

Contribución meridional de los vientos y el nivel del mar desde la perspectiva de ondas oceánicas ecuatoriales largas en un océano sin fronteras

*Gerardo Rivera y Kobi Mosquera
Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima-Perú*

INTRODUCCIÓN

El cambio en el estado base del sistema climático durante las últimas décadas ha modificado la dinámica presente en los eventos oceánicos y atmosféricos de gran escala. Si bien estos eventos, en general, mantienen sus características, los mecanismos que los gatillan han cambiado su grado de contribución en la génesis. Tomando como ejemplo, y motivo del presente trabajo, los eventos El Niño, estos han presenciado cambios en su comportamiento interdecadal (Cai et al., 2018; Neske and McGregor, 2018; Zhang et al., 2019) en donde su dinámica se ve manejada en mayor proporción por la respuesta instantánea a los forzantes de viento en comparación a la evolución ajustada por la misma dinámica oceánica.

Las ondas de Kelvin y Rossby juegan un rol importante en el transporte de energía de la piscina caliente hasta la lengua fría alterando las condiciones normales, dependiendo del impacto estacional junto al acoplamiento con la atmósfera, iniciando un evento El Niño. Estas ondas oceánicas pueden ser forzadas por los vientos, en donde una anomalía de estos (oestes) genera una onda de Kelvin de *downwelling* (*upwelling*) junto a una onda Rossby de *upwelling* (*downwelling*) que se propaga en sentido opuesto. El juego entre la propagación de ambas ondas y sus reflexiones en las fronteras del océano pacífico forman, en grandes rasgos, la señal observada en la anomalía del nivel del mar (ANM).

Con motivo de entender la dinámica presente en la propagación de estas ondas oceánicas y el rol que tienen en los eventos El Niño, se realiza la descomposición de la anomalía del nivel del mar y del esfuerzo de viento zonal (AEZ) en estructuras que corresponden a cada onda, lo cual sirva para evaluar la contribución de estos en los calentamientos mostrados a finales del 2018 y comienzos del 2019. Este avance de investigación forma parte del monitoreo constante del Instituto Geofísico del Perú (IGP) continuando el trabajo de Aparco (2015) y Mosquera (2014), tomando como referencia la teoría desarrollada por Boulanger y Menkes (1995) referido de ahora en adelante como BM95.

DATOS

Los datos de altimetría satelital fueron obtenidos de la base de datos Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) el cual comprende una combinación de todas las misiones de altimetría (Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2) en un procesado de nivel L4. El registro de estos datos comprende un archivo histórico reprocesado desde enero de 1993 hasta diciembre del 2018 (hasta la fecha de esta publicación), junto al procesamiento en tiempo real que cubre el periodo del 2019; ambos casos

en resolución temporal diaria y espacial de $1/4^\circ$. En el caso del esfuerzo de viento zonal, éste fue calculado a partir de la velocidad del viento zonal y meridional de NCEP mediante un modelo lineal simple.

Debido a que los datos observados de nivel del mar comienzan en 1993, se tomó 1993-2010 como periodo base (climatología) para ambas variables a fin de mantener una estacionalidad similar en el cálculo de las anomalías.

TEORÍA LINEAL

Siguiendo el trabajo de BM95, se asume que la estructura meridional del nivel del mar y los forzantes de vientos se conforman de una suma de ondas largas que aportan, en distinta magnitud, a la señal observada. Los modos de variabilidad obtenidos corresponden a la señal Kelvin (modo 0) junto a varios modos Rossby (1 en adelante), cada uno con una distribución meridional característica (figura 1).

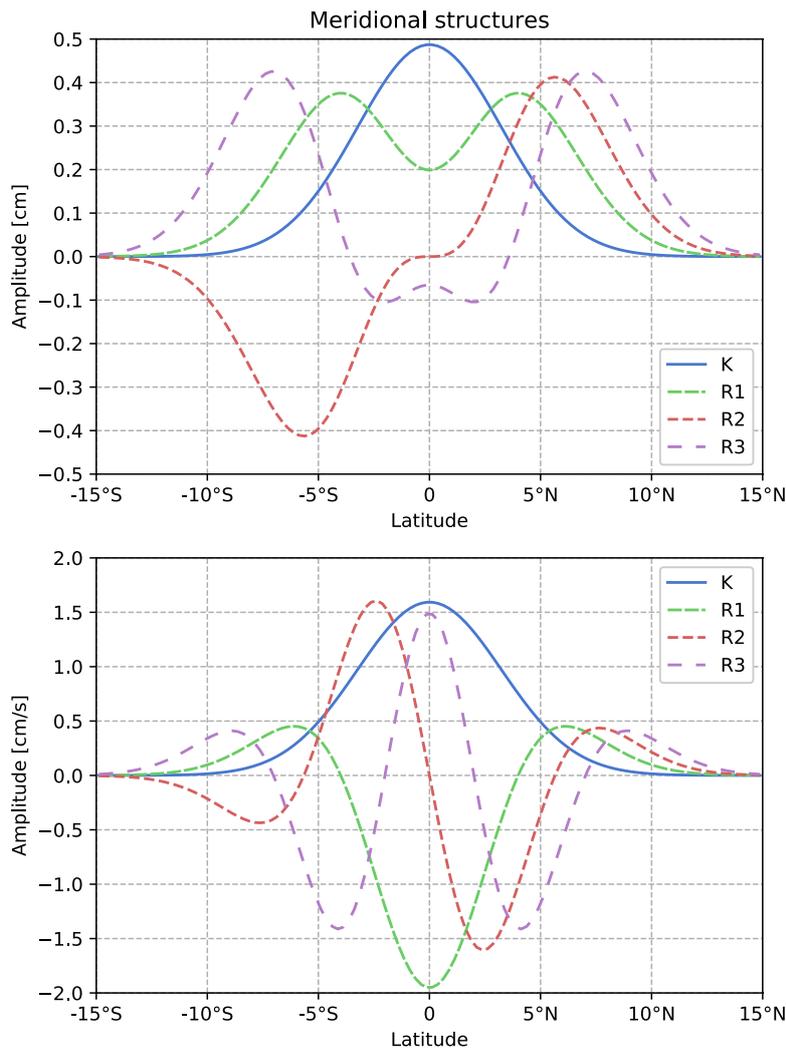


Figura 1. Estructuras meridionales para el nivel del mar (arriba) y para la corriente zonal/esfuerzo zonal (abajo). Ambos casos presentan el modo 0 como una distribución gaussiana meridional, correspondiente a la estructura Kelvin.

La descomposición expuesta en BM95 se realiza sobre la solución de las ecuaciones lineales adimensionales de momento en la aproximación de onda larga, para un océano meridionalmente sin fronteras, en un plano ecuatorial beta. La adimensionalización de cada término en la ecuación de momento es realizada usando los valores en la tabla 1 asumiendo una propagación de ondas en el primer modo baroclínico (más detalles sobre las aproximaciones y la ecuación de momento en BM95).

Parámetro	Factor de escala
Velocidad del primer modo baroclínico (c)	3 m/s
Aceleración de la Gravedad	9.81 m/s ²
Longitud (L)	$(c/\beta)^{1/2}$
Tiempo (T)	$1/(\beta * c)^{1/2}$
Nivel del mar (h)	c^2/g
Corriente zonal y meridional (u, v)	c
Forzantes horizontales (F, G)	$c[(\beta * c)^{1/2}]$
Fuente térmica (Q)	$c^2[(\beta * c)^{1/2}]/g$

Tabla 1. Parámetros usados en la ecuación lineal de momento en BM95 con sus respectivos factores de escala para el análisis adimensional. Los valores constantes corresponden a la velocidad de propagación del primer modo baroclínico ($c = 3 \text{ m/s}$) y a la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

El nivel del mar $h(x,y,t)$ y el forzante de viento $F(x,y,t)$ son expresados de la siguiente manera

$$h(x,y,t) = \sum_{n=0}^N r_n(x,t)R_n^h\left(\frac{y}{L}\right) \quad \wedge \quad F(x,y,t) = \sum_{n=0}^N F_n(x,t)R_n^u\left(\frac{y}{L}\right)$$

Donde R_n^h y R_n^u son los componentes del nivel del mar y de corriente zonal de las estructuras meridionales, y $r_n(x,t)$ y $F_n(x,t)$ son los coeficientes de proyección para la ANM y AEZ a ser calculados por el método. En el caso especial de la AEZ, solo la componente zonal es tomada en cuenta para el cálculo de los coeficientes

$$F(x,t)_j = \int_{-\infty}^{+\infty} \tau_x(x,y,t)R_n^u\left(\frac{y}{L}\right) dy$$

COEFICIENTES DE PROYECCIÓN

Los coeficientes de proyección son valores adimensionales que cuantifican el grado de contribución de ondas ecuatoriales largas en las señales observadas, representando el comportamiento longitudinal de los campos proyectados, los cuales permiten reconstruir la

señal de entrada como una suma de amplitudes de distintos modos (Kelvin y Rossby) mediante su multiplicación con las estructuras meridionales.

RESULTADOS

Los coeficientes de proyección para la ANM y AEZ se observan en la figura 2a,2b y 2c, 2d, respectivamente, en un diagrama longitud tiempo para el periodo 2018-2019. A lo largo de todo el periodo se observa una señal positiva de fondo persistente en las anomalías del nivel del mar la cual puede estar relacionada una variación del estado base, lo cual sugeriría un replanteamiento de la climatología. No obstante, la actividad de las ondas ecuatoriales aun resalta sobre este sesgo, lográndose distinguir la propagación de ondas de Kelvin y Rossby en las figuras 2a y 2b.

La interpretación de los coeficientes va de la mano con las estructuras meridionales, aproximadamente, como sigue: un coeficiente de 20 unidades proyectaría, en el Ecuador, una amplitud en el nivel del mar de 10 cm para Kelvin (multiplicado por 0.5 cm) y de 4 cm para Rossby modo 1 (multiplicado por 0.2 cm), y una anomalía de esfuerzo de viento zonal de $3.2 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$ para Kelvin (multiplicado por $1.6 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}$) y $4 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$ para Rossby modo 1

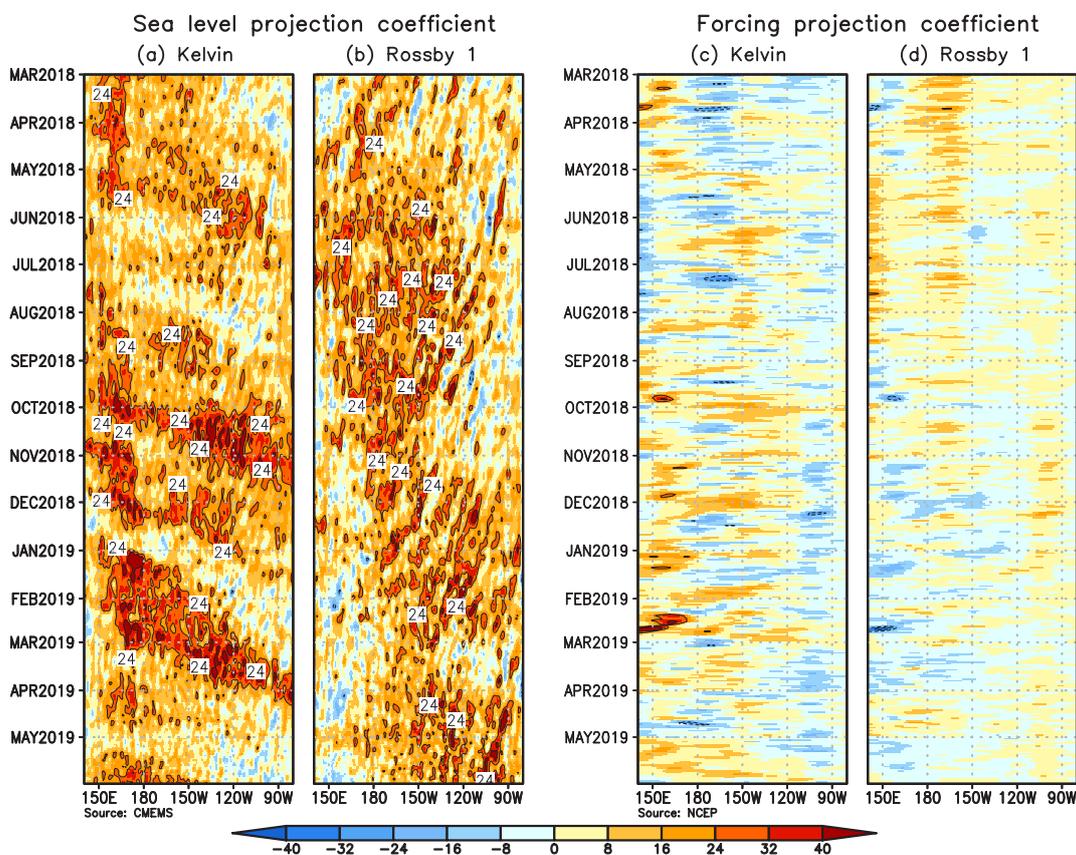


Figura 2. Diagramas longitud-tiempo de los coeficientes de proyección sobre las estructuras de Kelvin (a y c) y Rossby modo 1 (b y d) para el del nivel del mar y forzante zonal.

(multiplicado por $-2 \times 10^{-2} Nm^{-2}$). Además, los coeficientes de los forzantes guardan una relación inversa casi perfecta que va acorde a la teoría lineal de ondas: un pulso de viento que fuerza una onda Kelvin cálida genera, a su vez, una onda Rossby fría.

Durante todo el periodo de estudio se observó una gran actividad de ondas Kelvin y Rossby que guardan relación, en gran parte, con los coeficientes forzantes. Las ondas Kelvin presentaron periodos de actividad intensos que concuerdan con el evento El Niño ocurrido en el Pacífico central desde octubre del 2018 hasta mayo del 2019. En el caso de las ondas Rossby, su actividad fue constante debido a la persistencia de forzantes positivos en el extremo oriental del Pacífico.

A mediados de setiembre del 2018, una serie de anomalías positivas del esfuerzo zonal a lo largo del Pacífico Ecuatorial forzaron la propagación de un tren de ondas Kelvin cálidas, evidenciado un máximo en el coeficiente del forzante Kelvin aproximadamente en $160^\circ E$. Pese a que el máximo ocurrió en el extremo occidental, las ondas generadas al oeste de $160^\circ W$ verían su intensidad reducida por una onda Kelvin fría forzada por una proyección negativa de los forzantes, logrando que solo parte del tren cálido llegue a la costa de Sudamérica. De la misma forma, en enero del 2019 otro frente de ondas cálidas se formó al oeste de la línea de cambio de fecha, el cual continuó hasta inicios de marzo. De manera interesante, los forzantes en el extremo occidental solo mostraron actividad asociado a Kelvin a inicios de enero y a finales de febrero, más no en el periodo intermedio, lo cual indicaría la presencia de otro mecanismo en la generación de estas ondas. Coincidentemente, unas ondas Rossby frías generadas a mediados de enero, como respuesta de las Kelvin cálidas forzadas, arribaron durante este periodo, pudiendo haberse reflejado como ondas Kelvin cálidas.

COMENTARIOS

El método de descomposición realizado en BM95 otorga una forma clara de segregar las señales de ondas oceánicas tanto en el nivel del mar como en el esfuerzo del viento, permitiéndonos discernir la participación de las ondas oceánicas forzadas, en sus diferentes modos meridionales, sobre los episodios de calentamiento en el océano Pacífico.

Este trabajo formará parte de las acciones constantes de monitoreo realizadas por el IGP (disponibles en su web de monitoreo Altimetría Satelital), sirviendo de insumo a futuros análisis sobre la dinámica ecuatorial.

Cabe mencionar que el análisis se hizo sobre datos de anomalía sin aplicar algún filtro a lo largo del tiempo, a diferencia de lo realizado por Cravatte et.al (2004) y Boulanger (2003) para las ondas interestacionales e interanuales, respectivamente. Ese tipo de análisis, junto

a la estimación de los coeficientes de reflexión, formarían parte de los próximos avances de investigación

REFERENCIAS

Aparco, J., Pareja, D., Mosquera, K., 2015. Proyección de las anomalías del nivel del mar sobre las ondas oceánicas ecuatoriales largas. Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño" 2, 9–10.

Boulanger, J.-P., 2003. Reflected and locally wind-forced interannual equatorial Kelvin waves in the western Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* 108. <https://doi.org/10.1029/2002JC001760>

Boulanger, J.-P., Menkes, C., 1995. Propagation and reflection of long equatorial waves in the Pacific Ocean during the 1992–1993 El Niño. *Journal of Geophysical Research* 100, 25041. <https://doi.org/10.1029/95JC02956>

Cai, W., Wang, G., Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., Takahashi, K., Yang, Y., Carreric, A., McPhaden, M.J., 2018. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature* 564, 201–206. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0776-9>

Cravatte, S., Boulanger, J.-P., Picaut, J., 2004. Reflection of intraseasonal equatorial Rossby waves at the western boundary of the Pacific Ocean: INTRASEASONAL EQUATORIAL ROSSBY WAVES. *Geophysical Research Letters* 31, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2004GL019679>

Mosquera, K., Pareja, D., Takahashi, K., 2014. Altimetría Satelital para el monitoreo de la onda Kelvin ecuatorial en el Océano Pacífico. Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú 1, 8–9.

Neske, S., McGregor, S., 2018. Understanding the Warm Water Volume Precursor of ENSO Events and its Interdecadal Variation. *Geophysical Research Letters* 45, 1577–1585. <https://doi.org/10/gc6qzc>

Zhang, W., Li, S., Jin, F., Xie, R., Liu, C., Stuecker, M.F., Xue, A., 2019. ENSO Regime Changes Responsible for Decadal Phase Relationship Variations Between ENSO Sea Surface Temperature and Warm Water Volume. *Geophysical Research Letters* 46, 7546–7553. <https://doi.org/10.1029/2019GL082943>