

INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

INFORME

ISSN 0378-7702

Volumen 44, Número 4



Octubre - Diciembre 2017
Callao, Perú



PRODUCTIVIDAD EN EL SISTEMA DE AFLORAMIENTO PERUANO DURANTE EL NIÑO 2015-2016

PRODUCTIVITY IN THE PERUVIAN UPWELLING SYSTEM DURING THE EL NIÑO 2015-2016

Dante Espinoza-Morriberón¹ Jesús Ledesma² Francois Colas³,
Vincent Echevin³ Tony Anculle² Jorge Tam¹

RESUMEN

ESPINOZA-MORRIBERÓN D, LEDESMA J, COLAS F, ECHEVIN V, ANCULLE T, TAM J. *Productividad en el sistema de afloramiento peruano durante El Niño 2015-2016*. 2017. *Inf Inst Mar Perú*. Vol. 44(4): 460-466.- Durante los años 2015-2016, se ha desarrollado en el Pacífico Central uno de los eventos El Niño (EN) más intensos de los últimos 50 años. Frente al sistema de afloramiento peruano este evento no tuvo los mismos impactos que otros EN extremos del Pacífico Central. El principal objetivo del estudio es describir y entender la evolución de las concentraciones de clorofila-a frente al sistema de afloramiento peruano. Se corrigieron los datos de MODIS respecto a SeaWIFS mediante un modelo aditivo generalizado y se obtuvo una serie de clorofila satelital desde setiembre de 1997 a la actualidad. Los resultados muestran que EN 2015-2016 presentó sus anomalías más negativas durante noviembre-diciembre 2015 sin llegar a compararse con otros EN extremos (1997-1998). Además, los otros EN también presentaron mayores anomalías negativas durante inicios de verano, lo cual se debería a mayor limitación de nutrientes durante esta estación. Las anomalías negativas se habrían producido debido al paso de una onda Kelvin cálida que profundizó la nutriclina, ocasionando menor concentración de nitratos y silicatos en superficie. Por último, se observaron anomalías positivas de viento sin embargo el afloramiento posiblemente se debilitó debido a una corriente zonal hacia la costa.

PALABRAS CLAVE: Productividad, sistema afloramiento, Perú, 2015-2016

ABSTRACT

ESPINOZA-MORRIBERÓN D, LEDESMA J, COLAS F, ECHEVIN V, ANCULLE T, TAM J. *Productivity in the Peruvian upwelling system during the El Niño 2015-2016*. 2017. *Inf Inst Mar Peru*. Vol. 44(4): 460-466.- During the years 2015-2016, one of the most intense El Niño events in the last 50 years developed in the Central Pacific. Faced with the Peruvian upwelling system, this event did not have the same impacts as other extreme EN Pacific Central. The main objective of the study is to describe and understand the evolution of chlorophyll-a concentrations against the Peruvian upwelling system. The MODIS data were corrected for SeaWIFS through a generalized additive model and a series of satellite chlorophyll was obtained from September 1997 to the present. The results show that EN 2015-2016 presented its most negative anomalies during November-December 2015 without being compared with other extreme EN (1997-1998). In addition, the other ENs also showed higher negative anomalies during the beginning of summer, which would be due to greater nutrient limitation during this season. The negative anomalies would have occurred due to the passage of a warm Kelvin wave that deepened the nutriclina, causing a lower concentration of nitrates and silicates on the surface. Finally, positive wind anomalies were observed, however, the upwelling was possibly weakened due to a zonal current towards the coast.

KEYWORDS: Productivity, upwelling system, Peru, 2015-2016

1. INTRODUCCIÓN

El evento de calentamiento conocido como El Niño (EN) ocurrido durante 2015-2016 ha tenido impactos en los sistemas de afloramiento en el Pacífico Oriental (JACOX *et al.* 2016). En el Pacífico Central, desde comienzos del 2013 la temperatura superficial del mar (TSM) ha ido incrementándose sugiriendo durante el periodo 2014-2015 la presencia de un

EN fuerte, sin embargo este no llegó a desarrollarse completamente (McPHADEN 2015). Durante el 2015-2016 se observó uno de los eventos EN más intensos de los últimos 50 años en el Pacífico Central (Fig. 1), por lo que se esperó alcanzara un efecto de la misma magnitud que durante otros EN extremos (1982-83, 1997-98) en el Pacífico Oriental. Frente al sistema de afloramiento costero el EN 2015-2016 no tuvo el impacto de otros EN extremos en la TSM, ubicándose

1 Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático – Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, IMARPE. despinoza@imarpe.gob.pe

2 Unidad de investigación en Oceanografía Química y Geología Marina – Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, IMARPE

3 Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Paris, Francia

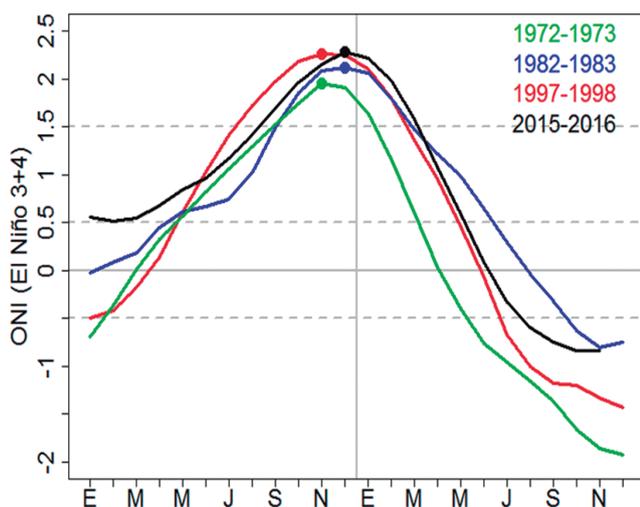


Figura 1.- Evolución del ONI (índice de EN, en el Pacífico Central), durante EN extremos. Los puntos representan el pico del ONI durante el evento EN

de acuerdo a algunos índices dentro del rango de EN moderado (QUISPE-CCALLUARI *et al.* 2016) a fuerte (ENFEN 2016).

EN impacta negativamente en la productividad primaria, observándose bajas concentraciones de clorofila-a (proxy de la productividad) a lo largo de la costa (THOMAS *et al.* 2009, CALIENES 2014, GUTIÉRREZ *et al.* 2016). Entre los procesos que influyen en la disminución de la clorofila durante EN podemos mencionar a la profundización de la nutriclina (BARBER y CHAVEZ 1983) relacionado con la disminución del contenido de nutrientes de las aguas que son fuente del afloramiento (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.* 2017) y la influencia de los remolinos en el transporte costa-océano de nutrientes (GRUBER *et al.* 2011).

Los cambios del fitoplancton como base de la cadena trófica, influyen en la distribución y abundancia de diversas especies (anchoveta peruana). Por tal motivo, el presente estudio tiene como objetivo principal describir y entender los cambios de la clorofila en el sistema de afloramiento peruano durante el desarrollo de EN 2015-2016.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio abarca el sistema de afloramiento peruano entre los 2°S-18°S y 85°W-71°W, durante el periodo enero 2015-diciembre 2016. Se definió una franja costera dentro de los 100 km a la costa, para las series y hovmuller mostrados. El índice El Niño Costero (ICEN 2012) se utilizó para definir el periodo EN 2015 (mayo) – 2016 (marzo).

Datos satelitales

Las concentraciones de clorofila superficial provienen de la base de datos satelitales de SeaWiFS (O'REILLY *et al.* 1998) y MODIS (OCEAN BIOLOGY PROCESSING GROUP 2003). Se decidió crear una base integrada a partir de los datos satelitales (setiembre 1997-actualidad) debido a que los periodos de operatividad son distintos para SeaWiFS (setiembre 1997-diciembre 2010) y MODIS (julio 2002-actualidad).

DEMARCQ y BENAZZOZ (2015) muestran la sobreestimación de MODIS respecto a SeaWiFS en el sistema de afloramiento de Canaria, por lo que la misma técnica fue utilizada para corregir los datos de MODIS en base a SeaWiFS frente a Perú. Para la corrección se utilizó un modelo aditivo generalizado teniendo como variable predicha a los datos de MODIS y como predictores a los datos de SeaWiFS, la estación y la latitud en cada pixel. El periodo para el cálculo de los coeficientes del modelo fue de 2007-2010, en el cual el sesgo entre ambos satélites no fue sistemático.

La base final de una resolución de ~4 km, contiene datos de SeaWiFS durante todo su periodo de operatividad unida con los datos de MODIS corregidos de enero del 2011 a diciembre del 2016. Para el cálculo de las anomalías de clorofila se utilizó una climatología basada en la serie final desde enero de 1998 a diciembre del 2015.

Para evaluar la anomalía del stress del viento se utilizaron datos del satélite ASCAT (BENTAMY *et al.* 2009) a una resolución horizontal de 0,25° (<http://www.ifremer.fr>). Además, se utilizaron los datos del nivel del mar de AVISO (<http://www.marine.copernicus.eu>) para la obtención de la corriente zonal geostrofica a una resolución horizontal de 1/3°.

Datos de modelo

Salidas de una simulación del modelo físico-biogeoquímico ROMS-PISCES (AUMONT *et al.* 2015) del 1958 al 2008 a 1/6° de resolución horizontal fueron utilizadas para evaluar las anomalías de clorofila (basada en una climatología de 1958-2008) en otros EN extremos (1972-73, 1982-83, 1997-98). Para ver la configuración del modelo en detalle ver ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.* (2017). Además del modelo PISCES se pudo obtener variación climatológica de la limitación del crecimiento del fitoplancton por la luz y los nutrientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución a lo largo de la costa de la Clorofila

En la figura 2, se observa la evolución de la clorofila a lo largo de la costa peruana (dentro de los 100 km a la costa) durante el periodo EN 2015-2016, la que presentó, principalmente, anomalías con valores negativos. Se pueden diferenciar tres etapas: neutralidad, incremento y decaimiento. De mayo a mitad de julio 2015, las anomalías se mantuvieron alrededor de la neutralidad con ligeros valores negativos de anomalías de clorofila entre 11°S y 13°S. La segunda etapa, de agosto a inicios de octubre 2015, presentaron anomalías positivas al norte de los 12°S (~ +1,5 mg.m⁻³) y un núcleo de anomalías negativas a 13°S (~-1 mg.m⁻³). El periodo de decaimiento, que correspondió a la quincena de octubre 2015 hasta finales de marzo 2016, se caracterizó por presentar anomalías negativas, que se intensificaron de noviembre a diciembre 2015 entre 10°S y 13,5°S (>-2mg.m⁻³).

El frente de clorofila definido como la isolínea de 1 mg.m⁻³ (NIXON y THOMAS 2001) se replegó hacia la costa, sobre todo a finales del 2015 (noviembre-diciembre). Durante este periodo climatológicamente el frente se encontró a 150 km de la costa y las mayores concentraciones de clorofila entre los 12°S y 14°S (Fig. 3a) (ECHEVIN *et al.* 2008); sin embargo, en promedio en este evento EN, el frente de clorofila se ubicó a 50 km de la costa e intensas anomalías negativas de clorofila se observaron dentro de los 100 km de la costa entre los 8°S y 14°S, llegando a valores de hasta -4 mg.m⁻³ (Fig. 3b, c). Además, muy cerca de la costa, dentro

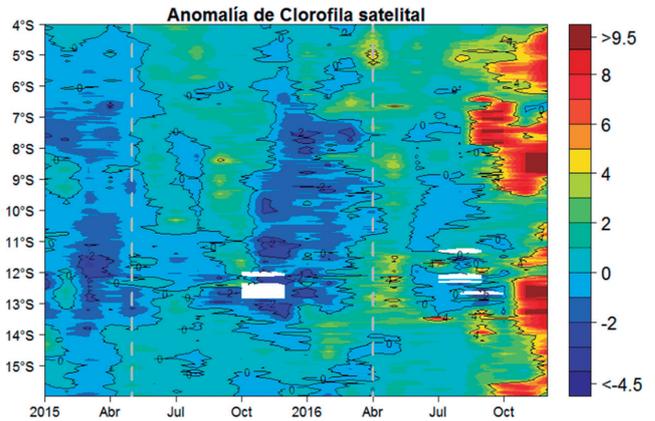


Figura 2.- Hovmuller latitud vs. tiempo de anomalías mensuales de clorofila satelital (mg.m⁻³) a lo largo de la costa, promedio de los 100 km a la costa durante el periodo 2015-2016. Las líneas plomas punteadas indican el inicio y fin de EN 2015-2016 de acuerdo al ICEN

de los ~ 10 km, entre noviembre y diciembre 2015, se observaron altas concentraciones de clorofila en la zona centro-norte (7°S - 9°S), llegando a anomalías positivas > +4 mg.m⁻³ (Fig. 3c).

Procesos que influenciaron en la disminución de la clorofila

La disminución de la productividad de la clorofila durante EN 2015-2016, estuvo influenciada por el arribo de ondas Kelvin (OK) cálidas que llegaron provenientes del Pacífico Central, siendo la de mayor impacto (y a su vez la más intensa) la que arribó a inicios de diciembre 2015 (Fig. 4). Esta OK cálida produjo las mayores anomalías negativas en promedio en la franja costera (~-1 mg.m⁻³), debido a que afectó

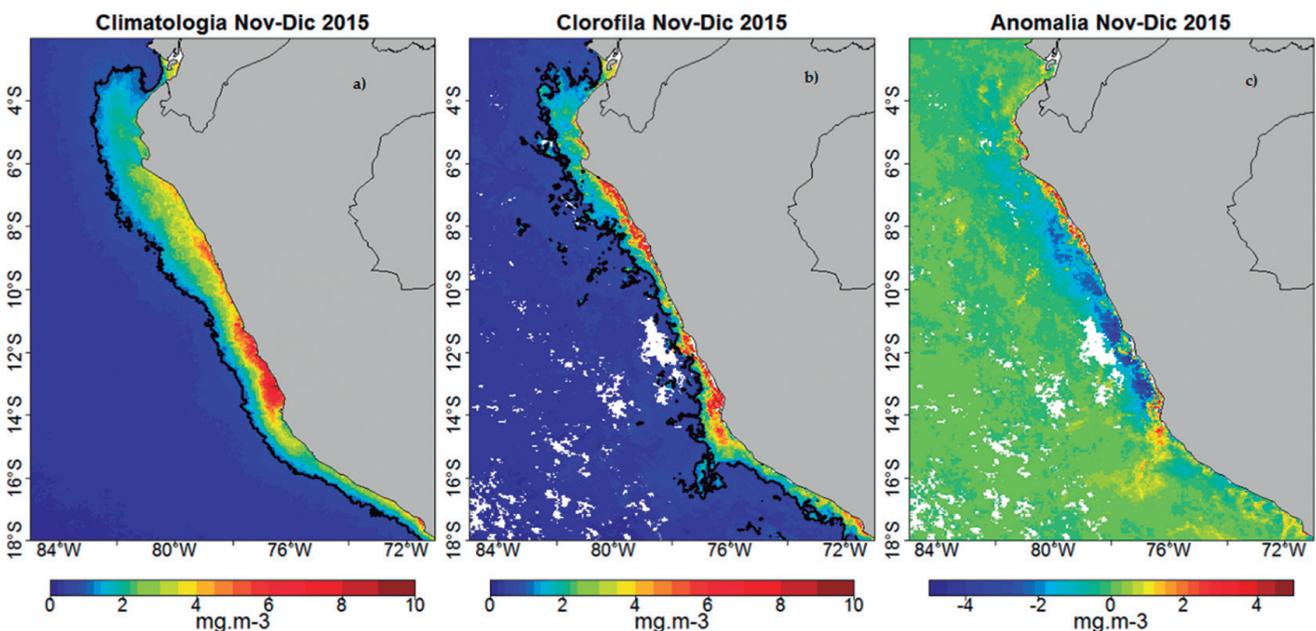


Figura 3.- Distribución promedio climatológico a), de la clorofila satelital (mg.m⁻³) b), anomalías promedio c). Durante noviembre - diciembre 2015

la estructura vertical de los principales nutrientes (ECHEVIN *et al.* 2014) profundizando la nutriclina, originando la presencia de valores muy bajos de

nitratos y silicatos ($<5 \mu\text{M}$ en ambos nutrientes frente a Paita) por encima de los 40 metros de profundidad durante la quincena de diciembre del 2015 (Fig. 5).

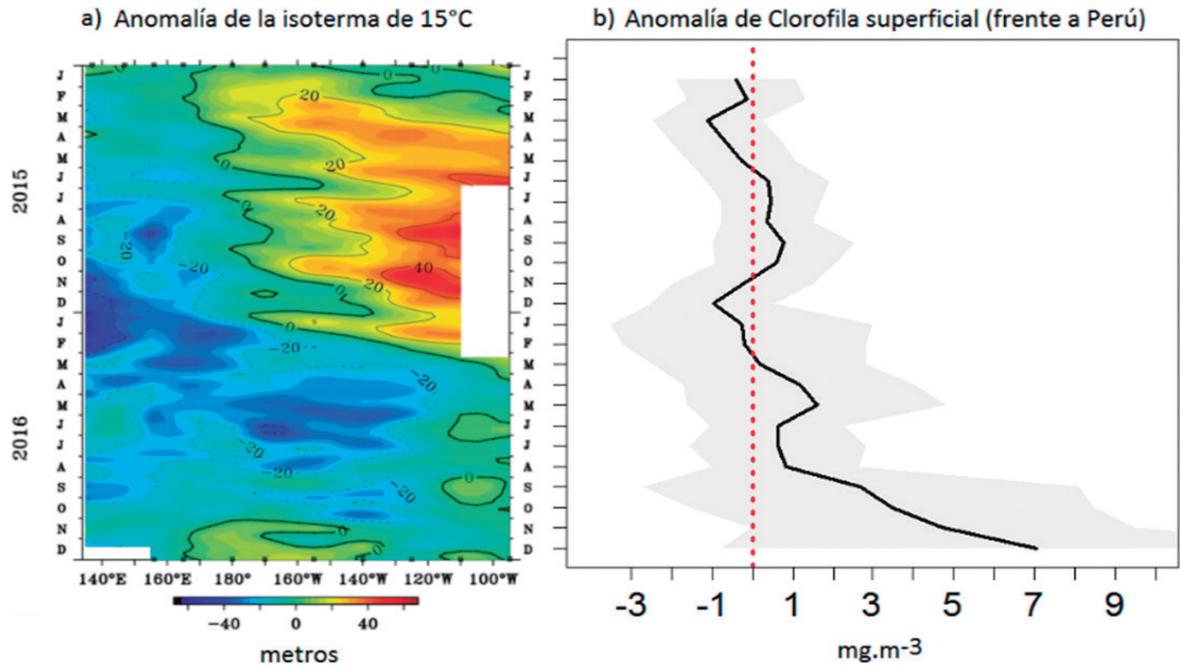


Figura 4.- Anomalia de la profundidad de la isoterma de 15 °C como indicador del paso de la onda Kelvin a través del Pacífico Ecuatorial (a) y serie de tiempo de las anomalías promedio de la clorofila satelital en la franja costera (b) durante el evento EN 2015-2016. Los datos en (a) provienen de observaciones de la boyas de TAO/TRITON

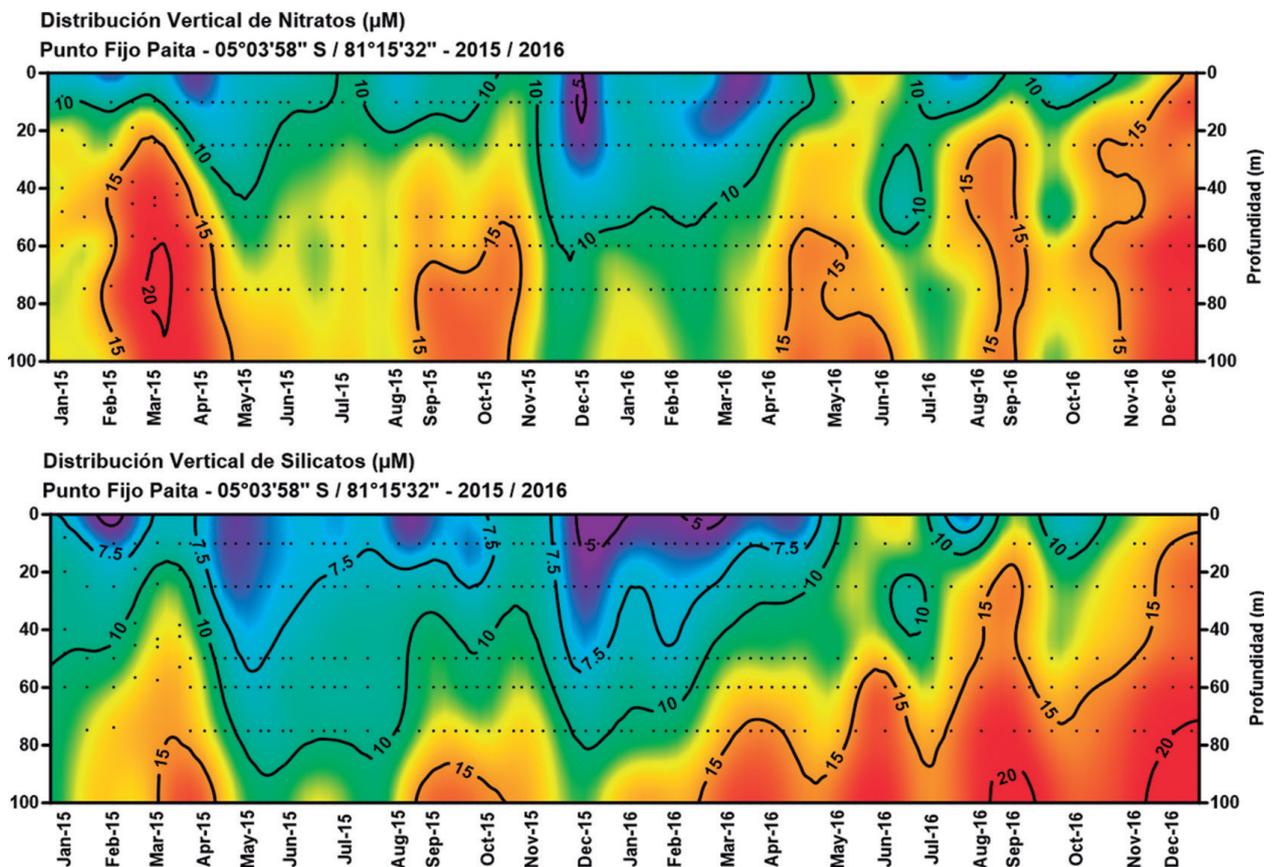


Figura 5.- Concentraciones de nitratos y silicatos (μM) en profundidad en la estación fija Paita durante enero 2015 a abril 2016

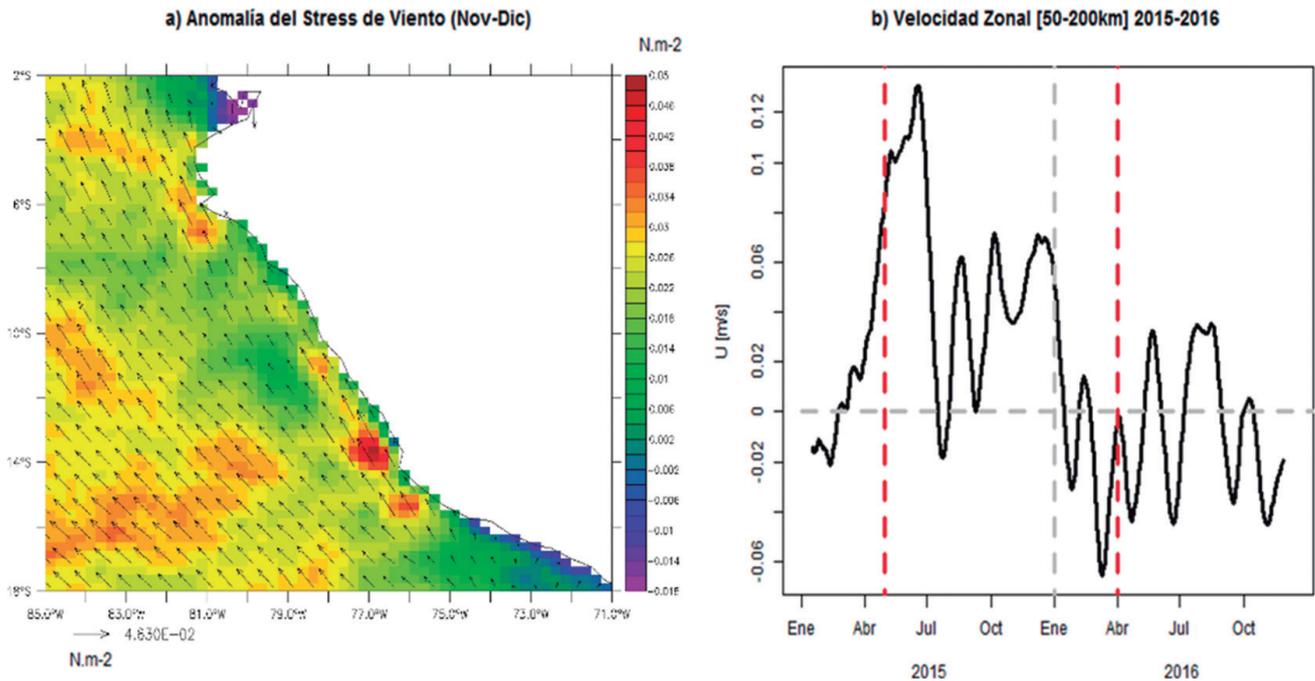


Figura 6.- a) Anomalías promedio de la intensidad del stress del viento ($N.m^{-2}$) durante noviembre –diciembre 2015 (máximo de anomalías negativas de clorofila), satélite ASCAT. Las flechas representan el vector de las anomalías del stress del viento; b) la serie de tiempo de la corriente zonal geostrofica promedio entre los 50-200 km de la costa y los 7°S-13°S durante EN 2015-2016. La corriente geostrofica fue calculada a partir de los datos de AVISO. Las líneas rojas en (b) representan el inicio y final de EN

Además, se observó presencia de anomalías positivas de vientos paralelos a la costa favorables al afloramiento (Fig. 6a) con mayor intensidad entre 11°S y 16°S ($\sim 0,05 N.m^{-2}$) también observados en otros eventos EN (ENFIELD 1981, BAKUN *et al.* 2010), las que podrían originar un afloramiento más intenso con mayor profundidad de las aguas afloradas que poseerían mayor contenido de nutrientes y por lo tanto aminorarían el efecto de la OK cálida (CARR 2003). Sin embargo, posiblemente el afloramiento durante EN 2015-2016 se debilitó, como lo muestran HUYER *et al.* (1987) y COLAS *et al.* (2008) en otros eventos EN, debido a la presencia de una corriente zonal hacia la costa (MARCHESIELLO y ESTRADE 2010) con valores de $\sim 0,05 m.s^{-1}$ entre noviembre-diciembre 2015, producto de un gradiente meridional (norte-sur) del nivel medio del mar (Fig. 6b).

Comparación con otros eventos El Niño extremos

El impacto de EN 2015-2016 en la productividad frente a la costa peruana, se evidenció durante primavera-verano; sin embargo, a pesar de que en el Pacífico Ecuatorial se presentó uno de los eventos EN más intensos de los últimos 50 años, frente a Perú su efecto no tuvo el mismo impacto que otro EN extremos en la productividad primaria. En comparación con las anomalías promedio durante el periodo de decaimiento de EN 1997-1998 ($\sim -2,5 mg.m^{-3}$), evento extremo del cual se poseen datos satelitales, durante EN 2015-2016 solo representaron la tercera parte.

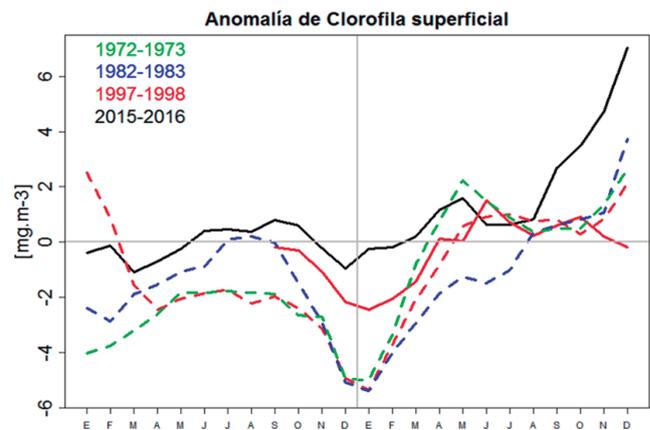


Figura 7.- Anomalia promedio de clorofila superficial en la franja costera (0-100 km y 6°S-16°S) durante EN 1972-1973 (línea verde), 1982-1983 (línea azul), 1997-1998 (líneas rojas) y 2015-2016 (línea negra) provenientes de los datos del modelo ROMS-PISCES (líneas punteadas) y de satélite (líneas sólidas)

En la figura 7, a pesar de que datos del modelo ROMS-PISCES presentan sobrestimación de las anomalías negativas de clorofila registradas por el satélite, se puede observar que las anomalías de otros eventos EN extremo, han oscilado alrededor de la misma magnitud por lo que se podría extrapolar que EN 2015-2016 fue más productivo que otros eventos extremos.

El proceso de recuperación de las concentraciones de clorofila se ha dado durante el invierno post-EN. Sin embargo, durante el periodo post EN 2015-

2016 las concentraciones de clorofila satelital han representado las mayores anomalías positivas (~ +6,5 mg.m⁻³; Figs. 4b y 7) desde que se tienen registros satelitales (setiembre 1997), incluso mayores a las presentadas durante el periodo 2004-2005, en el cual se registraron núcleos intensos de clorofila. Esta intensa productividad podría estar relacionado a: *i*) la menor presencia de nubes que se ha obtenido con los datos de MODIS (durante todo su periodo de operatividad) permitiendo mayor incidencia de radiación solar en el océano (Fig. 8, todo el 2016), *ii*) llegada de OK frías (Fig. 4a), *iii*) altas concentraciones de nutrientes (Fig.

5, desde octubre 2016) o *iv*) cambios en la profundidad de la capa de mezcla.

El mayor impacto de EN ocurre durante primavera tardía - verano (Fig. 7), lo cual estaría relacionado a que durante primavera-verano existe mayor limitación por nutrientes, a diferencia de invierno donde existe mayor limitación por la luz incidente (Fig. 9) (ECHEVIN *et al.* 2008). Esta mayor limitación por nutrientes en verano se vería más afectada por la profundización de la nutriclina durante EN, lo que generaría mayores anomalías negativas de clorofila.

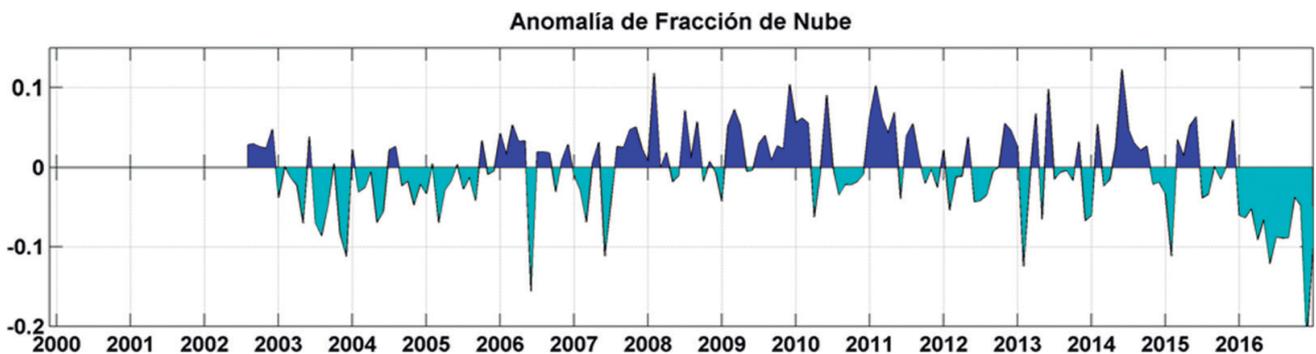


Figura 8.- Anomalía mensual promedio de fracción de nube (7°S a 16°S y dentro de las 60 mn a la costa) de julio de 2002 a diciembre de 2016. Datos de MODIS

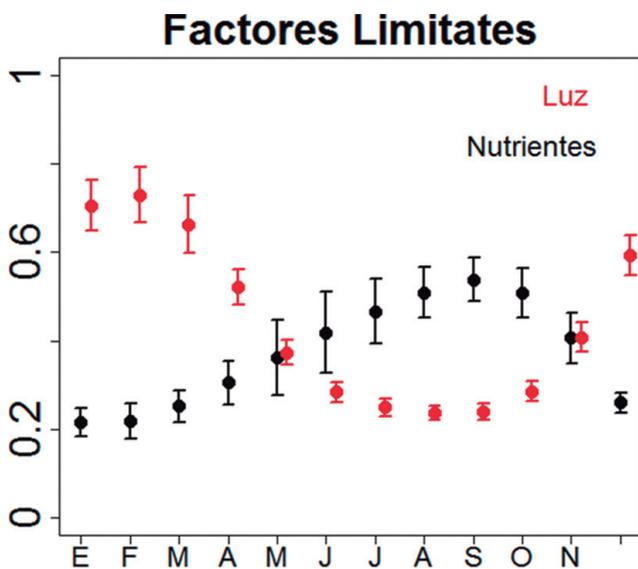


Figura 9.- Variación estacional de los factores limitantes (luz en rojo; nutrientes en negro) para el crecimiento del fitoplancton en la franja costera peruana integrados de la superficie a la profundidad de la capa de mezcla. Datos provenientes de modelo ROMS-PISCES. Menor limitación significa valores más cercanos a 1

4. CONCLUSIONES

Las menores concentraciones de clorofila se presentaron entre noviembre-diciembre 2015, periodo en el cual arribó una OK cálida intensa.

La OK cálida modificó la estructura vertical de los nutrientes profundizando la nutriclina, observándose concentraciones bajas de silicato en superficie. Este proceso sumado al debilitamiento del afloramiento (a pesar de anomalías positivas de viento), debido a una corriente zonal hacia la costa, desencadenaron intensas anomalías negativas de clorofila. Además, se registraron intensas anomalías positivas muy cercanas a la costa (<10 km) siendo necesario efectuar más estudios para comprender este proceso.

A pesar de que se observó un impacto negativo de EN 2015-2016, no ha sido comparable a las bajas concentraciones de clorofila encontradas durante los EN extremos 1972-1973, 1982-1983 y 1997-1998. El mayor impacto se ha dado en verano durante los eventos EN debido a que existe mayor limitación de nutrientes.

Los registros de las concentraciones de clorofila post-EN 2015-2016 son las máximas reportadas entre el periodo que se tiene información satelital, incluso mayores a las de los años 2004-2005 (periodo de intensa productividad). Estas concentraciones podrían estar relacionadas a la menor presencia de nubes y mayor concentración de nutrientes en la columna de agua.

5. REFERENCIAS

- AUMONT O, ETHÉ C, TAGLIABUE A, BOPP L, GEHLEN M. 2015. PISCES-v2: An ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geosci. Model Dev.* 8: 2465-2513. doi:10.5194/gmd-8-2465-2015.
- BAKUN A, FIELD D B, REDONDO-RODRIGUEZ A, WEEKS S J. 2010. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biol.* 16: 1213-1228, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
- BARBER R T, CHAVEZ F P. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science.* 222: 1203-1210. doi:10.1126/science.222.4629.1203.
- CARR M E. 2003. Simulation of carbon pathways in the planktonic ecosystem off Peru during the 1997-1998 El Niño and La Niña. *J. Geophys. Res.* 108(C12): 3380. doi:10.1029/1999JC000064.
- BENTAMY A, CROIZE-FILLON D, QUEFFEULOU P, LIU C, ROQUET H. 2009. Evaluation of high-resolution surface wind products at global and regional scales. *J. Ocean. Operational*, 2 (2): 15-27.
- COLAS F, CAPET X, McWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A. 2008. 1997-98 El Niño off Peru: a numerical study. *Prog. Oceanogr.* 79: 138-155.
- DEMARCO H, BENAZZOZ A. 2015. Trends in phytoplankton and primary productivity off Northwest Africa. In: Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. Valdés L. and Déniz-González I. (eds). IOC-UNESCO, Paris. IOC Technical Series. No. 115: 331-341. URI: <http://hdl.handle.net/1834/9199>.
- ECHÉVIN V, AUMONT O, LEDESMA J, FLORES G. 2008. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peruvian upwelling system: A model study. *Prog. Oceanogr.* 79: 167-76.
- ECHÉVIN V, ALBERT A, LÉVY M, AUMONT O, GRACO M, GARRIC G. 2014. Remotely-forced intraseasonal variability of the Northern Humboldt Current System surface chlorophyll using a coupled physical-ecosystem model. *Cont. Shelf Res.* 73: 14-30. doi:10.1016/j.csr.2013.11.015.
- ENFEN. 2016. Informe Técnico ENFEN N° 7. Julio 2016. Disponible en <https://www.dhn.mil.pe/Archivos/oceanografia/enfen/informe-tecnico//07-2016.pdf>
- ENFIELD D B. 1981. Thermally driven wind variability in the planetary boundary layer above Lima, Peru. *J. Geophys. Res.*, 86(C3): 2005-2016. doi:10.1029/JC086iC03p02005.
- ESPINOZA-MORRIBERON D, ECHEVIN V, COLAS F, TAM J, LEDESMA J, GRACO M, VÁSQUEZ L. 2017. Impact of the El Niño event on the productivity of the Peruvian Coastal Upwelling System. *J. Geophys. Res. Oceans.* 122, doi:10.1002/2016JC012439.
- GRUBER N, LACHKAR Z, FRENZEL H, MARCHESIELLO P, MUNNICH M, McWILLIAMS J, NAGAI T, PLATTNER G. 2011. Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. *Nat. Geosci.*, 4: 787-792.
- GUTIÉRREZ D, AKESTER M, NARANJO L. 2016. Productivity and Sustainable Management of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem under climate change. *Environmental Development.* 17: 126-144. doi:10.1016/j.envdev.2015.11.004.
- HUYER A, SMITH R L, PALUSZKIEWICZ T. 1987. Coastal upwelling off Peru during normal and El Niño times. *J. Geophys. Res.* 92: 14,297-14,307. doi:10.1029/JC092iC13p14297.
- JACOX M G, HAZEN E L, ZABA K D, RUDNICK D L, EDWARDS C A, MOORE A M, BOGRAD S J. 2016. Impacts of the 2015-2016 El Niño on the California Current System: Early assessment and comparison to past events. *Geophys. Res. Lett.* 43. doi:10.1002/2016GL069716.
- MARCHESIELLO P, ESTRADA P. 2010. Upwelling limitation by onshore geostrophic flow. *J. Mar. Res.* 68: 37-62. doi:10.1357/002224010793079004.
- McPHADEN M J. 2015. Playing hide and seek with El Niño. *Nat. Clim. Change.* 5: 791-795.
- NIXON S, THOMAS A. 2001. On the size of the Peru upwelling ecosystem, *Deep Sea Res., Part I*, 48, 2521-2528, doi:10.1016/S0967-0637(01)00023-1.
- OCEAN BIOLOGY PROCESSING GROUP. 2003. MODIS Aqua Level 3 Global Daily Mapped 4 km Chlorophyll a. Ver. 6. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2016-12-20].
- O'REILLY J E, MARITORENA S, MITCHELL B G, SIEGEL D A, CARDER K L, GARVER S A, KHARU M, McCLAIN C. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.* 103 (C11): 24,937-24,953. doi:10.1029/98JC02160.
- QUISPE-CALLUARI C, TAM J, DEMARCO H, ROMERO C, ESPINOZA D, CHAMORRO A, RAMOS J, OLIVEROS R. 2016. El Índice Térmico Costero Peruano (ITCP). Boletín trimestral Oceanográfico. 1 (1-4): 7-11.
- THOMAS A C, BRICKLEY P, WEATHERBEE R. 2009. Interannual variability in chlorophyll concentrations in the Humboldt and California Current Systems. *Prog. Oceanogr.* 83: 386-392. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.020.