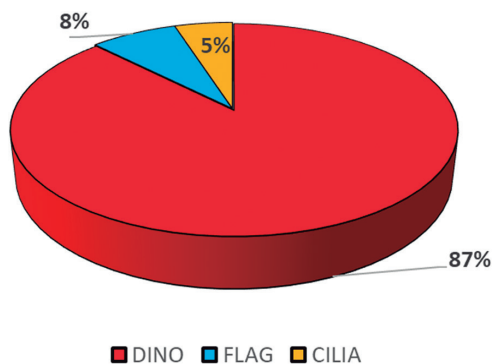


Figura 2.- Distribución porcentual de la formación de FAN desde diciembre 2016 hasta mayo 2017 por grandes grupos taxonómicos

Figure 2. Percentage distribution of HAB-forming species from December 2016 to May 2017 by major taxonomic groups

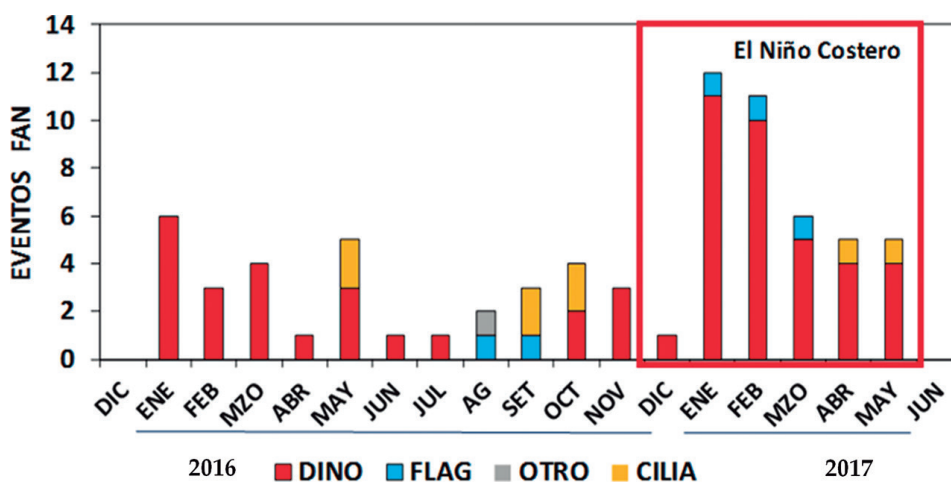


Figura 3.- Distribución mensual de los eventos FAN del 2015 (Dic), 2016 y 2017 en el litoral

Figure 3. Monthly distribution of 2015 (Dec), 2016, and 2017 HAB events along the coast

Se registró el mayor número de eventos FAN, siendo 12 en enero y 11 en febrero, asociados a TSM diarias desde 19 °C y hasta 27 °C. En esos meses destacaron *Noctiluca scintillans*, *Heterosigma akashiwo*, *Dinophysis acuminata*, *Prorocentrum cordatum*, *Tripos fusus*, *Prorocentrum depressum* y *Heterocapsa* sp. Esta frecuencia superó a la registrada en 2016, siendo 6 eventos FAN en enero y 3 en febrero (Tabla 1 Anexo, Fig. 3).

En marzo, se registraron seis eventos asociados a TSM diarias, con promedio de 24 °C hasta 29 °C. Se observó a *P. cordatum* en bahía de Ferrol, *Heterocapsa* sp. en Callao y *Akashiwo sanguinea* en Pisco.

Desde abril hasta mayo, solo se detectaron cinco eventos, asociados a la disminución de las TSM diarias; 22 °C en promedio y hasta 24 °C. Se reportó al ciliado *Mesodinium rubrum*, frente a Huacho con TSM de 18 °C y Paita con 21 °C. Así como un

The highest number of HAB events was recorded, 12 in January and 11 in February, associated with daily SSTs ranging from 19 °C to 27 °C. During that period, the following species predominated: *Noctiluca scintillans*, *Heterosigma akashiwo*, *Dinophysis acuminata*, *Prorocentrum cordatum*, *Tripos fusus*, *Prorocentrum depressum*, and *Heterocapsa* sp. This frequency exceeded that recorded in 2016, with 6 HAB events in January and 3 in February (Table 1 Annex, Fig. 3).

In March, six events associated with daily SSTs were recorded, with an average ranging from 24 °C to 29 °C. The following species were observed: *P. cordatum* in Ferrol Bay, *Heterocapsa* sp. in Callao, and *Akashiwo sanguinea* in Pisco.

Only five events were detected from April to May. They were associated with a decrease in daily SSTs (22 °C on average and up to 24 °C). The ciliate

evento de regular extensión, ocasionado por el dinoflagelado atecado *A. sanguinea*, con duración de dos meses, desde Pisco hasta Huacho. Este último estuvo asociado a TSM promedio diaria de 18 °C en Huacho y 22 °C en la bahía de Pisco. Cabe indicar que en junio no se detectaron nuevos eventos FAN.

Durante el verano 2017 se registró el mayor número de FAN con alta riqueza de especies responsables tales como los dinoflagelados y flagelados, distribuyéndose a lo largo de Paita y bahía Independencia. En otoño, la cantidad de eventos disminuyó al igual que las especies responsables, concentrándose la distribución entre Supe y bahía Independencia (Fig. 4).

A pesar de desconocer procesos determinantes del florecimiento de estos grupos, se propuso: las condiciones ambientales en verano, con mayor estratificación en la columna de agua, entre otros factores, favorecen el aumento de células vegetativas, así como la germinación de quistes de resistencia, que pasan al estadio planctónico, para crecer y dividirse (ORELLANA *et al.*, 1993; GREGORIO & PIEPER, 2000).

De las especies FAN registradas, muchas de ellas producen quistes de resistencia (*A. sanguinea*, *H. akashiwo*, *A. ostensfeldii*, *P. micans*, *Dinophysis* sp. y *Gymnodinium* sp., entre otras), sin tener registro de *N. scintillans*, *M. rubrum* y *E. gymnastica*, de esta cualidad.

Mesodinium rubrum was reported off Huacho with SSTs of 18 °C and Paita with 21 °C. There was also a two-month event of a regular extension, caused by the athecate dinoflagellate *A. sanguinea*, from Pisco to Huacho. The latter was associated with a daily average SST of 18 °C in Huacho and 22 °C in Pisco Bay. No new HAB events were detected in June.

In summer 2017, we recorded the highest number of HABs events, mostly caused by dinoflagellates and flagellates, distributed along Paita and Independencia Bay. In autumn, the number of events decreased as well as the species responsible, concentrating the distribution between Supe and Independencia Bay (Fig. 4).

Even though we do not know the determinant processes of the blooming of these groups, the following is suggested: environmental conditions in summer, with greater stratification in the water column, among other factors, favor the increase of vegetative cells, as well as the germination of resistance cysts, which pass to the planktonic stage, to grow and divide (ORELLANA *et al.*, 1993; GREGORIO & PIEPER, 2000).

Many of the registered HAB species produce resistance cysts (*A. sanguinea*, *H. akashiwo*, *A. ostensfeldii*, *P. micans*, *Dinophysis* sp. and *Gymnodinium* sp., among others) quality that has not been recorded in *N. scintillans*, *M. rubrum* and *E. gymnastica*.

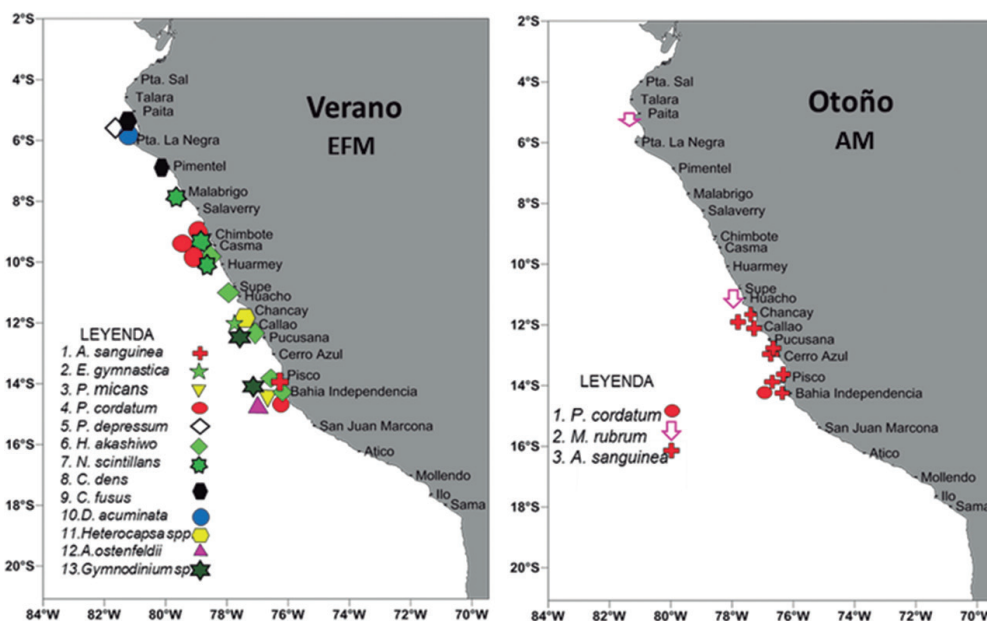


Figura 4.- Distribución geográfica de las FAN en el litoral peruano en los dos primeros trimestres de 2017

Figure 4. Geographic distribution of HABs on the Peruvian coast in the first two quarters of 2017

ANDERSON (1998) asoció a algunos dinoflagelados una “ventana térmica” favorable para desencapsular estructuras de resistencia de las especies responsables de FAN. Se ha demostrado que el enquistamiento está determinado principalmente por la disminución de temperatura, estratificación en columna de agua y por la duración de las horas día-luz (SGROSSO *et al.*, 2001), como habría ocurrido en otoño. Por otro lado, PEÑA-MANJARREZ *et al.* (2001) en base a estudios realizados en bahía de Todos los Santos en Baja California, definió a la franja costera con profundidades menores de 25 m, como “semilleros discretos” con altas concentraciones de quistes de resistencia, asociadas a la fracción de sedimentos finos. Parece ser el caso de las bahías de Paita, Sechura, Ferrol, Miraflores, Paracas e Independencia, entre otras, por las características geográficas y morfológicas de cada una (SÁNCHEZ *et al.*, 2017). En estas localidades se registraron el mayor número de FAN, aunque el principal esfuerzo de observación puede haber también contribuido a mayor capacidad de detección de los eventos.

Tomando en cuenta lo anterior y considerando que todas las especies reportadas en esta investigación, formadoras de FAN masivos, son productoras de quistes temporales, se podría explicar su incidencia en formar extensas discoloraciones, esto podría ser el motivo de que estas poblaciones de dinoflagelados se hayan podido mantener en tan elevadas concentraciones y distribuirse en gran parte de la costa peruana, siendo este un aspecto muy importante para evaluar en futuras investigaciones.

Incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) y FAN

La complejidad del ciclo de vida del fitoplancton y de especies formadoras de FAN asociadas a mayor heterogeneidad de las áreas donde se desarrollan, hace que aún haya grandes brechas en su conocimiento, que deben ser abordadas. Sin embargo, de los múltiples factores abióticos considerados en su desarrollo, el de mayor importancia es la temperatura. Esta genera una restricción fisiológica primaria para el rango de distribución y selección de especies (BEARDALL *et al.*, 2009).

La relación entre el incremento de TSM y FAN fue diversa e indirecta. De Paita a Callao, la mayor parte de estas ocurrieron en el período de anomalía positiva de TSM. Mientras, en Pisco, ocurrieron simplemente con el calentamiento estacional sin relación con ATSM (Fig. 5).

ANDERSON (1998) associated with some dinoflagellates a “thermal window”, favorable for removing resistance structures of the HAB-forming species. A decrease in SST would cause their encystation, as would have occurred in autumn. PEÑA-MANJARREZ *et al.* (2001) based on studies carried out in Todos Los Santos Bay in Baja California, defined the coastal strip with depths less than 25 m as “discrete seedbeds” with high concentrations of resistance cysts, associated with the fine sediment fraction. Given their geographical and morphological characteristics, this seems to be the case in the bays of Paita, Sechura, Ferrol, Miraflores, Paracas, and Independencia, among others (SÁNCHEZ *et al.*, 2017). The largest number of HABs were recorded at these locations, although the main observational effort may also have contributed to a greater ability to detect these events.

Increase in sea surface temperature (SST) and HABs events

The complexity of the life cycle of phytoplankton and HAB-forming species associated with greater heterogeneity of the areas where they develop means that we still have large gaps in our knowledge, which must be addressed. However, of the multiple abiotic factors considered in their development, the most important is temperature. This generates a primary physiological constraint on the species’ distribution range and selection (BEARDALL *et al.*, 2009).

The relationship between SST increases and HAB was diverse and indirect. From Paita to Callao, most of these occurred when SSTAs were present. In Pisco, they occurred simply with the seasonal warming and were unrelated to SSTA (Fig. 5).

During 2017 CEN, not all HAB-forming species responded in the same way to the increase in SST, which is an environmental parameter that regulates the occurrence, frequency, and duration of events in different geographic areas (Fig. 5).

According to the relationship of HABs with the temperature range in which they developed; three categories of HAB-forming species can be distinguished:

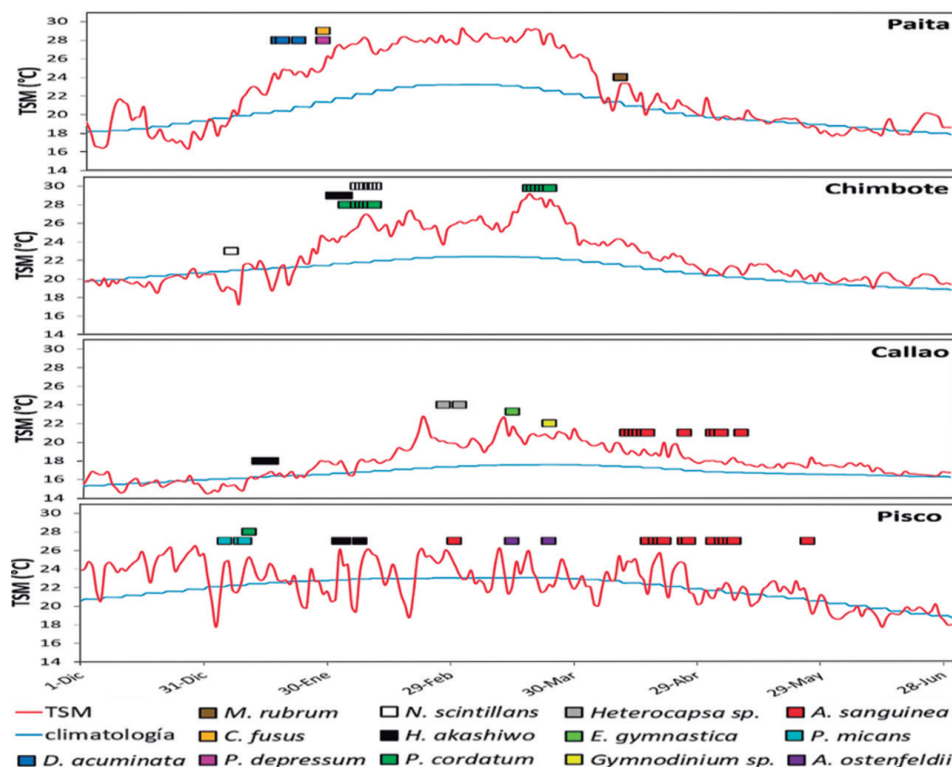


Figura 5.- Distribución diaria y mensual de la climatología de temperatura Superficial del Mar TSM (azul) y Anomalía de Temperatura Superficial del Mar - ATSM (rojo) y presencia de las FAN en los perfiles Paita, Chimbote, Callao y Pisco durante diciembre 2016 y junio 2017

Figure 5. Daily and monthly climatology distribution of SST (blue) and SSTA (red) and presence of HAB in Paita, Chimbote, Callao, and Pisco profiles between December 2016 and June 2017

Durante ENC 2017, no todas las especies FAN respondieron del mismo modo ante el incremento de TSM, parámetro ambiental que estaría regulando la aparición, frecuencia y duración de eventos en diversas áreas geográficas (Fig. 5).

De acuerdo a la relación de las FAN con el rango de temperatura en que se desarrollaron, se pueden distinguir tres categorías de especies formadoras:

Categoría 1. Mayor número de especies asociadas a TSM entre 18 y 26 °C y anomalías térmicas <+4 °C, destacando *Mesodinium rubrum*, *Prorocentrum micans*, *Alexandrium ostenfeldii*, *Heterosigma akashiwo*, *Gymnodinium sp.*, *Eutreptiella gymnastica* y *A. sanguinea*, en Pisco, Callao y Chimbote.

Categoría 2. Pocas especies FAN con rangos de TSM entre 24 y 27 °C y anomalías entre > +4 y <+5 °C, destacando *Dinophysis acuminata*, *Ceratium fusus* y *Prorocentrum depressum* en Paita.

Categoría 3. *Prorocentrum cordatum*, la especie que se presentó en el rango más amplio de TSM (entre 21 y 29 °C) y bajo anomalías de TSM de hasta +6 °C. Esta característica le permitiría mayor distribución y permanencia, con respecto a otras especies. *P. cordatum* es un dinoflagelado tecado, con características

Category 1. Greater number of species associated with SSTs between 18 and 26 °C and thermal anomalies <+4 °C, especially *Mesodinium rubrum*, *Prorocentrum micans*, *Alexandrium ostenfeldii*, *Heterosigma akashiwo*, *Gymnodinium sp.*, *Eutreptiella gymnastica*, and *A. sanguinea* in Pisco, Callao, and Chimbote.

Category 2. Few HAB-forming species with SST ranging between 24 and 27 °C and anomalies between > +4 and <+5 °C, with *Dinophysis acuminata*, *Ceratium fusus*, and *Prorocentrum depressum* predominated in Paita.

Category 3. *Prorocentrum cordatum* is the species that occurred in the widest SST range (between 21 and 29 °C) and under SST anomalies of up to +6 °C. This characteristic would allow a greater distribution and permanence, compared to other species. *P. cordatum* is a tectate dinoflagellate, with eurythermal and euryhaline characteristics, generating blooms in coastal waters worldwide (HEIL *et al.*, 2005). This species has a competitive advantage in relatively turbid and nutrient-rich waters, with optimal growth reported at 29 °C, for other latitudes, with high light availability and moderate winds (RABBANI *et al.*, 1990).

euritermas y eurihalinas, genera floraciones en aguas costeras alrededor del mundo (HEIL *et al.*, 2005). Esta especie tiene una ventaja competitiva en aguas relativamente turbias y con alta carga de nutrientes, reportándose un crecimiento óptimo a 29 °C, para otras latitudes, con alta disponibilidad de luz y vientos moderados (RABBANI *et al.*, 1990).

Se determinó una correlación positiva significativa entre las abundancias de *H. akashiwo* y *Dinophysis* sp. con la TSM de hasta 26 °C ($r=0,60; 0,63; p<0,05$). Este resultado es consistente con estudios que han reportado en ambas especies, tasas medias de crecimiento específico durante la fase exponencial son superiores a temperaturas más altas (YAMOCHI, 1989; HOSHIAI *et al.*, 2003). No se encontró correlación significativa con TSM a las otras especies.

Las relaciones descritas de las principales especies formadoras de FAN con la TSM, sugieren una influencia determinante entre tolerancia o preferencia a las condiciones térmicas con distribución geográfica de las mismas. Sin embargo, más estudios son necesarios para caracterizar la influencia de las masas de agua y la estratificación térmica en la ecología de las especies formadoras de FAN.

4. CONCLUSIONES

ENC 2017 condicionó el desarrollo de FAN en la región norte y centro del litoral, totalizando al menos 40 eventos, por encima de la frecuencia registrada el año anterior. Los dinoflagelados fueron el grupo responsable del 87% de FAN detectadas.

La TSM representaría un factor determinante en la selección y distribución geográfica de las especies formadoras de FAN. El grupo más diverso de especies, se presentó en rangos de TSM menores a 26 °C (*Mesodinium rubrum*, *Prorocentrum micans*, *Alexandrium ostenfeldii*, *Heterosigma akashiwo*, *Gymnodinium* sp., *Eutreptiella gymnastica* y *A. sanguinea*), mientras solo una especie *Prorocentrum cordatum*, formó FAN bajo TSM de hasta 29 °C.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Dr. Dimitri Gutiérrez director de la DGIOCC – IMARPE, por sus valiosos comentarios en la elaboración del presente artículo científico. Al personal de los Laboratorios Costeros de Paita, Chimbote, Callao y Pisco por su aporte en la recolección de muestras FAN para su análisis, procesamiento y que forman parte del proyecto por Derechos de Pesca: “Fortalecimiento de los estudios para el sistema de alerta temprana de la ocurrencia de las Floraciones Algales Nocivas (FAN) y tóxicas en el ecosistema peruano 2015-2017”.

A significant positive correlation was determined between the abundances of *H. akashiwo* and *Dinophysis* sp. with SST up to 26 °C ($r=0.60; 0.63; p<0.05$). This result is consistent with studies that have reported that the higher the temperatures, the higher the specific growth rates in both species during the exponential phase (YAMOCHI, 1989; HOSHIAI *et al.*, 2003). No significant correlation with SST was found for the other species.

The described relationships of the main HAB-forming species with SST suggest a determinant influence between tolerance or preference to thermal conditions and their geographic distribution. However, further studies are needed to characterize the influence of water masses and thermal stratification on the ecology of these species.

4. CONCLUSIONS

2017 CEN influenced the occurrence of HABs in the northern and central Peruvian coast, totaling at least 40 events, exceeding what was recorded in the previous year. Dinoflagellates were the group responsible for 87% of detected HABs.

Therefore, SST would represent a determining factor in the selection and geographic distribution of HAB-forming species. The most diverse group of species occurred in SST ranges below 26 °C (*Mesodinium rubrum*, *Prorocentrum micans*, *Alexandrium ostenfeldii*, *Heterosigma akashiwo*, *Gymnodinium* sp., *Eutreptiella gymnastica*, and *A. sanguinea*), while only one species, *Prorocentrum cordatum*, formed HAB with SSTs up to 29 °C.

Acknowledgments

Special thanks to Dr. Dimitri Gutiérrez, Director-General of the IMARPE's Oceanographic Research and Climate Change Area, for his valuable comments in the preparation of this paper. Also, we would like to thank the staff of the Coastal Laboratories of Paita, Chimbote, Callao, and Pisco for their contribution in the collection of HAB samples for their analysis, processing and those who are part of the project by Fishing Rights: “Strengthening of the studies for the early warning system of the occurrence of Harmful Algal Blooms (HAB) in the Peruvian ecosystem 2015-2017”.

5. REFERENCIAS

- ANDERSON D M. 1998. Physiology and bloom dynamics of toxic *Alexandrium* species, with emphasis on life cycle transitions. In: D.M. Anderson, A.D. Cembella and G.M. Hallegraeff (eds.). *Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms*. Springer-Verlag, Berlin. pp. 29–48.
- BEARDALL J, STOJKOVIC S, LARSEN S. 2009. Living in a high CO₂ world: impacts of global climate change on marine phytoplankton. *Plant Ecology and Diversity*. 2: 191–205.
- CORREA D, TAM J, CHAMORRO A. 2020a. Clasificación pentadal de vientos frente a la costa peruana. *Revista de Investigación de Física*. En press.
- CORREA D, CHAMORRO A, VÁSQUEZ L, GUTIÉRREZ D, GARCÍA W. 2020b. Comportamiento anormal de la interacción océano-atmósfera a lo largo de la costa peruana durante El Niño Costero 2017. En press.
- DELGADO E. 2018. Características del fitoplancton del mar peruano. Verano 2014, Crucero 1402-04. *Bol Inst Mar Perú*. 33(1): 65-72. <http://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/3263>
- DELGADO E, SÁNCHEZ S, CHANG F, BERNALES A, JACOBO N. 2019. Cambios del fitoplancton en el mar peruano durante el verano 2017. Cr. 1703-04, BIC. José Olaya y L. Flores. *Bol Inst Mar Perú*. 34(1): 61-79.
- ECHÉVIN V, COLAS F, ESPINOZA-MORRIBERÓN D, VÁSQUEZ L, ANCULLE T, GUTIÉRREZ D. 2018. Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño off Northern Peru and Ecuador. *Front. Mar. Sci*. 5: 367: 1-16. doi: 10.3389/fmars.2018.00367
- ENFEN. 2017. El Niño Costero 2017. Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN, 31 pp.
- ESQUEDA K L, HERNÁNDEZ B. D. 2010. Dinoflagelados microplanctónicos marinos del Pacífico central de México (Isla Isabel, Nayarit y costas de Jalisco y Colima). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- GEOHAB. 2001. *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms*, Science Plan. P. Glibert, & G. Pitcher (Eds.), SCOR and IOC, Baltimore and Paris. 86 pp.
- GREGORIO E D, PIEPER R E. 2000. Investigations of red tides along the Southern California Coast. *Bull. Southern California Acad. Sci*. 99: 147–160.
- HALLEGRAEFF G M, ANDERSON D M, BELI C, DECHRAOUI-BOTTEIN M Y, BRESNAN E, CHINAIN M, ENEVOLDSEN H, IWATAKI M, KARLSON B, MCKENZIE C H, SUNESEN I, PITCHER G C, PROVOOST P, RICHARDSON A, SCHWEIBOLD L, TESTER P A, TRAINER V L, YÑIGUEZ A T, ZINGONE A. 2021. Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts. *Commun Earth Environ*. 2: 117. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00178-8>
- HEIL C A, GLIBERT P M, FAN C. 2005. *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller A review of a harmful algal bloom species of growing worldwide importance. *Harmful Algae*. 4: 49- 470. doi: 10.1016/j.hal.2004.08.003
- HEISLER J, GLIBERT P, BURKHOLDER J, ANDERSON D, COCHLAN W, DENNISON W, GOBLER C, DORTCH Q, HEIL C, HUMPHRIES H, LEWITUS A, MAGNIEN R, MARSHALL H, SELLNER K, STOCKWELL D, STOECKER D, SUDDLESON M. 2008. Eutrophication and Harmful Algal Blooms: A Scientific Consensus. *Harmful Algae*. 8: 3-13.
- HOSHIAI G, SUZUKI T, KAMIYAMA T, YAMASAKI M, ICHIMI K. 2003. Water temperature and salinity during the occurrence of *Dinophysis fortii* and *D. acuminata* in Kesenuma Bay, northern Japan. *Fish Sci*. 69: 1303–1305.
- OCHOA N, GÓMEZ O. 1981. Variaciones del fitoplancton en el área de Chimbote durante 1977. *Boletín Extra Investigación ICANE*. 20: 12. <http://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/1218>
- OCHOA N, GÓMEZ O. 1988. Variación espacio-temporal del fitoplancton frente a Callao, Perú en 1986. *Boletín Extra (COLACMAR) Recursos y Dinámica del Ecosistema de afloramiento peruano*. 8 pp.
- ORELLANA-CEPEDA E, MORALES-ZAMORANO L A, CASTRO-CASTRO N. 1993. A conceptual model of coastal red tides off Baja California. VI Int. C. Toxic Mar. Phytoplankton. p. 152.
- PEÑA-MANJARREZ J L, GAXIOLA-CASTRO G, HELENES-ESCAMILLA J, ORELLANA-CEPEDA E. 2001. Cysts of *Lingulodinium polyedra*, red tide producing organism in the Todos Santos bay (winter-spring, 2000). *Ciencias Marinas*. 27(4): 543–558.
- RABBANI M M, REHMAN A U, HARMS C E. 1990. Mass mortality of fishes caused by dinoflagellate bloom in Gwdar Bay, Southwestern Pakistan. In: Granéli, E., Sundstrom, B., Edler, L., Anderson, D.M. (Eds.). *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York. pp. 209–214.
- ROJAS DE MENDIOLA B. 1979. Red tide along the Peruvian Coast. In: Taylor, D.L., Seliger, H. H. (eds.) *Toxic Dinoflagellate Blooms*. Elsevier, Amsterdam. pp. 183-190.
- SÁNCHEZ S, DELGADO E. 1996. Mareas rojas en el área del Callao (12°S) 1980-1995. *Inf Prog Inst Mar Perú*. 44: 19 – 37. <http://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/1231>
- SÁNCHEZ S, VILLANUEVA P, MENACHO M, CHANG F. 1997. Composición y distribución del fitoplancton en el mar peruano durante febrero - abril 1997. *Inf Inst Mar Perú*. 127: 56-62. <http://bibliomarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/730>
- SÁNCHEZ S, BERNALES A, DELGADO E, CHANG F C, JACOBO N, QUISPE J. 2017. Variability and biogeographical distribution of harmful algal blooms in bays of high productivity off Peruvian Coast (2012-2015). *Journal Environ Anal Toxicol*. 7: 530. doi: 10.4172/2161-0525.1000530
- SAR E A, FERRARIO M E, REGUERA B. 2002. Floraciones Algales Nocivas en el cono sur americano. Instituto Español de Oceanografía. 311 pp.
- SGROSSO S, ESPOSITO F, MONTRESOR M. 2001. Temperature and daylength regulate encystment in calcareous cyst-forming dinoflagellates. *Mar. Ecol. Progr. Ser*. 211: 77–87.
- TAKASHI G K, ALIAGA-NESTARES V, AVALOS G, BOUCHON M, CASTRO A, CRUZADO L, DEWITTE B, GUTIÉRREZ D, LAVADO-CASIMIRO W, MARENGO J, MARTÍNEZ A G, MOSQUERA-VÁSQUEZ G, QUISPE N. 2018. The 2017 Coastal El Niño. *State of the Climate in 2017*. *SIDEBAR* 7.2: 210- 211.
- TOMAS C. 1993. *Marine Phytoplankton: A guide to naked flagellates and coccolithophorids*. Academic Press, Inc. California-USA.
- YAMOCHI S. 1989: Mechanisms for outbreak of *Heterosigma akashiwo* red tide in Osaka Bay, Japan. In: Okaichi, I.; Anderson, D. M.; Nemoto, T. (eds.), *Red tides: Biology, Environmental science and toxicology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 253-261.

ANEXO

Tabla 1.- Relación de especies responsables de eventos FAN durante Niño Costero 2017

Especies productoras FAN	Fecha evento	°C	Lugar	Latitud	Longitud	Densidad celular (cel.L ⁻¹)
<i>Prorocentrum micans</i>	05-ene	19	Independencia	13°42'33,4"	76°13'18,5"	1,95 x 10 ⁶
<i>Prorocentrum micans</i>	10-ene	19	Lagunillas	13°42'33,4"	76°13'18,5"	2,08 x 10 ⁵
<i>Noctiluca scintillans</i>	06-ene	23	Chimbote	9°27'19,8"	78°23'0,2"	3,10 x 10 ⁵
<i>Prorocentrum cordatum</i>	11-ene	21	Pisco	13°42'33,4"	76°13'18,5"	8,48 x 10 ⁶
<i>Heterosigma akashiwo</i>	13-ene	24	Carpayo	12°4'16,07"	77°9'23,7"	5,32 x 10 ⁶
<i>Heterosigma akashiwo</i>	14-16 ene	23	Arenilla	12°4'16,08"	77°9'23,9"	2,46 x 10 ⁶
<i>Dinophysis acuminata</i>	17-ene	24	Paita	5°4'37,98"	81°7'13,98"	1,8 x 10 ⁵
<i>Noctiluca scintillans</i>	26-ene	25	Chicama	7°41'40"	79°26'19,3"	3,15 x 10 ⁵
<i>Ceratium fusus</i>	28-ene	27	Paita	5°4'37,98"	81°7'13,98"	1,45 x 10 ⁶
<i>Protoperidinium depressum</i>	28-ene	27	Paita	5°4'37,98"	81°7'13,98"	1,2 x 10 ⁶
<i>Tripos furca</i>	30-ene	24	Lambayeque	6°46'15"	79°58'0"	1,75 x 10 ⁶
<i>Heterosigma akashiwo</i>	31-ene	25	Chimbote	9°27'19,8"	78°23'0,2"	3,25 x 10 ⁶
<i>Heterosigma akashiwo</i>	02-07-feb	25	Chimbote, Huacho, Callao a Pisco	9°27'18,5" 13°42'33,4"	76°13'18,5" 78°23'02"	2,55 x 10 ⁶
<i>Gymnodinium</i> sp.	07-feb	25	Pisco	13°42'33,4"	76°13'18,5"	1,3 x 10 ⁶
<i>Gymnodinium</i> sp.	04-feb	24	Callao	12°4'16,07"	77°9'23,7"	1,92 x 10 ⁶
<i>Noctiluca scintillans</i>	09-feb	24	Ferrol	9°7'29,6"	78°34'28"	3,15 x 10 ⁵
<i>Prorocentrum cordatum</i>	6-10-feb	27	Ferrol	9°7'29,6"	78°34'28"	1,98 x 10 ⁶
<i>Noctiluca scintillans</i>	19-feb	26	Chicama	7°41'40"	79°26'19,3"	2,05 x 10 ⁶
<i>Noctiluca scintillans</i>	19-feb	26	Ferrol	9°7'29,6"	78°34'28"	2,9 x 10 ⁵
<i>Heterocapsa</i> sp.	27-feb	27	Callao	12°4'16,07"	77°9'23,7"	3,12 x 10 ⁶
<i>Akashiwo sanguinea</i>	01-mar	25	Pisco	13°42'33,4"	76°13'18,5"	7,08 x 10 ⁵
<i>Heterocapsa</i> sp.	02-mar	27	Callao	12°4'16,07"	77°9'23,7"	8,8 x 10 ⁶
<i>Alexandrium ostenfeldii</i>	15-mar	20	Paracas	13°50'9,03"	76°15'46,34"	1,8 x 10 ⁵
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	15-mar	24	Callao	12°4'16,07"	77°9'23,7"	0,35 x 10 ⁶
<i>Prorocentrum cordatum</i>	19-24-mar	29	Chimbote	9°27'19,8"	78°23'0,2"	1,35 x 10 ⁶
<i>Gymnodinium</i> sp.	24-mar	25	Callao	12°4'16,07"	77°9'23,7"	2,35 x 10 ⁶
<i>Messodinium rubrum</i>	10-abr	21	Paita	5°4'37,98"	81°7'13,98"	2,10 x 10 ⁶
<i>Akashiwo sanguinea</i>	12abr - 26 may	24	Huacho, Cañete, Callao, Pisco	11°6'30" - 13°42'33"	76°13'18,5" 77°36'30"	4,1 x 10 ⁶