



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

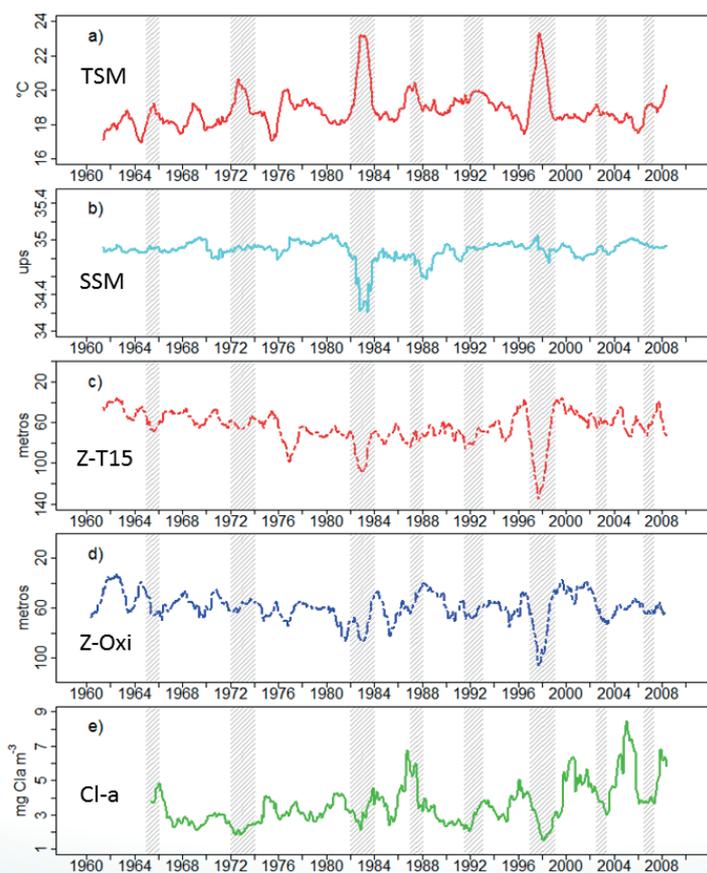


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú



Series de tiempo oceanográficas computadas a partir de la base de datos histórica del IMARPE (adaptado de Gutiérrez et al., 2014)

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú

Introducción

El sistema de corrientes del Pacífico Tropical Sudeste (PTSE) frente al Perú se distingue por la excepcional productividad biológica de su capa superficial -acompañada por una marcada deficiencia de oxígeno de su capa sub-superficial. Estas características son generadas por la interacción de procesos atmosféricos y oceánicos a diferentes escalas espaciales y temporales.

Entre los procesos de gran escala espacial se señala a la circulación de Walker, asociada a la presencia de los vientos alisios y que sostiene la asimetría zonal de la termoclina -y, por ende, de la nutriclina- en la banda tropical del Pacífico (más superficial en el borde oriental). Las perturbaciones de la circulación de Walker se transmiten mediante ondas Kelvin oceánicas (OKE) a través de la columna de agua hacia el Pacífico Oriental, modificando también su estructura vertical en una escala de tiempo intraestacional. El principal proceso a mesoescala es el



Dimitri Gutiérrez, Dr.
Investigador Científico
del Instituto del Mar del Perú

Doctor en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y Biólogo de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Actualmente es Director General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático del Instituto del Mar del Perú y Coordinador de la Maestría en Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Recientemente su investigación está enfocada en estudiar la relación entre escenarios climáticos del pasado, tendencias recientes, dinámica de la Zona de Mínima de Oxígeno, productividad y bentos frente al Perú.

afloramiento costero, asociado a los vientos superficiales paralelos a la costa con dirección al ecuador, que advecta aguas subsuperficiales, normalmente más ricas en nutrientes, hacia la superficie marina. La fertilización de la capa superficial propicia entonces el gran crecimiento del fitoplancton y de los niveles tróficos superiores. Por su parte, la pobre ventilación de la capa subsuperficial del Pacífico Oriental, a causa del patrón de circulación general marina, así como las altas tasas de respiración de la materia orgánica particulada producida en la capa superficial, provocan la deficiencia del oxígeno en las capas subsuperficiales e intermedias (zona de mínima de oxígeno, ZMO).

Es claro entonces que, en su origen, la productividad marina y la deficiencia de oxígeno en la capa subsuperficial son controladas por factores climáticos, sea a través de la circulación atmosférica o a través de la circulación marina, así como del acoplamiento entre ambas. En la cuenca del Pacífico, la variabilidad climática de tipo interanual es especialmente importante, siendo asociada al ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), mas existen otros modos de menor frecuencia, de escalas interdecenal, centenal o milenial, que también ejercen profundas influencias en la circulación, biogeoquímica y productividad del PTSE. En este artículo haremos una revisión de los procesos más importantes que afectan la fertilidad y la producción primaria en relación al efecto de la variabilidad climática en el PTSE y particularmente en el sistema de afloramiento costero peruano, procurando señalar algunas preguntas aún pendientes de solución en el estado del conocimiento actual.

Estratificación, afloramiento y producción primaria

La producción primaria en los sistemas marinos, sostenida en gran medida por el fitoplancton, está controlada por la

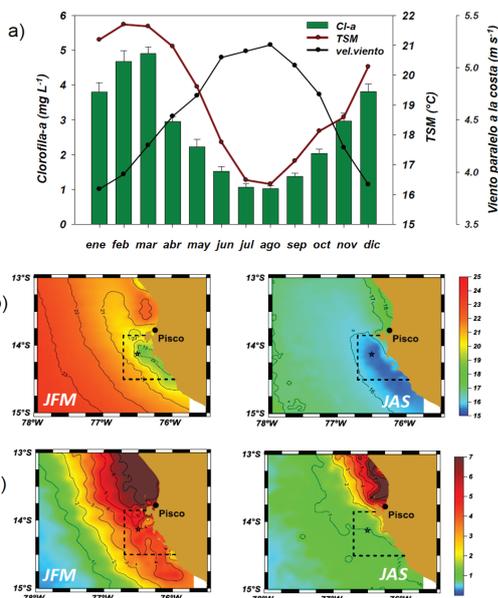


Figura 1. Producción primaria, forzamiento de los vientos y temperatura superficial del mar (TSM) frente a Pisco (14°S). a) Ciclo anual de la clorofila-a superficial, vientos favorables al afloramiento paralelos a la costa y TSM; b) Distribución de TSM en verano (JFM, izquierda) y en invierno (JAS, derecha); c) Distribución de clorofila-a superficial en verano (izquierda) e invierno (derecha). Las climatologías de clorofila-a y de los vientos costeros en (a) se basan en datos de color de mar del satélite SeaWiFS (1997 – 2006) y del reanálisis ECMWF-ERA40, para la caja costera mostrada en (b) y en (c). Adaptado de Gutiérrez et al. (2011).

conjugación de la disponibilidad de luz y de nutrientes. El grado de estratificación de la columna de agua por un lado favorece la retención del fitoplancton y de nutrientes en la capa iluminada, por otro lado limita el transporte de nutrientes desde las capas más profundas hacia la superficie por difusión turbulenta, la cual es el proceso natural de fertilización de la capa superficial más común en los sistemas marinos. Por lo general, en latitudes bajas y medias existe una relación negativa entre la estratificación y la productividad, reflejando la limitación dominante de los nutrientes en dichas regiones (Behrenfeldt et al., 2006), mientras que en altas latitudes la relación es positiva, debido a la limitación dominante de la radiación solar en el ciclo anual.

A diferencia de la mayor parte de sistemas marinos, en los sistemas de afloramiento costero los nutrientes son principalmente transportados a la superficie por advección, en respuesta a la divergencia ocasionada por los vientos costeros y la rotación de la Tierra. Como los eventos de afloramiento se dan en escalas de días a semanas, la fertilización del agua superficial es más persistente y el potencial del crecimiento del fitoplancton es mayor.

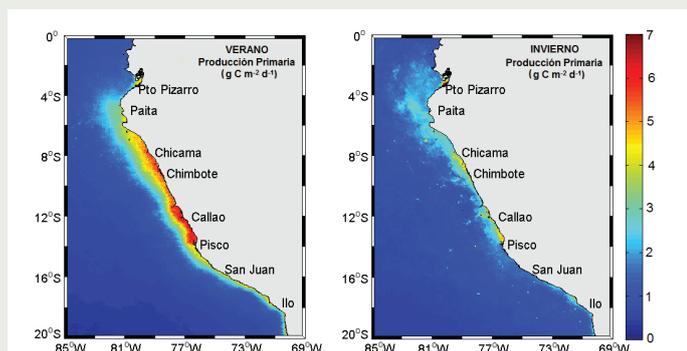


Figura 2. Verano (a) e invierno (b) climatológico de la producción primaria en $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ calculada entre los años 1997 y 2010, utilizando datos a 9 km del satélite Sea-WIFS para los datos de clorofila-a superficial y radiación fotosintéticamente activa, y del satélite Pathfinder para datos de temperatura superficial del mar (adaptado de Gutiérrez et al., 2014).

Por lo general, en los sistemas de afloramiento costero, mayormente ubicados en latitudes medias, la producción biológica es máxima en el verano, cuando los vientos favorables al afloramiento son más intensos. En el caso del PTSE frente al Perú, los vientos favorables al afloramiento costero persisten todo el año pero alcanzan su mayor intensidad en invierno; sin embargo, la productividad presenta su máximo climatológico en verano (Figuras 1 y 2). Esta paradoja es explicada posiblemente por la limitación lumínica dada la mezcla vertical más profunda, que reduce el crecimiento de los productores primarios durante invierno (Calienes et al., 1985; Echevin et al., 2008). En el verano, las surgencias aún ocurren pero son menos intensas o frecuentes. La relajación de la surgencia permite el rápido establecimiento de ventanas de tiempo de estratificación termal, el cual gatilla las floraciones del fitoplancton. A este mecanismo básico se añade el impacto de las ondas costeras atrapadas que se propagan desde la zona ecuatorial, derivadas de las OKE intraestacionales, que pueden ser 'cálidas' o 'frías',

provocando el hundimiento o ascenso de la termoclina, respectivamente. En el primer caso (segundo caso), los eventos de afloramiento generan una menor (mayor) fertilización de la capa superficial.

Variabilidad y procesos a múltiples escalas

Los registros históricos y de *proxies* paleoclimáticos muestran la sensibilidad de la productividad del PTSE a la variabilidad climática en múltiples escalas. La variabilidad en escalas de tiempo mileniales y centenales del clima del planeta, asociadas a cambios de la insolación y del vulcanismo, afecta a la circulación de Walker, la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y al tamaño y posición de las celdas de Hadley. Existe evidencia que en períodos globales cálidos centenales o mileniales, el calentamiento de los trópicos ocasionó un aumento del gradiente zonal de temperatura en el Pacífico Ecuatorial, de acuerdo al mecanismo del 'termostato oceánico' (Clement et al., 1996), provocando condiciones

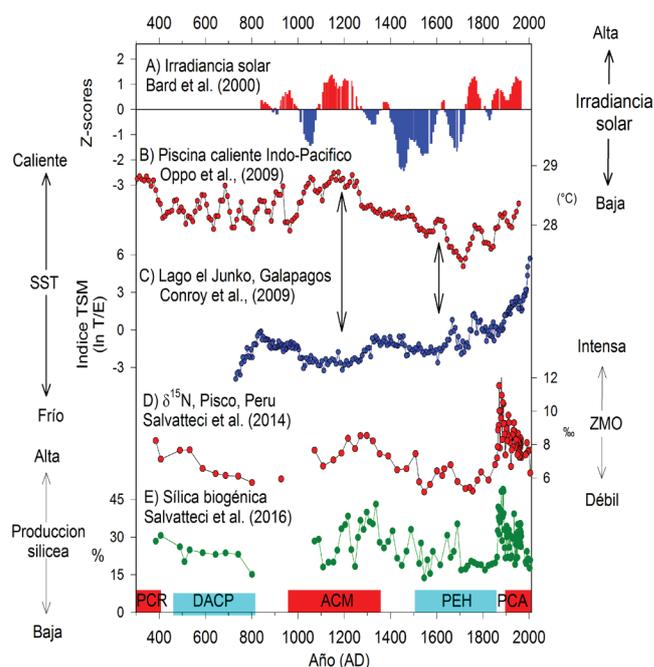


Figura 3. Reconstrucción de cambios centenales asociados a períodos climáticos en la oxigenación y productividad frente a Pisco y variaciones en el gradiente zonal de temperatura en el Pacífico Ecuatorial, a partir de múltiples proxies. (a) Irradiación solar en el hemisferio norte (Bard et al., 2000); (b) TSM en la piscina cálida del Indo-Pacífico (Oppo et al., 2009); (c) TSM en el Pacífico Ecuatorial Oriental (Conroy et al., 2009). Las flechas entre los dos paneles muestran el aumento del gradiente de TSM durante la Anomalia Climática del Medioevo (ACM), comparada a la pequeña edad de hielo (PEH), de acuerdo al mecanismo del 'termostato oceánico' (Conroy et al., 2010); (d) ^{15}N , proxy de la denitrificación de la columna de agua, proceso que se intensifica en condiciones de expansión de la ZMO; (e) Silica biogénica (%), proxy de la producción del fitoplancton silíceo (diatomeas). Otros períodos climáticos: Período Cálido Romano (PCR); Período Frío de la Edad Oscura (DACP) y Período Actual Cálido (PCA) (adaptado de Salvatelli et al., 2014).

base de afloramiento intensificado y expansión de la ZMO (tipo 'La Niña') y condiciones opuestas, o tipo 'El Niño', en períodos globales fríos a las mismas escalas (Figura 3). En consecuencia, los patrones de circulación, productividad y oxigenación en el PTSE variaron significativamente (Mollier-Vogel et al., 2013; Gutiérrez et al., 2009; Salvattecí et al., 2014). Así, para el último milenio, existen archivos sedimentarios marinos que sugieren condiciones base tipo 'La Niña' y 'El Niño' en lo relacionado a la productividad y la oxigenación para la segunda fase del período global cálido denominado Anomalía Climática del Medioevo (1000 – 1250 AD) y para el período global frío llamado Pequeña Edad de Hielo (1500 – 1820 AD) (Gutiérrez et al., 2009; Salvattecí et al., 2014).

A escala interanual, el ENOS es el modo dominante de variabilidad del clima y el océano Pacífico Tropical. La actividad del ENOS es a su vez modulada por la variabilidad climática en escalas más largas, por ejemplo las oscilaciones interdecenales del clima en el Pacífico, con las cuales comparte parcialmente el patrón espacial de anomalías (Chávez et al., 2011; Henley et al., 2015). Cuando ambas fuentes de variabilidad están en fase, las anomalías de El Niño son amplificadas generando impactos más fuertes en los ecosistemas.

El conocimiento actual establece que, durante El Niño, la termoclina en el PTSE se profundiza, asociada al debilitamiento de los vientos alisios y de la circulación de Walker. Además, las OKE de hundimiento son generadas con más frecuencia y, al arribar al Pacífico Oriental, se propagan en dirección al polo como ondas costeras atrapadas que profundizan la termoclina, la oxiclina y la nutriclina, reduciendo la fertilidad de las aguas superficiales costeras y modificando además la circulación superficial y subsuperficial (Brink, 1982; Echevin et al., 2014) (Figura 4). Si bien los vientos costeros pueden intensificarse en El Niño (Bakun et al., 2010), las aguas que afloran provienen ahora de la capa encima de la nutriclina, de modo que el sistema se torna limitado en nutrientes, lo cual reduce la productividad del sistema de afloramiento costero (Barber & Chavez, 1983; Calienes et al., 1985) (Figura 4). A más distancia del litoral, la reducción del gradiente perpendicular a la costa del esfuerzo de viento, así como la propagación al oeste de ondas Rossby, jugarían un papel en amplificar la profundización de la termoclina y en la reducción de la producción primaria (Halpern, 2002; Correa-Ramírez et al., 2012). Por otro lado, la profundización de la oxiclina, la propagación hacia el sur de ondas atrapadas a la costa, así como la menor respiración de la materia orgánica, contribuyen al debilitamiento de la ZMO y cambios en la biogeoquímica asociada (Brink, 1982; Morales et al., 1994; Graco et al., 2016).

El Niño, no obstante, presenta dos tipos dominantes: El Niño del Pacífico Oriental, también conocido como El Niño canónico y El Niño del Pacífico Central o 'Niño Modoki', de los cuales el segundo modo ha sido identificado solo recientemente (Kao & Yu, 2009; Takahashi et al., 2011). Mientras que los impactos de El Niño canónico en la productividad del PTSE son ampliamente conocidos y han

sido descritos en forma sucinta más arriba, el conocimiento de los impactos de El Niño Modoki en la productividad y otros procesos ecológicos es aún incipiente (Dewitte et al., 2012; Graco et al., 2016).

Sin embargo, la variabilidad a escala intraestacional del PTSE, asociada a la propagación de las OKE de hundimiento y de surgencia, puede dar luces sobre los impactos diferenciados sobre la productividad de El Niño canónico y El Niño Modoki en los últimos decenios. Dewitte et al. (2012) mostraron que los dos tipos de El Niño difieren en las características de las OKE. Mientras que en El Niño canónico las OKE se encuentran fuertemente sesgadas hacia el modo de hundimiento en el Pacífico Oriental, en El Niño Modoki las OKE más bien se presentan sesgadas hacia el modo de ascenso de la termoclina en el Pacífico Oriental, generando enfriamiento y favoreciendo la fertilización de la capa superficial. Este último es especialmente cierto para el caso de las OKE de modo 2, de período más largo (~100 d) que las de modo 1 (~70 d) (Dewitte et al., 2012). Cabe indicar que las OKE de modo 2 son más energéticas en el Pacífico Oriental, debido a la termoclina más superficial en esta región (Dewitte et al., 2008), e influyen más sobre la estructura vertical de la columna de agua (Echevin et al., 2014). Recientemente, Graco et al. (2016) documentaron cambios en la señal

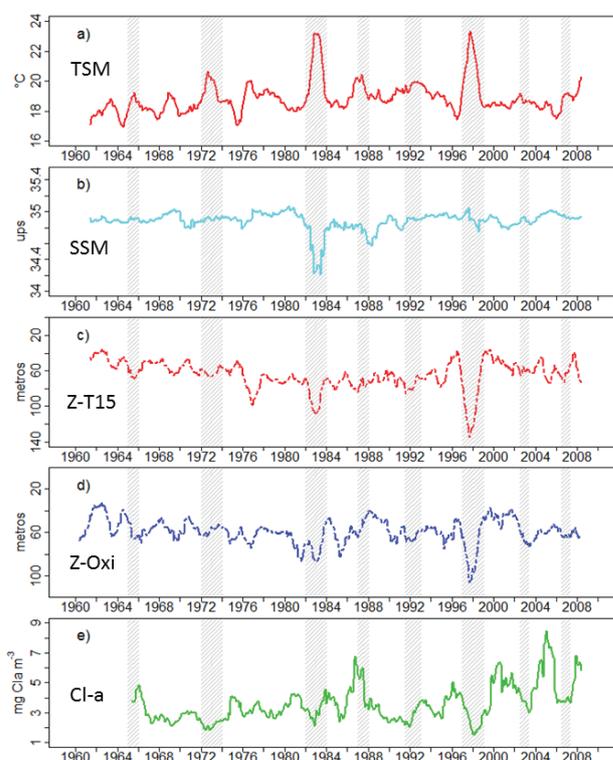


Figura 4. Series interanuales de (a) temperatura superficial del mar en °C; (b) salinidad superficial (UPS); (c) profundidad de la isoterma de 15°C (metros); (d) profundidad de la oxiclina, inferida de la iso-oxígeno de 1 ml L⁻¹ (metros); (e) concentración superficial de clorofila-a (mg Cl a m⁻³), computadas en base a los datos históricos del IMARPE, en el período de 1960 al 2008 (3.5°S – 20°S, 0 – 100 km de la costa), en resolución mensual (adaptado de Gutiérrez et al., 2014).

de la fertilización y la oxigenación sobre la plataforma de Callao en respuesta a la variación de la señal de las OKE de modos 1 y 2. Así, el período 2002 – 2009, caracterizado por la ocurrencia de eventos El Niño del Pacífico Central, se distinguió por la dominancia de OKE ‘frías’ de modo 2, seguida en menor medida por la ocurrencia de OKE de hundimiento de modo 1. Este patrón habría propiciado una mayor variabilidad temporal en la estructura vertical de la columna de agua, dando lugar a la alternancia de períodos de mayor y menor oxigenación, advección vertical de nutrientes y déficit de nitrógeno en la columna de agua.

Algunas interrogantes y perspectivas

En esta revisión nos hemos referido a algunos procesos físicos asociados a la variabilidad climática que influyen sobre la fertilidad y la productividad, sin embargo estos últimos también dependen de procesos biogeoquímicos como la remineralización de los nutrientes y las reacciones de óxido-reducción. Por ejemplo, la deficiencia de oxígeno en la columna de agua y las condiciones anóxicas en los sedimentos superficiales dan lugar al déficit de nitrato y al exceso de fosfato disuelto en las aguas costeras, en relación a la razón N:P que prima a nivel del océano abierto (‘razón de Redfield’), limitando posiblemente la composición del fitoplancton y su crecimiento. Existen observaciones que sugieren que durante El Niño, o bajo condiciones ‘tipo El Niño’, al producirse la oxigenación de la capa subsuperficial, tanto la utilización del nitrato en la respiración como la liberación del fosfato de los sedimentos disminuyen, normalizando la razón N:P (Graco et al., 2016). En qué medida este impacto puede influir en la composición de los productores primarios y sus tasas de crecimiento (floraciones algales) en la zona costera bajo condiciones de El Niño aún no ha sido suficientemente estudiado.

Asimismo, los mecanismos descritos son válidos especialmente para el ‘microfitoplancton’, el grupo que presenta el mayor rango de tamaño dentro de los productores primarios del plancton, compuesto por diatomeas y dinoflagelados. Menos estudiados en el PTSE son los mecanismos que explican el crecimiento de los productores primarios más pequeños, como el nanoplancton calcáreo (Alvites, 2016) y el bacteriofitoplancton. Para estos grupos, el ambiente biogeoquímico, como el pH y la disponibilidad del oxígeno, son factores críticos que controlan su distribución. La influencia de la variabilidad climática sobre estos factores ocurre a través de la circulación y/o la estratificación, que afectan los flujos y solubilidad del carbono y oxígeno disueltos.

Por otro lado, el efecto de la propagación de ondas costeras atrapadas, de ondas internas y vórtices de mesoescala sobre el crecimiento, concentración y transporte de los productores primarios también requiere más investigaciones. A través de un estudio de reanálisis y modelado, Echevin et al. (2014) han indicado que el paso de las ondas costeras atrapadas ‘frías’ favorece el desarrollo de núcleos de fitoplancton que migran lentamente hacia el sur, como resultado de la advección

vertical de los nutrientes y el efecto de la circulación costera (Figura 5). Otros estudios han revelado la importancia de ondas internas sobre la formación de estructuras de meso- y submesoescala en las aguas de la plataforma (Grados et al., 2016), favoreciendo la agregación de organismos e interacciones tróficas (Bertrand et al., 2014). Sin embargo su impacto en la producción primaria aún no ha sido determinado. Por último, también se ha documentado la formación de vórtices ciclónicos asociados al frente térmico costero, los cuales transportan las propiedades de ricas condiciones de nutrientes mar afuera (Chaigneau et al., 2011). Los estudios realizados sugieren que, durante períodos cálidos, la intensificación de los frentes térmicos favorece la formación de los vórtices de mesoescala, pero la mayor estratificación reduce el impacto de las ondas internas en la formación de estructuras (Chaigneau et al., 2011; Grados et al., 2016). Se desconoce aún cómo estos procesos contribuyen a la variabilidad espacial y temporal de la productividad.

El análisis de datos históricos instrumentales y de *proxies* en los sedimentos marinos ha revelado tendencias de enfriamiento y de aumento de la productividad en las aguas costeras en los últimos 35 años (Gutiérrez et al., 2011), que se encuentra superpuesta a la variabilidad interanual asociada al ENSO. En cambio, las primeras proyecciones desarrolladas en relación a escenarios del cambio climático para la región sugieren el aumento de la estratificación, el debilitamiento del afloramiento y la reducción de la productividad en el largo plazo (Brochier et al., 2013). Dada la relación directa (opuesta) entre productividad y la estratificación (intensidad del afloramiento) en el ciclo anual (Figura 4), es necesario que las futuras investigaciones ahonden en las variaciones

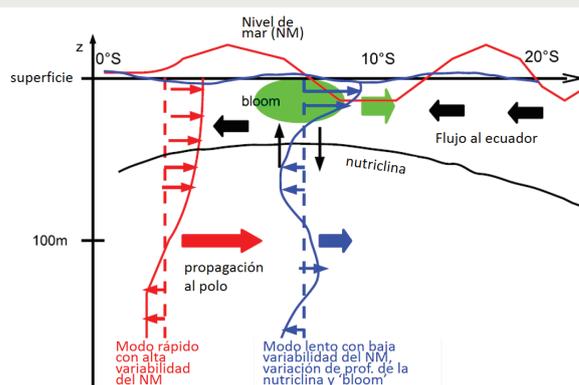


Figura 5. Modelo conceptual de la estructura vertical y paralela a la costa de las ondas costeras atrapadas (OCA) y su impacto en la producción primaria. Los modos rápido y lento de las ondas se muestran en rojo y azul, respectivamente. La propagación de las OCA se presenta en flechas de color y los flujos costeros hacia el ecuador, en flechas negras. El modo más veloz de OCA, asociado con una alta variabilidad del nivel de mar (NM), se propaga rápidamente hacia el sur sin desplazar la nutriclina. Entre tanto, un modo más lento con baja variabilidad en el NM, se propaga lentamente y genera un desplazamiento vertical de la nutriclina, favoreciendo el bombeo de nutrientes dentro y fuera de la capa superficial, lo cual favorece o mitiga la producción primaria. Debido al flujo superficial hacia el ecuador, las floraciones de fitoplancton se desplazan hacia el sur más lentamente que la propagación del desplazamiento de la nutriclina (adaptado de Echevin et al., 2014).

en la estacionalidad tanto de los factores climáticos y oceanográficos para la interpretación de las tendencias y las proyecciones. Asimismo, la incorporación de la evolución futura del ENOS (IPCC, 2013; Cai et al., 2014) y de los tipos de El Niño (Kao & Yu, 2009) ciertamente robustecerá las proyecciones futuras de la productividad del PTSE.

Agradecimientos

El autor agradece al IMARPE y al equipo de la DGIOCC por la información facilitada para la presente revisión. Asimismo, agradece al Dr. Renato Salvatelli (Instituto de Geociencias, Universidad de Kiel) y al Dr. Vincent Echevin (LOCEAN, IRD) por autorizar la publicación de las figuras 3 y 5 del artículo.

Referencias

Alvites, D., 2016: Variabilidad espacial y calcificación de las comunidades de cocolitoforidos en el sistema de afloramiento costero frente al Callao-Perú, Tesis de Maestría en Ciencias del Mar, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú, 136.

Bakun, A., D. Field, A. Redondo-Rodriguez, S.J. Weeks, 2010: Greenhouse gas, upwelling favourable winds, and the future of upwelling systems, *Global Change Biology*, 16:1213–1228, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.

Barber, R.T., & F.P. Chavez, 1983: Biological consequences of El Niño, *Science*, 222:1203–1210.

Bard, E., G. Raisbeck, F. Yiou, J. Jouzel, 2000: Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides, *Tellus*, 52B: 985–992.

Behrenfeld, M., R.T. O'Malley, D. Siegel, C. McClain, J. L. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier & E. Boss, 2006: Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, 444, doi:10.1038/nature05317.

Bertrand, A., D. Grados, F. Colas, S. Bertrand, X. Capet, A. Chaigneau, G. Vargas, A. Mousseigne, R. Fablet, 2014: Broad impacts of fine-scale dynamics on seascape structure from zooplankton to seabirds, *Nature Communications*, 5, 5239.

Brink, K.H., 1982: A comparison of long coastal trapped wave theory with observations off Peru, *Journal of Physical Oceanography*, 12, 897–913.

Brochier, T., V. Echevin, J. Tam, A. Chaigneau, K. Goubanova, & A. Bertrand, 2013: Climate change scenarios experiments predict a future reduction in small pelagic fish recruitment in the Humboldt Current system, *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12184.

Cai, W.J., S. Borlace, M. Lengaigne, V.P. Rensch, M. Collins, G. Vecchi, A. Timmermann, A. Santoso, M. McPhaden, L.X. Wu, M.H. England, G.J. Wang, E. Guilyardi, & F.F. Jin, 2014: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming, *Nature Clim. Change*, 4, 111–116.

Calienes, R., O. Guillén, & N. Lostanau, 1985: Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frentes a la costa peruana, *Boletín del Instituto del Mar del Perú, Callao*, 10:1-44.

Chavez, F.P., M. Messié, & J. T. Pennington, 2011: Marine Primary Production in Relation to Climate Variability and Change, *Annual Review of Marine Science*, 3:227–60.

Clement, A. C., R. Seager, M.A. Cane, & S.E. Zebiak, 1996: An Ocean dynamical thermostat, *Journal of Climate*, 9, 2190–2196.

Conroy, J. L., A. Restrepo, J.T. Overpeck, M. Steinitz-Kannan, J.E. Cole, M.B. Bush, & P.A. Colinvaux, 2009: Unprecedented recent warming of surface temperatures in the eastern tropical Pacific Ocean, *Nature Geoscience*, 2, 46–50.

Conroy, J. L., J.T. Overpeck, and J.E. Cole, 2010: El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2 ka, *PAGES News*, 18, 32–34.

Correa-Ramirez, M., S. Hormazabal, & C. Morales, 2012: Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru–Chile Current System, *Progress in Oceanography*, 92–95, 8–17.

Dewitte, B., J. Vazquez-Cuervo, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, D. Gutierrez, A. Sifeddine, L. Ortlieb, 2012: Change in El Niño flavours over 1958–2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru, *Deep-Sea Research II*, 77-80, 143–156.

Echevin, V., O. Aumont, J. Ledesma, & G. Flores, 2008: The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peru upwelling system: a modelling study, *Progress in Oceanography*, 79, 167–176.

Echevin, V., A. Albert, M. Lévy, M. Graco, O. Aumont, A. Piétri, G. Garric, & B. Dewitte, 2014: Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves, *Continental Shelf Research*, 73: 14–30.

Graco, M., S. Purca, B. Dewitte, O. Morón, J. Ledesma, G. Flores, C. Castro, & D. Gutiérrez, 2016: The OMZ and nutrients features as a signature of interannual and low frequency variability off the Peruvian upwelling system, *Biogeosciences Discussions*, doi:10.5194/bg-2015-567.

Grados, D., A. Bertrand, F. Colas, V. Echevin, A. Chaigneau, D. Gutiérrez, G. Vargas, & R. Fablet, 2016: Spatial and seasonal patterns of fine-scale to mesoscale upper ocean dynamics in an eastern Boundary Current system, *Progress in Oceanography*, 142, 105–116.

Gutiérrez, D., A. Sifeddine, D. Field, L. Ortlieb, G. Vargas, F. Chávez, F. Velasco, V. Ferreira, P. Tapia, R. Salvatelli, H. Boucher, M. Morales, J. Valdés, J.-L. Reyss, A. Campusano, M. Boussafir, M. Mandeng-Yogo, M. García, and T. Baumgartner, 2009: Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age, *Biogeosciences*, 6, 835–848.

Gutiérrez, D., I. Bouloubassi, A. Sifeddine, S. Purca, K. Goubanova, M. Graco, D. Field, L. Méjanelle, F. Velasco, A. Lorre, R. Salvatelli, D. Quispe, G. Vargas, B. Dewitte, & L. Ortlieb, 2011: Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling cell off Peru since the mid-twentieth century, *Geophysical Research Letters*, 38, L07603-1–L07603-6.

Gutiérrez, D., C. Grados, M. Graco, L. Vásquez, F. Velasco, S. Sánchez, P. Ayón, J. Tam, O. Morón, R. Flores, C. Quispe, & L. Pizarro, 2014: El Mar Peruano y su Dinámica, En: IMARPE, Libro de Oro, Callao, Perú, 34-59.

Halpern, D., 2002: Offshore Ekman Transport and Ekman Pumping off Peru during the 1997-98 El Niño, *Geophysical Research Letters*, 29(5), 10.1029/2001GL014097.

Henley, B., J. Gergis, D. Karoly, S. Power, J. Kennedy, C. K. Folland, 2015: A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-015-2525-1.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.

Kao, H.Y., & J.Y. Yu, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of El Niño, *Journal of Climate*, 22, 615–632.

Mollier-Vogel, E., G. Leduc, T. Böschen, P. Martinez, & R. Schneider, 2013: Rainfall response to orbital and millennial forcing in northern Peru over the last 18 ka, *Quaternary Science Reviews*, 76, 29–38.

Oppo, D. W., Y. Rosenthal, and B.K. Linsley, 2009: 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool, *Nature*, 460, 1113–1116.

Salvatelli, R., D. Gutiérrez, D. Field, A. Sifeddine, L. Ortlieb, I. Bouloubassi, M. Boussafir, H. Boucher, and F. Cetin, 2014: The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia, *Climate of the Past*, 10, 715–73.

Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, & B. Dewitte, 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.