

Artículo de Divulgación Científica

Procesos claves para el modelado de los impactos de los eventos El Niño en la zona costera de Perú

Introducción

El Fenómeno El Niño produce cambios importantes en el clima, la circulación oceánica y las condiciones hidrográficas a lo largo de la costa peruana. Estas modificaciones pueden generar consecuencias significativas sobre el funcionamiento del ecosistema marino costero del Perú (Barber and Chavez, 1983), uno de los más productivos del mundo. A fin de entender mejor el impacto de El Niño sobre este ecosistema, es indispensable describir y conocer más los procesos por los cuales la circulación y el afloramiento costeros son afectados. Considerando las dificultades que existen para obtener observaciones oceánicas sinópticas en toda una región de estudio, el modelado numérico se convierte en una herramienta pertinente. Los modelos climáticos globales (GCMs, por su sigla en inglés) que permiten, por ejemplo, describir la circulación a escala de la cuenca del océano Pacífico, presentan generalmente errores importantes en las zonas costeras (particularmente en las regiones de afloramiento del borde oriental de los océanos), por lo que no son adecuados para estudios regionales. Estos errores se deben, en parte, a la resolución horizontal de los GCMs (~ 25 a 200 km), lo que es insuficiente para reproducir las corrientes costeras, la surgencia y la turbulencia oceánica, procesos que tienen un rol fundamental en el funcionamiento del ecosistema marino (producción de plancton, dispersión de larvas, etc.). Por otro lado, el modelado climático regional (MCR) permite realizar el «*downscaling*» dinámico de eventos climáticos de gran escala, como El Niño o escenarios de cambio climático. La resolución espacial de los MCRs (~1 a 10 km) permite resolver y estudiar procesos dinámicos de menor escala como, por ejemplo, los frentes y los filamentos de agua fría asociados a la surgencia costera. Esta estrategia de *downscaling* dinámico es muy adecuada para estudiar el impacto de El Niño sobre la franja costera del Perú, sin embargo presenta fuertes limitaciones debido a la calidad



François Colas, Dr.
Investigador Científico del
IRD/LMI DISCOH

Doctor en Oceanografía Física de la Université de Bretagne Occidentale de Brest, Francia. Actualmente es investigador en oceanografía física en el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia y director del Laboratorio Mixto Internacional DISCOH (dinámica del sistema de corriente de Humboldt; IMARPE/IRD). Experto en modelación numérica del océano, sus investigaciones se enfocan principalmente en el estudio de la circulación regional y los procesos dinámicos en los sistemas de afloramiento costera del borde oriental (Perú-Chile, California, Canarias/Senegal). En particular, su interés reside en el estudio del impacto de la turbulencia de meso y submeso-escala sobre el funcionamiento del sistema regional y en los procesos acoplados océano/atmósfera.

de las señales oceánicas de gran escala y a los forzantes atmosféricos locales que se imponen al modelo regional. En este artículo se discute estos aspectos y algunas perspectivas, presentando ejemplos de *downscaling* dinámico de eventos El Niño (1997-98 y 2015).

Forzante oceánico de gran escala: un GCM adecuado

Los modelos oceánicos regionales necesitan información a lo largo de todas sus fronteras abiertas, es decir, aquellas que no limitan con los continentes. Esta información contiene las señales de gran escala que deben ser transmitidas al dominio regional y se puede obtener ya sea a partir de observaciones climatológicas (en este caso contienen solamente el ciclo estacional), o a partir de GCMs. Es fundamental que el GCM usado como fuente de información para la región del Perú pueda reproducir correctamente la circulación general, la estructura promedio de la termoclina en el Pacífico Ecuatorial y su variabilidad a varios rangos de escalas temporales, como las oscilaciones intraestacionales (ondas de Kelvin ecuatoriales). Estas oscilaciones se propagan hacia el este del Pacífico a lo largo del ecuador y son particularmente intensas durante

Procesos claves para el modelado de los impactos de los eventos El Niño en la zona costera de Perú

Colas F., Echevin V.

Vincent Echevin, Dr.
Investigador Científico del
IRD/ LOCEAN



Doctor en Oceanografía Física de la Université Paul Sabatier de Toulouse, Francia, e Ingeniero de la Escuela Politécnica de Francia. Actualmente es investigador científico en el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia y en el Laboratorio LOCEAN de la Université Pierre y Marie Curie de Paris, donde lidera el equipo científico encargado de realizar estudios sobre temas de oceanografía física, bioquímica y biológica con un enfoque en los procesos de mesoescala (10-100km) y sub-mesoescala (1-10 km). Recientemente su investigación está enfocada en entender los procesos claves de acoplamiento entre la física y la bioquímica en el océano a lo largo de la costa, a escalas de tiempo tanto semanales como decadales, en el Pacífico Sureste.

primaria asociadas al afloramiento (Belmadani et al., 2012; Echevin et al., 2013). Durante El Niño, estas señales producen anomalías muy fuertes en superficie con un incremento del nivel del mar y de la temperatura a lo largo de la costa y una profundización de la termoclina (Fig. 2) y de la nutriclina en subsuperficie. Esta profundización provoca una reducción importante de la producción primaria.

Es también muy importante que el GCM pueda reproducir aproximadamente bien la circulación promedio de gran escala del Pacífico Ecuatorial para que las conexiones entre las corrientes ecuatoriales zonales y el sistema de corrientes costeras sean realistas en el modelo regional. Las corrientes zonales subsuperficiales (EUC al ecuador, pSSCC a $\sim 4^{\circ}\text{S}$, sSSCC a $\sim 7^{\circ}\text{S}$) transportan una parte importante del agua que entra en la zona costera y alimentan la Corriente Subsuperficial hacia el Polo (PCUC; Montes et al., 2010). La dinámica de la PCUC es un elemento clave de la circulación regional, ya que las conexiones entre estas corrientes soportan variaciones notables durante El Niño (Montes et al., 2011). Además, durante estos eventos, la acumulación de agua caliente en la zona ecuatorial produce un gradiente norte-sur del nivel del mar, frente a la costa peruana, que genera una

eventos El Niño. Una vez transmitidas en el dominio del modelo regional, llegan a las costas suramericanas y propagan su señal en el nivel del mar a lo largo de la costa hacia los polos (Fig. 1). Estas ondas costeras intraestacionales pueden influir sobre la dinámica y la producción

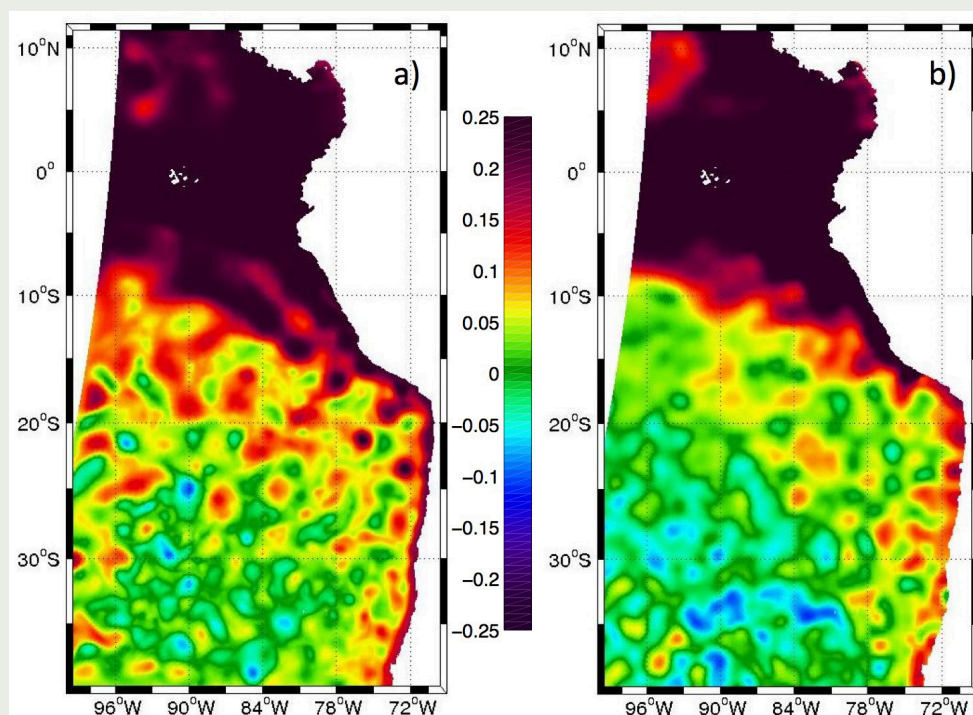
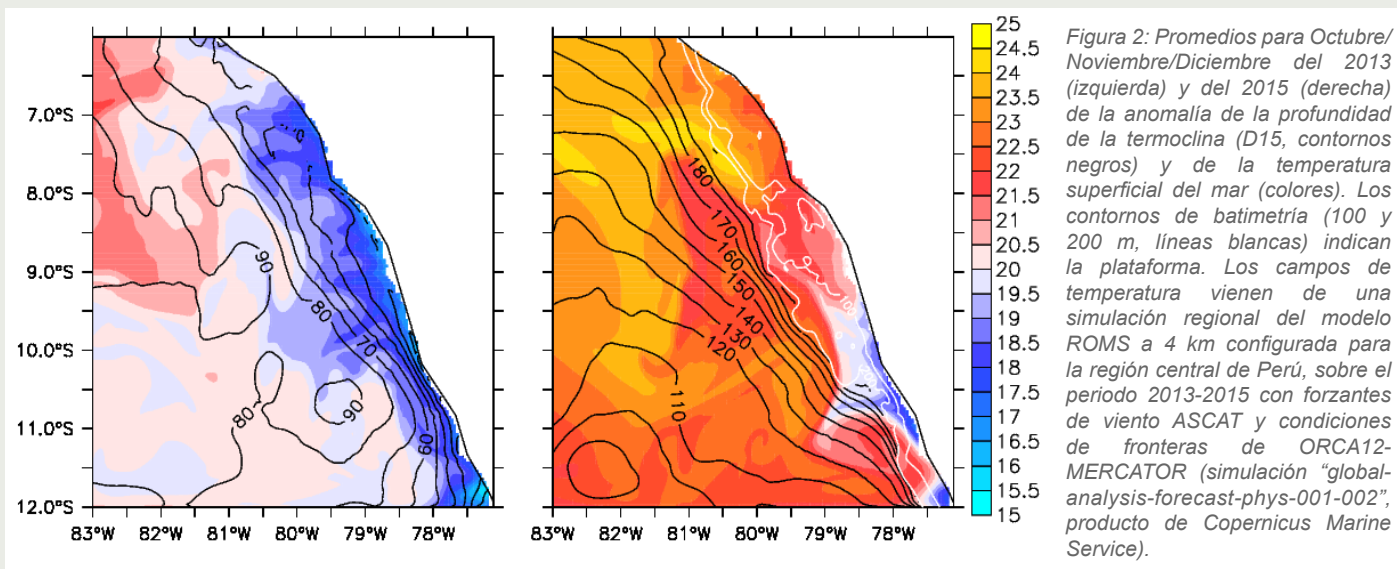


Figura 1: Anomalía del nivel del mar para el mes de diciembre 1997: (a) datos de altimetría (AVISO-DUACS) y (b) simulación del modelo oceánico regional ROMS configurado para todo el sistema de Humboldt (resolución espacial 7.5 km; Colas et al., 2008).



corriente geostrófica hacia la costa en las capas de superficie. Esta corriente geostrófica se opone al transporte de Ekman hacia mar afuera y modula la intensidad de la surgencia costera (Colas et al., 2008). En el caso de El Niño 1997-1998, este flujo geostrófico ha sido intenso durante algunos meses.

Forzante atmosférico: el rol clave del viento regional sobre el impacto costero de un evento El Niño

El viento es un elemento clave del sistema porque es el forzante de la surgencia y del sistema de corrientes costeras. La calidad del forzante atmosférico es un problema recurrente para los modelos oceánicos regionales, tanto bajo condiciones de tipo El Niño como bajo condiciones climáticas normales, porque su estructura costera no es bien conocida.

Aunque las mediciones satelitales han permitido muchos progresos en el conocimiento de los vientos sobre la superficie desde hace unos 20 años, las observaciones entre la costa y ~ 50 km mar afuera son muy pocas, ya que en esta franja dichas mediciones son contaminadas por la presencia del continente. Los modelos atmosféricos de gran escala presentan limitaciones, de igual manera que los GCMs oceánicos ya que en las zonas costera no tienen una resolución horizontal suficiente (> 50 km) para representar correctamente la estructura del viento, la cual se caracteriza generalmente por

un debilitamiento de la intensidad en una franja costera de ~ 50 - 100 km («wind drop-off»). Este *drop-off* es debido a una combinación de efectos de la topografía del continente y de la temperatura superficial del mar (Boe et al., 2011; Renault et al., 2015). La resolución espacial de los GCMs atmosféricos no permite resolver con precisión la topografía de los Andes y las estructuras térmicas de superficie del mar asociadas al afloramiento costero. Una estrategia prometedora, la cual permite evitar estas limitaciones debidas a la resolución espacial, es usar modelos regionales acoplados océano-atmósfera a alta resolución horizontal (Oerder et al., 2016).

El desconocimiento del viento costero es particularmente problemático durante El Niño. De hecho, dos efectos antagónicos ocurren en la zona costera: por un lado, la termoclina se profundiza y el agua de superficie es más caliente como consecuencia de la anomalía de gran escala y la acción de las ondas costeras («ondas de *downwelling*»); por el otro lado, la presencia de agua más caliente genera una intensificación del viento costero (Quijano, 2011; Fig. 3) la cual produce un incremento del afloramiento costero. Estos dos procesos interactúan y ambos tienen una influencia importante sobre la respuesta oceánica (Fig. 4): la intensificación del viento (forzante local) permite atenuar el efecto de la profundización de la termoclina (forzante de gran escala). Frente a esto el modelado regional a menor escala, que utiliza el acoplamiento océano- atmósfera, se

Procesos claves para el modelado de los impactos de los eventos El Niño en la zona costera de Perú

Colas F., Echevin V.

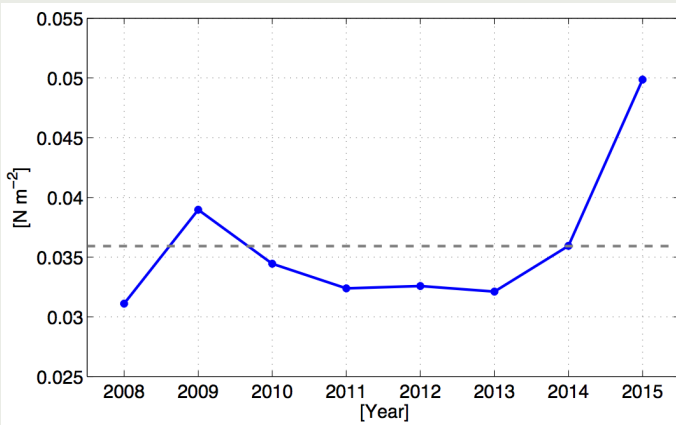


Figura 3: Serie de tiempo del promedio de la anomalía de viento ASCAT para Octubre/Noviembre/Diciembre (OND) del 2008 al 2015 para la zona costera de Perú (de 7°S a 13°S, de la costa a ~100km mar afuera). La anomalía del viento durante el evento El Niño (OND 2015) es muy evidente.

hace indispensable como una herramienta para reproducir el impacto de un evento El Niño sobre la región costera.

Forzante biogeoquímico: hacia el uso de GCMs

Modelar el impacto de El Niño sobre el ambiente biogeoquímico costero representa un desafío esencial. Durante los eventos extraordinarios de 1982-1983 y 1997-1998, la concentración de nutrientes en las aguas costeras disminuyó ampliamente (Barber and Chavez, 1983). Esto resultó en una disminución fuerte de la producción primaria y modificaciones mayores en toda la cadena trófica, desde el plancton hasta los depredadores superiores. La inclusión de estos

procesos biogeoquímicos en modelos regionales del sistema peruano es relativamente reciente (Echevin et al., 2008; 2013; Montes et al., 2014) y su realismo presenta varias limitaciones. La insuficiencia de observaciones biogeoquímicas *in situ* no permite obtener campos tridimensionales de nutrientes y de oxígeno que describan las variaciones intraestacionales e interanuales que podrían forzar las fronteras abiertas de los modelos regionales. Hasta ahora, se han usado climatologías en la mayor parte de los estudios de modelado regional, sin representar en los forzantes las variaciones fuertes asociadas a los eventos El Niño. Una alternativa podría consistir en el uso de GCMs con componentes biogeoquímicos (Aumont and Bopp, 2006). Además de una baja resolución espacial (~ 100 - 200 km), estos modelos presentan generalmente errores importantes en sus representaciones de las concentraciones de nutrientes y oxígeno en la región del Pacífico Sur-Este. Por lo tanto, avances en el modelado global de los procesos biogeoquímicos, particularmente en el Pacífico Ecuatorial, son indispensables para mejorar el modelado del impacto de eventos El Niño sobre el ecosistema costero peruano.

Conclusión

El modelado regional de los impactos oceánicos de un evento El Niño requiere varios ingredientes indispensables a cualquier estudio regional de *downscaling* dinámico: forzantes oceánicos de gran escala y forzantes atmosféricos locales (particularmente el viento en la región de

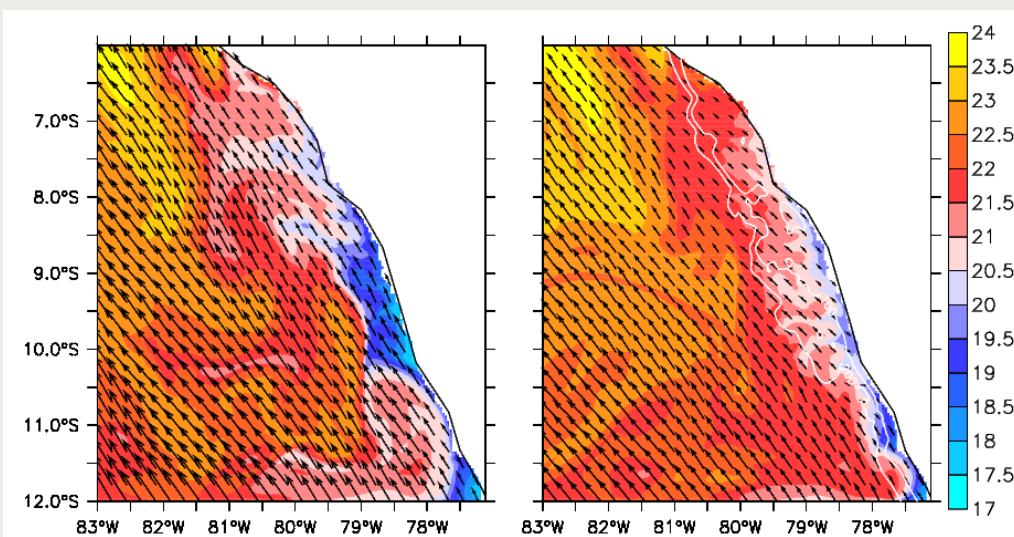


Figura 4: Impacto de la intensificación del viento costero (flecha, $N.m^{-2}$) sobre la TSM (color, °C) durante El Niño para el mes de diciembre 2015. Se realizaron dos simulaciones del modelo ROMS (configurado a 4 km de resolución para la región central de Perú), ambas con forzantes de fronteras de ORCA12-MERCATOR pero con forzante de viento diferente: (izquierda) viento ASCAT sinóptico, (derecha) climatología de viento ASCAT para el periodo 2007-2012. La intensificación local del viento durante El Niño limita el efecto de calentamiento debido a la señal de gran escala.

afloramiento costero de Perú) con un muy buen nivel de realismo. La combinación de estos efectos, generalmente antagónicos durante El Niño, introduce sutilezas en la respuesta oceánica de la región costera, la cual varía según los diferentes tipos de El Niño que se producen (Dewitte et al., 2012; Takahashi and Dewitte, 2015). Por lo tanto, las perspectivas de mejorar el modelado regional de El Niño están estrechamente relacionadas a los progresos futuros de todas las componentes de los GCMs (oceánica, atmosférica y biogeoquímica). Además, ya que parece necesario tomar en cuenta las retroacciones entre océano y atmósfera en la región costera (los procesos relacionados a la intensificación del viento durante El Niño), el uso de modelos regionales acoplados océano-atmósfera representa una perspectiva evidente y muy prometedora. Para poder estudiar de manera completa el impacto de El Niño sobre el mar peruano, es esencial que el modelo oceánico regional pueda alcanzar una alta resolución horizontal (~1 km). Este tipo de resolución permite resolver los procesos pertinentes para el ecosistema y varias aplicaciones sociales. Para eso, una estrategia de modelado eficiente consiste en *anidar* diferentes dominios realizando un *downscaling* paso a paso desde un dominio de extensión espacial amplia a baja resolución horizontal hasta dominios de extensión limitada a alta resolución (Fig. 5). Este tipo de estudio no ha sido usado mucho todavía para estudiar los impactos de El Niño y debería ser más desarrollado en el futuro. Estas herramientas deberían ser aplicadas a diferentes situaciones

correspondientes a distintos tipos de eventos El Niño para entender mejor y tener un conocimiento completo de los impactos sobre el mar peruano.

Referencias

Aumont, O., and L. Bopp, 2006: Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB2017, doi: 10.1029/2005GB002591.

Barber, R. T., and F. P. Chavez, 1983: *Biological Consequences of El Niño*, Science, Vol. 222, No. 4629, 1203-1210.

Belmadani, A., V. Echevin, B. Dewitte, and F. Colas, 2012: Equatorially-forced intraseasonal propagations along the Peru-Chile coast and their relation with the nearshore eddy activity in 1992-2000: A modelling study, *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/2011JC007848.

Boe, J., A. Hall, F. Colas, J. C. McWilliams, X. Qu, J. Kurian, and S. Kapnick, 2011: What shapes mesoscale wind anomalies in coastal upwelling zones?, *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2037-2049.

Colas, F., X. Capet, J. C. McWilliams, and A. F. Schepetkin, 2008: 97-98 El Niño off Peru: a Numerical Approach, *Progress in Oceanography*, 79, 138-155.

Dewitte, B., J. Vazquez-Cuervo, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, D. Gutierrez, A. Sifeddine, and 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 Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77, 143-156.

Echevin V., O. Aumont, and J. Ledesma, 2008: The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peru upwelling system: a modelling study, *Progress in Oceanography*, 2008, 79 (special issue 2-4), 167-176, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.026>.

Echevin, V., A. Albert, M. Lévy, O. Aumont, M. Graco, and G. Garric, 2013: Remotely-forced intraseasonal variability of the Northern Humboldt Current System surface chlorophyll using a coupled physical-ecosystem model, *Continental Shelf Research*, doi: 10.1016/j.csr.2013.11.015.

Montes, I., F. Colas, X. Capet, and W. Schneider, 2010: On the pathways of the Equatorial Subsurface Currents in the Eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent, *Journal of Geophysical Research*, 115 (C09003), doi: 10.1029/2009JC005710.

Montes, I., W. Schneider, F. Colas, B. Blanke, and V. Echevin, 2011: Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999-2001 and El Niño 2002-2003, *Journal of Geophysical Research*, 116, C12022, doi: 10.1029/2011JC007624.

Montes, I., B. Dewitte, E. Gutknecht, A. Paulmier, I. Dadou, A. Oschlies, and V. Garçon, 2014: High-resolution on modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 119, 5515-5532, doi: 10.1002/2014JC009858.

Oerder, V., F. Colas, V. Echevin, S. Masson, C. Hourdin, S. Jullien, G. Madec, F. Lemarié, 2016: Mesoscale SST-wind stress coupling in the Peru-Chile current system: Which mechanisms drive its seasonal variability?, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-015-2965-7.

Quijano, J., 2011: Simulación de la dinámica del viento superficial sobre la costa de Ica utilizando el modelo numérico de la atmósfera de mesoescala MM5, Tesis para optar título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

Renault, L., A. Hall, and J. C. McWilliams, 2015: Orographic shaping of US West Coast wind profiles during the upwelling season, *Climate Dynamics*, 1-17.

Takahashi, K., and Dewitte, B., 2015: Strong and moderate nonlinear El Niño regimes, *Climate Dynamics*, 1-19.

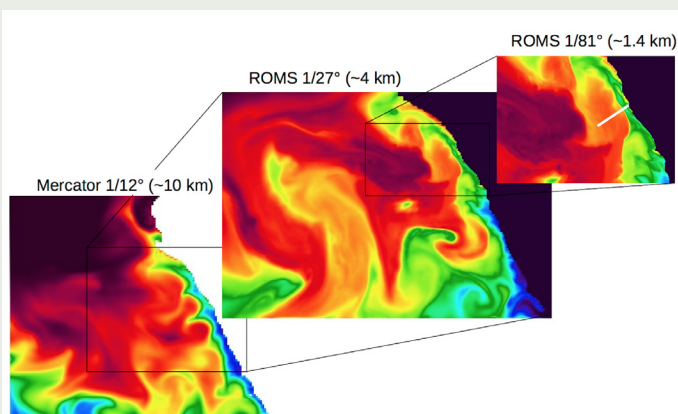


Figure 5: Temperatura superficial del mar para el 25/12/2015, simulada por tres dominios anidados: (izquierda) el modelo ORCA12-MERCATOR. Este modelo sirve de forzante para los dominios ROMS anidados (centro y derecha) a 4 km y 1.4 km de resolución. El color azul indica 20°C y el rojo 26°C.