

## Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico

La costa peruana, caracterizada por su alta productividad pesquera, esto como consecuencia del intenso afloramiento costero que existe en la región, está sometida cada cierto tiempo a cambios en su variación estacional en parámetros físicos claves como la temperatura del mar. Estos cambios pueden deberse a procesos físicos locales, como por ejemplo los vientos alisios, o a forzantes remotos provenientes de las regiones externas a la costa peruana (Enfield, 1987; Mosquera, 2008).

Uno de los procesos físicos remotos que impactan continuamente la costa peruana son las conocidas ondas Kelvin oceánicas ecuatoriales (de aquí en adelante simplemente ondas Kelvin), las cuales son ondas de gravedad modificadas por la rotación de la Tierra. Estas perturbaciones pueden ser formadas por los vientos zonales (con dirección este-oeste) en el Pacífico ecuatorial o por el rebote de las ondas Rossby (otro tipo de onda ecuatorial) en la frontera occidental del Pacífico y tienen la característica de desplazarse en dirección al este con una velocidad típica de 2 a 3 metros por segundo. Esto quiere decir, por ejemplo, que si una onda Kelvin se formó en el centro del Pacífico ecuatorial (longitud 180°), entonces esta demorará entre 1.5 meses y 2 meses, aproximadamente, en llegar a la costa de Sudamérica (ver Figura 1). Es necesario señalar que diversos procesos físicos (dispersión modal, interacción con las corrientes promedio y otros) pueden cambiar la velocidad y propiedades de estas ondas.

La onda Kelvin siempre se propaga de oeste a este a lo largo de la línea ecuatorial y puede ser de dos tipos:

1) Onda Kelvin cálida o de hundimiento (*downwelling Kelvin wave* en inglés), que se caracteriza por temperatura subsuperficial anómalamente cálida, termoclina<sup>1</sup> más profunda, elevación del nivel del mar y anomalías de corrientes de oeste a este (ver Figura 2).

<sup>1</sup>Capa en el interior del océano que divide las aguas cálidas superficiales de las frías más profundas y que se manifiesta como el máximo gradiente vertical de la temperatura del mar. En el Pacífico ecuatorial, la profundidad de la termoclina coincide aproximadamente con la profundidad de la isoterma de 20°C.



Ph. D. (c) Kobi A. Mosquera Vásquez  
Investigador Científico del  
Instituto Geofísico del Perú

Físico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), con un grado de Magíster en Física - Mención Geofísica- obtenido en la misma casa de estudios. Actualmente es candidato a doctor en Oceanografía Física en la Universidad Paul Sabatier (Francia). Su investigación está relacionada con los procesos físicos involucrados en el Fenómeno El Niño, con énfasis en las ondas largas ecuatoriales: Kelvin y Rossby. Tiene experiencia en el modelado oceánico en el Pacífico tropical, así como en el procesamiento de grandes volúmenes de información tales como datos in situ, remotos o resultados de modelos numéricos.

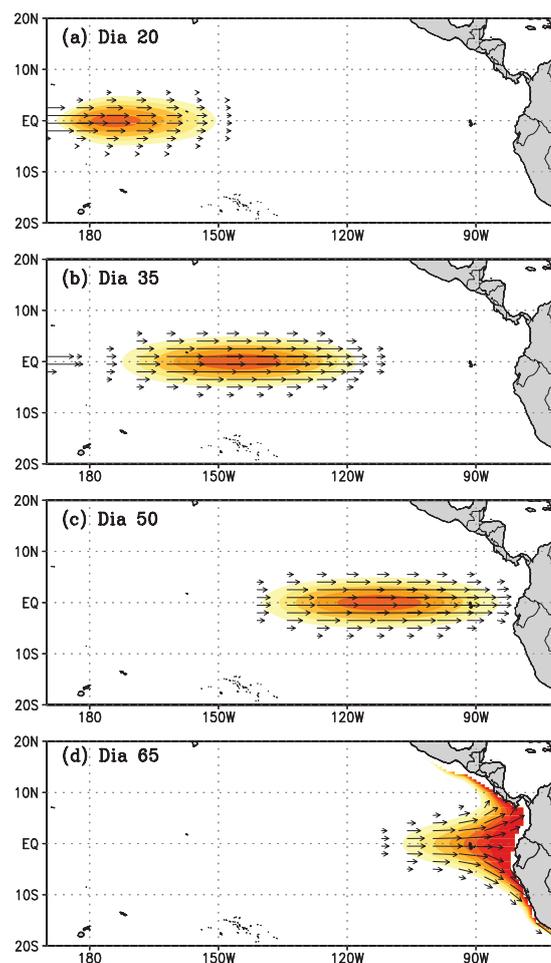


Figura 1. Simulación con el LOM-IGP de la propagación de una onda de Kelvin ecuatorial forzada por un pulso de vientos del oeste ecuatorial centrado en 170°E durante 30 días con un pico máximo de 9 m/s en el día 15. Solo se muestran las anomalías positivas mayores a 2 cm para el nivel del mar (colores, contornos cada 1 cm) y 2 cm/s para las corrientes zonales (flechas). En cada panel se indica el número de días después del pico máximo del viento.

# Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico

Mosquera K.

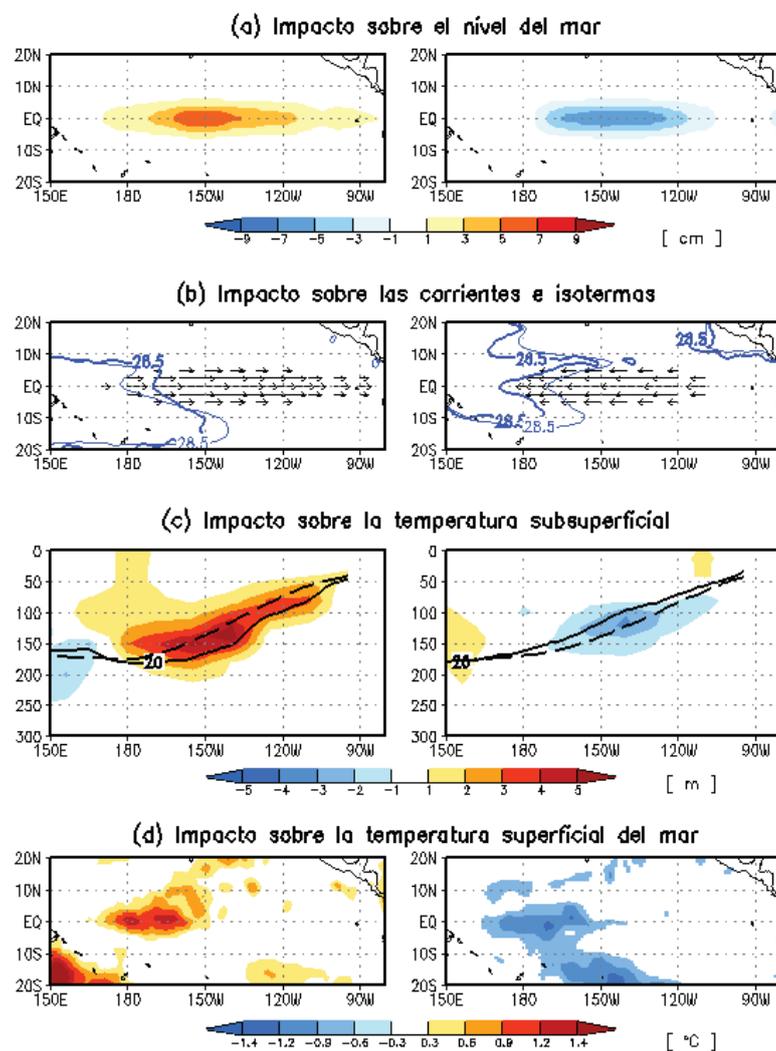


Figura 2. Impacto de la onda Kelvin de hundimiento (izquierda) y afloramiento (derecha) sobre las variables de (a) nivel del mar de LOM-IGP, (b) corrientes zonales e isothermas de 28.5 LOM-IGP y TSM de Reynolds (el total se muestra en línea azul gruesa mientras que la climatología en línea delgada), (c) temperatura subsuperficial de TAO (la línea negra gruesa es la profundidad de la isoterma de 20°C, mientras que la línea negra cortada es la climatología de la misma variable), y (d) TSM de Reynolds. Los paneles de la izquierda pertenecen aproximadamente a enero de 2002 (setiembre de 2008). Los valores originales han sido ligeramente modificados para un mejor entendimiento de los procesos físicos.

ejemplo, según Bertrand et al. (2008), la llegada de una onda cálida puede provocar que la anchoveta se concentre y se profundice en la costa peruana, lo que lleva a los barcos pesqueros a disminuir básicamente el área de exploración y el tiempo de pesca. Lo contrario sucede con la presencia de una onda Kelvin fría.

Debido al impacto de las ondas Kelvin en el mar peruano, es de suma importancia monitorizar y, si es posible, predecir el arribo de estas ondas a nuestra costa para evitar las repercusiones negativas. Una forma de realizar esto es identificando a las ondas Kelvin y su propagación mediante los datos de temperatura subsuperficial medidos por el conjunto de boyas en el Pacífico ecuatorial perteneciente al proyecto TAO/TRITON ([www.pmel.noaa.gov/tao](http://www.pmel.noaa.gov/tao)) o por medio de información del nivel del mar obtenida de los productos compuestos de TOPEX-POSEIDON/JASON (TPJ) de altimetría satelital. Asimismo, se puede recurrir a los resultados de los modelos oceánicos de circulación general de algunas agencias internacionales como el *Global Ocean Data Assimilation System* (GODAS, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>).

<sup>2</sup>Este proceso es conocido en la comunidad científica dedicada al estudio de El Niño como *Retroalimentación de advección zonal* ("Zonal advective feedback").

<sup>3</sup>En los grupos especializados este proceso se conoce como *Retroalimentación de la termoclina* ("Thermocline feedback").

2) Onda Kelvin fría o de afloramiento (*upwelling Kelvin wave* en inglés), con características opuestas.

Las ondas Kelvin pueden producir impactos en la Temperatura Superficial del Mar (TSM), zona de contacto del océano con la atmósfera. Las corrientes anómalas asociadas a la onda pueden provocar desplazamientos de las aguas frías o cálidas en la superficie. Si bien este efecto se puede dar en todo el Pacífico ecuatorial, es principalmente importante en la región occidental, donde una onda cálida o fría puede desplazar ("adveccionar") el borde de la llamada "piscina cálida" al este u oeste, respectivamente<sup>2</sup> (ver Figura 2b y d). Por otro lado, la acción de las ondas de profundizar, o elevar la termoclina (ver Figura 2c), afecta el proceso de afloramiento de aguas frías, produciendo un aumento o disminución de la TSM, respectivamente<sup>3</sup>.

Una vez que la onda Kelvin llega al extremo este, parte de ésta continúa su desplazamiento a lo largo de la costa de Perú hacia el sur. En el caso de una onda cálida, ésta puede adveccionar hacia el sur la masa de agua cálida que está frente a Ecuador, y hundir la termoclina (o aumentar el nivel del mar) reduciendo la eficacia del afloramiento costero, lo cual puede provocar un aumento de la TSM. Un ejemplo de esto se ve en la Figura 3, la cual muestra el desplazamiento de la onda Kelvin a lo largo del Pacífico Ecuatorial en el verano de 2012 y que tuvo repercusión en la TSM del mar en la costa peruana (Figura 3e). Un calentamiento anómalo en verano (temporada de lluvias) favorece la ocurrencia de precipitaciones que, en algunos casos, pueden resultar en pérdidas humanas y económicas. Además, el arribo de una onda Kelvin puede tener impactos en el recurso pesquero. Por

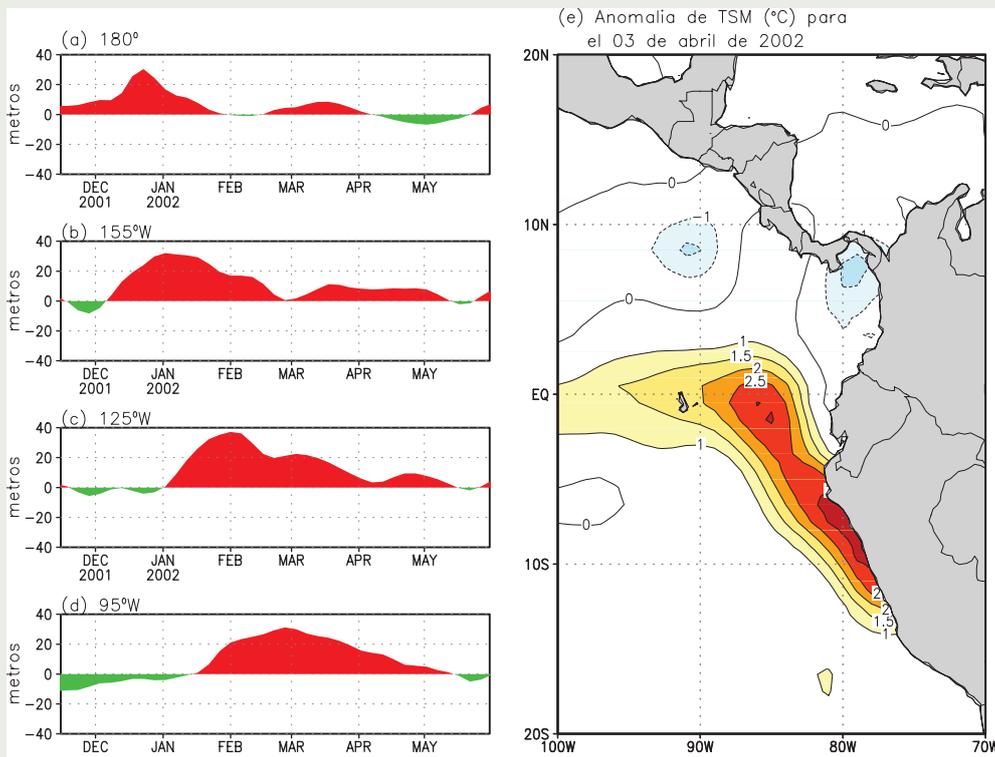


Figura 3. Las series de tiempo del lado izquierdo son anomalías de la termoclina en el Pacífico Ecuatorial calculadas de las boyas del proyecto TAO en 180° (a), 155°W (b), 125°W (c) y 95°W (d). A la derecha (e) se muestra la anomalía de TSM calculada del producto de Reynolds. Estos resultados se basan en una climatología de 2000-2013.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), como parte de sus actividades de monitorizar y estudiar el Fenómeno El Niño, utiliza desde el año 2009 un Modelo Oceánico Lineal (Mosquera, 2009; Mosquera et al., 2011, de aquí en adelante LOM-IGP) que permite diagnosticar la onda Kelvin por su manifestación en el nivel del mar y en las corrientes zonales. El LOM-IGP es un modelo simplificado del océano que asume que toda la dinámica superior del océano se puede representar con un modelo de una capa de profundidad  $H$ , cuyo límite inferior es la termoclina. Además se desprecian los términos advectivos (no-lineales). Con estas consideraciones el modelo se puede representar con las siguientes ecuaciones diferenciales parciales:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \beta y v = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho H} - r_2 u |u| \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \beta y u = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho H} - r_2 v |v| \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{H g'}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - r_1 \eta \quad (3)$$

<sup>4</sup>El "Reanalysis" es una estimación del estado de la atmósfera que incorpora observaciones y un modelo atmosférico. Anteriormente el LOM-IGP era forzado con productos de viento satelitales de QuikSCAT, pero estos datos fueron discontinuados.

Donde  $x$  e  $y$  son las direcciones oeste-este y sur-norte, respectivamente;  $t$  es el tiempo;  $u$  y  $v$  son las anomalías de las velocidades zonales y meridionales;  $\eta$  es la anomalía del nivel del mar;  $\beta y$  es el parámetro de Coriolis;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $g'$  es la gravedad reducida (asociada a las variaciones de densidad en la termoclina);  $\tau_x$  y  $\tau_y$  son las componentes zonales y meridionales de las anomalías de esfuerzo de viento, respectivamente;  $\rho$  es la densidad promedio del océano; y  $H$  es la profundidad promedio de la termoclina (que podría variar en el espacio). Los últimos términos de las ecuaciones (1) y (2) son "parametrizaciones", representaciones aproximadas de algunos términos de las ecuaciones de movimiento que fueron despreciados y que, para el caso de las corrientes, son sugeridos por Boulanger (2001).

Actualmente en el IGP el modelo es forzado con las anomalía (valores por encima o debajo del promedio estacional) de esfuerzo de viento ( $\tau_x$  y  $\tau_y$ ), esto último estimado del viento a 10 metros del reanalysis de NCEP-CDAS<sup>4</sup>, con lo que se da un diagnóstico y predicción de dos meses de las ondas Kelvin en el Pacífico ecuatorial. La predicción se logra corriendo el modelo hacia el futuro bajo dos escenarios: 1) considerando  $\tau_x = 0$  y  $\tau_y = 0$  (propagación libre) y 2) considerando  $\tau_x$  y  $\tau_y$  igual al promedio de la anomalía del esfuerzo de viento en los últimos treinta días (persistencia de la anomalía de viento). Un ejemplo se presenta en la Figura 4 que es la típica figura que se utiliza en el ENFEN. En ésta se aprecian diagramas del tipo Longitud (oeste-este) vs Tiempo ("diagramas Hovmöller"), a lo largo de la línea

# Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico

Mosquera K.

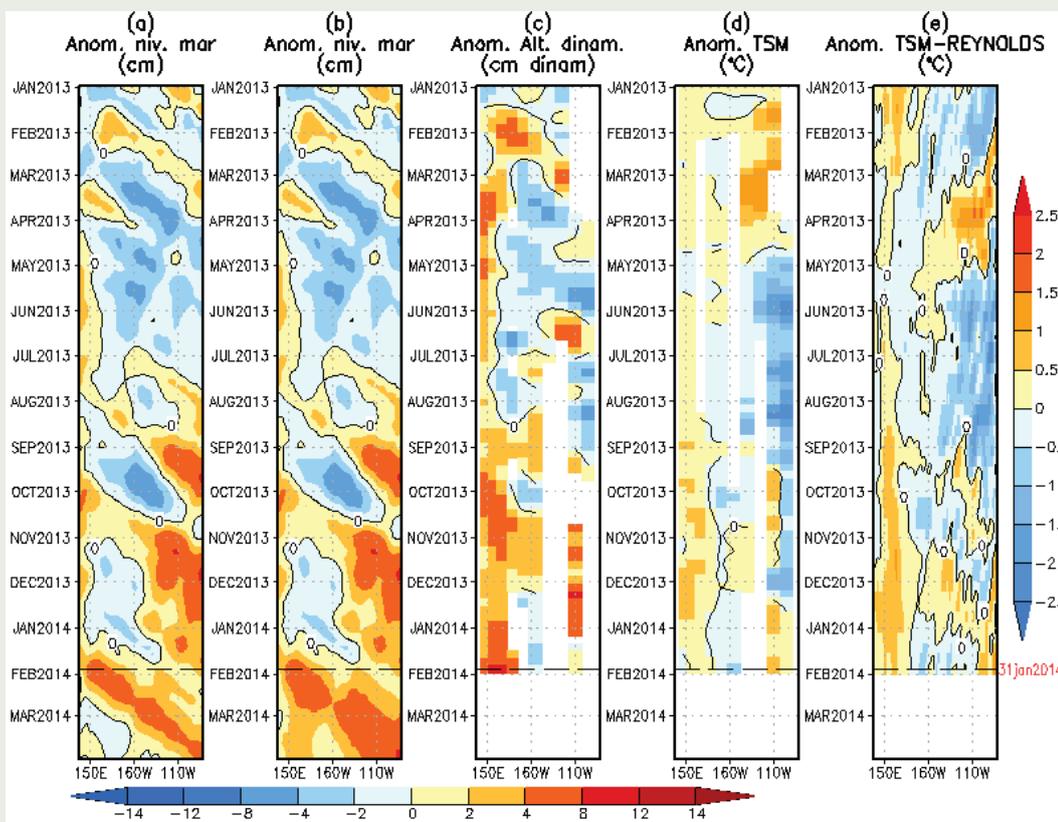


Figura 4. Anomalías (a y b) del nivel medio del mar simulado con LOM, (c) de la altura dinámica (TAO), (d y e) de la temperatura superficial del mar observada de TAO y Reynolds, respectivamente, en la región ecuatorial ( $2^{\circ}\text{S}$  y  $2^{\circ}\text{N}$ ). En (a) y (b) la línea cortada en color negro indica el momento en que el modelo empieza a utilizar el esfuerzo de viento igual a cero y persistida, respectivamente, para la predicción (ver fecha en color rojo a la derecha). La escala de (a), (b) y (c) se ubica abajo en forma horizontal, mientras que la escala de (d) y (e) está a la derecha (Fuente: IGP, NOAA PMEL, climatología: 2000-2013).

ecuatorial, de la anomalía del nivel del mar del LOM-IGP (Figura 4a y b), altura dinámica (Figura 4c), TSM de TAO (Figura 4d) y TSM de Reynolds (Figura 4e). Los pronósticos se muestran luego de la línea entrecortada negra (Figura 4a y b).

Es importante indicar que el LOM-IGP, como todos los modelos numéricos, no es perfecto, pero es una herramienta importante que permite establecer escenarios del posible arribo de ondas Kelvin (cálidas o frías). Las imperfecciones radican, entre otras cosas, en que esta versión del modelo no tiene una representación de la inclinación promedio de la termoclina, la cual puede afectar características de la onda Kelvin como amplitud, velocidad de propagación, estructura y propagación vertical. En particular, el modelo no representa el proceso de dispersión modal de las ondas Kelvin (Dewitte et al., 2012) o su reflexión como ondas de Rossby por la misma termoclina (Mosquera et al., 2013), particularmente alrededor de la longitud  $120^{\circ}\text{W}$ , donde la termoclina es más inclinada.

Para finalizar, es importante mencionar que en el IGP se trabaja en el entendimiento de los procesos físicos que pueden alterar las características de la onda Kelvin en su trayectoria hacia la costa. Para esto se usa información in situ y remota, así como los resultados de los modelos numéricos de circulación general y toda aquella información que nos dé una visión general de la dinámica del Pacífico ecuatorial. El análisis de esta

información nos permitirá establecer hipótesis que, una vez verificadas, servirán para establecer parametrizaciones, mejorar el LOM-IGP o implementar nuevos modelos. Todo esto con el objetivo de tener un mejor cálculo de la onda Kelvin y sus impactos en nuestra región, tanto en el diagnóstico como en el pronóstico.

## Referencias

- Bertrand, S., Dewitte, B., Tam, J., Bertrand, A. and Díaz, E., 2008: Impact of Kelvin wave forcing in the Peru Humboldt Current system: Scenarios of spatial reorganization from physics to fishers. *Prog. Oceanogr.*, 79, 278-289.
- Boullanger, J.-P., 2001: The Trident Pacific model: simulating surface ocean currents with a linear model during the 1993-1998 TOPEX-POSEIDON period, *Climate Dynamics*, 17, 159-173.
- Dewitte, B., Vazquez-Cuervo, J., Goubanova, K., Illig, S., Takahashi, K., Cambon, G., Purca, S., Correa, D., Gutierrez, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., 2012: Change in El Niño flavours over 1958-2008 Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru. *Deep-Sea Research Part II*, 1-14. doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.011.
- Enfield, D., 1987: The Intraseasonal Oscillation in the Eastern Pacific: How is it forced? *Journal of Physical Oceanography*, 17, 1860-1876.
- Mosquera, K., 2008: Numerical study of the response of the ocean to a northerly wind jet in the equatorial Eastern Pacific, *Adv. Geosciences*, 14, 239-242.
- Mosquera, K., 2009: Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados. Tesis para optar el grado de Magister en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Mosquera, K., Dewitte, B. y Lagos, P., 2011: Variabilidad Intra-estacional de la onda de Kelvin ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): simulación numérica y datos observados. *Magistri et Doctores, Revista de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 5, 9, p. 55.
- Mosquera-Vásquez, K., Dewitte, B., Illig, S., Takahashi, K. and Garric, G., 2013: The 2002-03 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2012JC008551.