

Modelo numérico tridimensional de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial

Jeancarlo Fajardo, Lic.¹; Kobi Mosquera, Dr.¹; Ken Takahashi, Ph.D.¹
¹Instituto Geofísico del Perú

Introducción

El estudio de la onda Kelvin ha tomado importancia a nivel nacional en los últimos años debido a los efectos que esta produce al impactar en las costas peruanas (Mosquera et al., 2013). Si bien existen dos tipos de onda Kelvin que siempre viajan hacia el este en el Pacífico Ecuatorial, es la onda Kelvin de hundimiento, la que se propaga a lo largo de la costa peruana y que en ocasiones produce calentamiento anómalo que conlleva a precipitaciones extremas, daños materiales con cuantiosas pérdidas económicas, e impactos negativos en el recurso pesquero (Bertland et al., 2008; Mosquera, 2014). Comprender los procesos físicos que afectan este tipo de ondas a lo largo de su trayectoria en la región ecuatorial, es fundamental para contar con un mejor pronóstico de su impacto en la costa peruana. Esto ha motivado a la realización de la presente investigación, en la cual se va a estudiar, mediante un modelo numérico tridimensional, la evolución de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial.

Para tal propósito se ha empleado el modelo numérico POM (*Princeton Ocean Model*; Mellor, 2004), el cual es un modelo oceánico y de libre acceso, que se emplea frecuentemente para simular y predecir corrientes oceánicas, así como la temperatura, salinidad y densidad del agua. Dentro de sus principales características podemos citar:

- Es un modelo en coordenadas sigma (σ), en el cual la coordenada vertical varía desde 0 (en la superficie) hasta -1 (en el fondo). Esto disminuye considerablemente el número de niveles a emplear por el modelo, a diferencia de aquellos basados en coordenadas "z".
- En el plano horizontal se emplea un sistema coordenado curvilíneo ortogonal a partir del cual, como caso particular, se obtiene el sistema de coordenadas rectangulares.
- El modelo emplea un grillado tipo Arakawa C, tanto en el plano horizontal como en el eje vertical.
- El modelo está basado en la técnica de diferencias finitas, donde se emplea el esquema de *leap-frog* para la integración numérica y un filtro Asselin (Asselin, 1972) para remover el modo computacional numérico asociado al mismo.

Asimismo, la integración temporal es explícita en el plano horizontal e implícita en el eje vertical. Esto último permite emplear intervalos de tiempo mayores y una resolución más fina en la superficie y el fondo.

- El modelo es de superficie libre y de paso de tiempo distinto. El modo externo es bidimensional y emplea un intervalo de tiempo computacional más pequeño limitado por la condición de estabilidad CFL (Courant-Friedrichs-Lewy; Durrant, 1999). El modo interno es tridimensional y utiliza un intervalo de tiempo mayor basado en la condición CFL y la velocidad de propagación para ondas internas.
- El modelo POM contiene un submodelo turbulento de cerradura que permite calcular los coeficientes verticales de mezcla.

Resultados Preliminares

Como primer paso para entender la evolución de la onda Kelvin a lo largo del Pacífico Ecuatorial, se ha corrido el modelo oceánico POM, con los parámetros que emplea este por defecto. El dominio de simulación se muestra en la Figura 1a, donde se estableció una línea de costa recta en los extremos este y oeste y fronteras abiertas en los extremos norte y sur. Como condición inicial se asumió flujo en reposo y una densidad que presenta pycnoclina en los primeros metros (Figura 1b). Se utilizó como único forzante un pulso de viento del oeste (Figura 1a), el cual estuvo activo tan solo durante los primeros quince días de simulación. Por otro lado, se asumió en todo el dominio profundidad constante de 3 km (con 31 niveles verticales), y se escogió un espaciamiento horizontal (temporal) de 0.5° (1 h).

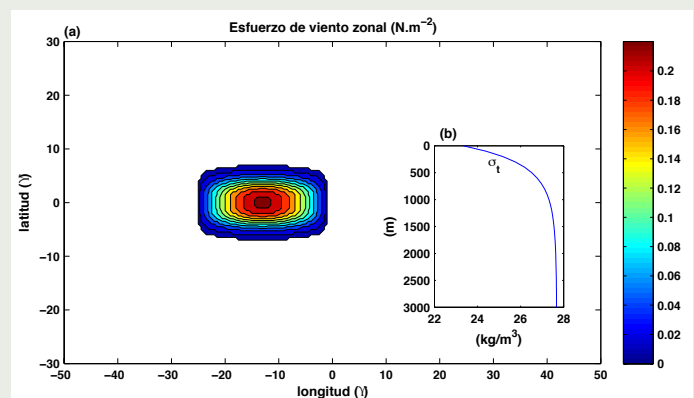


Figura 1. (a) Distribución espacial del esfuerzo de viento zonal (Nm^{-2}) en el dominio de simulación; (b) diagrama densidad potencial en función de la profundidad.

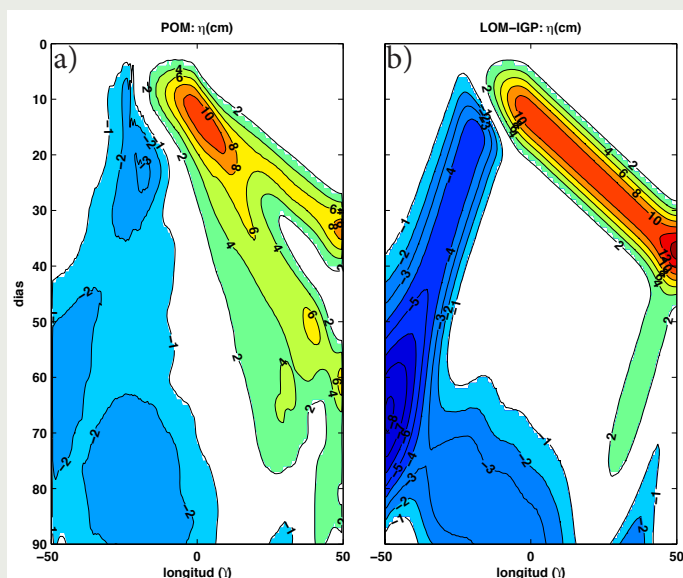


Figura 2. Diagrama longitud-tiempo del nivel del mar a lo largo de la línea ecuatorial, filtrado para periodos menores a 10 días. (a) Modelo oceánico POM y (b) modelo basado en las ecuaciones del LOM-IGP para termoclina constante.

Al nivel del mar simulado con el modelo POM se le aplicó un filtro pasa bajo, con la finalidad de eliminar señales de alta frecuencia que presenten periodos menores a 10 días. Los resultados muestran la presencia de dos ondas Kelvin de hundimiento con velocidades de propagación típicas del primer y segundo modo baroclínico, mientras que la señal de la onda Rossby es difusa ya que aparentemente presenta señales mezcladas de su primer modo baroclínico (Figura 2a). Estos resultados son comparables a una simulación corrida con el modelo de un modo baroclínico y de termoclina constante desarrollado por Mosquera (2009), el cual se emplea como insumo en los informes técnicos del comité multisectorial ENFEN (Figura 2b). No obstante, el modelo POM permite representar procesos de dispersión modal de ondas y la propagación de energía en la dirección vertical. Esto último se puede observar en la Figura 3, en la cual se ha representado la velocidad zonal en función de la profundidad a lo largo de la línea ecuatorial. Para el día 14 la onda se encuentra confinada entre los -25° y $+25^\circ$ de longitud y por encima de los 500 m de profundidad, con una estructura que presenta en general velocidades zonales positivas superiores a los 100 cm/s por encima de los 100 m de profundidad y con un núcleo de hasta 170 cm/s en los primeros metros, mientras que por debajo de estas capas las velocidades son negativas y de hasta -10 cm/s. Asimismo, se observa en esta figura que parte del núcleo positivo se desprende y se profundiza hasta los 250 m con velocidad del orden de +10 cm/s. A medida que pasan los días esta estructura vertical se propaga hacia el este (oeste) y hacia el fondo, lo cual es característico de la onda Kelvin (Rossby) tridimensional (McCreary, 1984; Rothstein et al., 1985). Al comparar estos resultados con la propagación del nivel del mar (Figura 2), se observa que la primera (segunda) onda Kelvin que arriba al extremo oriental alrededor del día 30 (60), transporta menor (mayor) energía en subsuperficie. Esto implica que, según el modelo, la señal más intensa de la onda a nivel sub-superficial está retrasada con respecto a la llegada de la primera onda Kelvin en superficie. En consecuencia, esta

onda es más lenta y parece propagarse con velocidad típica del segundo modo baroclínico.

Cabe señalar que aún se continúa implementando un modelo lineal 3D, el cual permitirá explicar en forma más sencilla los procesos físicos dominantes en este tipo de fenómenos.

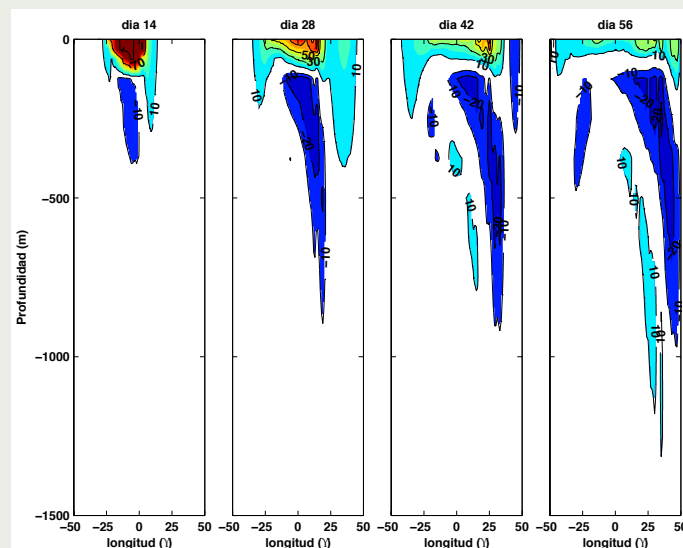


Figura 3. Diagrama longitud-profundidad para la velocidad zonal (cm/s) a largo de la línea ecuatorial para los días 14, 28, 42 y 56 de iniciada la corrida del modelo POM

Referencias

- Asselin, R., 1972: Frequency filter for time integration, *Monthly Weather Review*, 100(6), 487-490.
- Bertrand, S., B. Dewitte, J. Tam, A. Bertrand, and E. Diaz, 2008: Impact of Kelvin wave forcing in the Peru Humboldt Current system: Scenarios of spatial reorganization from physics to fishers, *Progress in Oceanography*, 79, 278-289.
- Durrant, D. R., 1999: *Numerical Methods for Fluid Dynamics with Applications to Geophysics*. (2a ed.), Nueva York: Springer.
- McCreary, J., 1984: Equatorial beams, *Journal of Marine Research*, Vol. 42.
- Mellor, G. L., 2004: *User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi, and G. Garric, 2013: The 2002-03 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 346-357, doi:10.1029/2012JC008551
- Mosquera, K., 2014: Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Vol. 1, N°1, Enero, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Rothstein, L. M., D. W. Moore, and J. McCreary, 1985: Interior Reflections of a Periodically Forced Equatorial Kelvin Wave, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 15.