

Los remolinos oceánicos y la Zona de Mínima de Oxígeno

Los océanos tienen propiedades físicas, químicas y biológicas heterogéneas debido a una circulación compleja caracterizada por una diversidad de fenómenos a distintas escalas de variabilidad espacial y temporal. Si nos referimos a las propiedades físicas, las características más resaltantes del océano son las estructuras de circulación circulares, denominadas remolinos o vórtices, que se pueden observar como núcleos de mayor o menor nivel del mar (Chaigneau et al., 2009; Chelton et al., 2011; Figura 1) y por su efecto en la temperatura superficial del mar (Chelton and Xie, 2010); además están presentes también debajo de la superficie (Hormazabal et al., 2013; Combes et al., 2015). Estos remolinos oceánicos forman parte de la variabilidad de “mesoescala” del océano y, además, son los responsables de que al océano se le identifique y denomine como un sistema turbulento; ello debido a que, dependiendo de su localización, los remolinos pueden ser muy energéticos, tener un tiempo de vida considerable (que va de días a meses), ocupar varios kilómetros (del orden de 1 km a 200 km) y desplazarse a grandes distancias, influenciando así el medio que los rodea (e.g., Biastoch et al., 2008; Stramma et al., 2013).

Dichas estructuras han sido estudiadas durante los últimos treinta años a través del análisis de la altura superficial del mar mediante datos satelitales (Figura 1), lo cual permite la identificación de los campos de remolinos de mesoescala en los océanos (Chelton et al., 2011). En los sistemas de bordes Este de los océanos (Humboldt, California, Benguela y Canarias), existe un mecanismo particular de formación de estos remolinos relacionado con la inestabilidad de las corrientes costeras (Capet et al., 2008). Los remolinos son formados cerca de la costa y se propagan hacia el oeste (Chaigneau et al., 2009) transportando las propiedades de las aguas. Particularmente, se ha observado que ellos cargan aguas frías y cálidas alrededor del mundo. Más recientemente, gracias al desarrollo de computadores más



Ivonne Montes, Dra.

Investigadora Científica del Instituto Geofísico del Perú

Doctora en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y Física de la Universidad Nacional del Callao. Actualmente es investigadora científica en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde se desempeña como especialista en Oceanografía en la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera. Es autora de varios artículos científicos y recientemente sus estudios están enfocados en entender el rol de la variabilidad global sobre la circulación oceánica frente a Perú, analizar el rol de la interacción océano - atmósfera a escala regional sobre el clima y comprender el rol del océano sobre el clima del Perú.

Boris Dewitte, Dr.

Investigador Científico del Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

Veronique Garçon, Dra.

Investigadora Científica del Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

robustos y modelos numéricos capaces de resolver la dinámica de mesoescala, se ha podido conocer más detalles sobre sus características. Sin embargo, el entendimiento de su complejo comportamiento aún se presenta como desafío para la comunidad científica.

Las investigaciones científicas, por su parte, sugieren que dichos fenómenos oceánicos juegan un rol más importante de lo pensado en el sistema climático, debido a la influencia que tienen sobre una serie de procesos dinámicos asociados a la atmósfera y el océano (Chelton and Xie, 2010). Por ejemplo, los estudios más recientes señalan que, según la distribución y las características de los remolinos oceánicos, estos pueden modificar la turbulencia en la capa límite atmosférica y localmente afectar el viento cerca de la superficie, las propiedades de las nubes y la lluvia (Frenger et al., 2013). A nivel regional, se sospecha que los remolinos proporcionan el transporte de calor necesario para mantener la superficie oceánica fría por debajo de la cobertura de nubes llamadas estratos desarrollada en las regiones de afloramiento costero (Colas et al.,

Los remolinos oceánicos y la Zona de Mínima de Oxígeno

Montes I., Dewitte B., Garçon V.

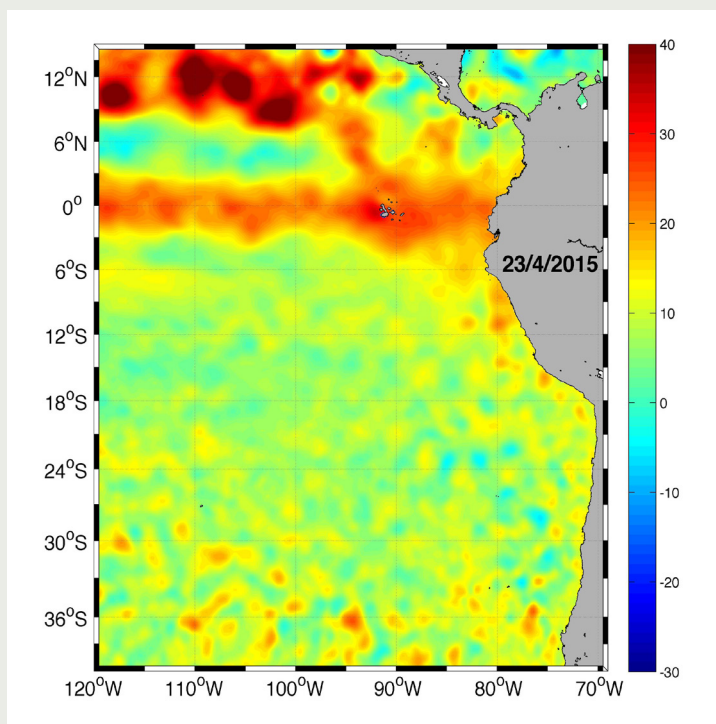


Figura 1. Anomalia del nivel del mar extraída para el 23 de marzo de 2015, derivada de los datos satelitales diarios producidos por SSALTO/DUACS (Segment Sol Multimissions d' Altimétrie, d' Orbitographie et de Localisation Précise/Data Unification and Altimeter Combination System, Ducet et al., 2000). La anomalía del nivel del mar es presentada en colores y en cm.

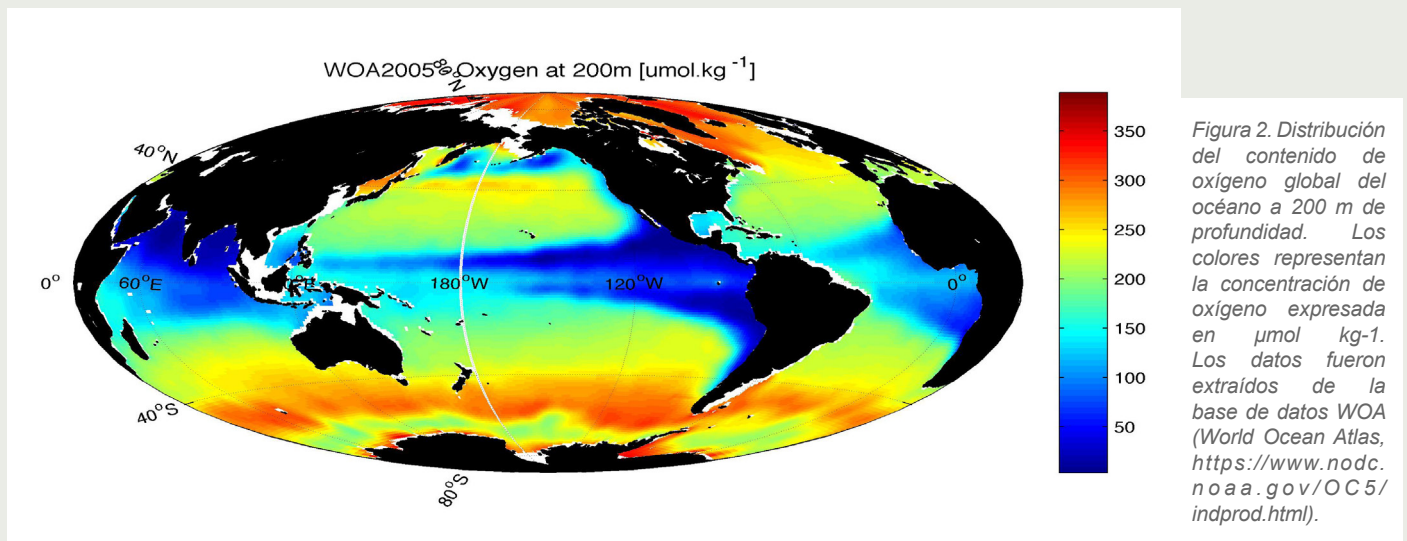
2012). Asimismo, dichos fenómenos oceánicos estarían reduciendo la producción biológica en los Sistemas de Afloramiento de Borde Oriental (i.e., Sistema de Corrientes de Humboldt – Perú/Chile, Sistema de Corrientes de California, Sistema de Corrientes de Benguela) debido al transporte lateral de nutrientes desde la costa hacia mar afuera (Rossi et al., 2008; Gruber et al., 2011) y su efecto dinámico sobre el afloramiento costero en sí mismo (Gruber et al., 2011). Además, estarían contribuyendo con la liberación de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera (Altabet et al., 2012).

Los remolinos y la Zona de Mínima de Oxígeno de Perú

Las Zonas de Mínima de Oxígeno (ZMO) son regiones del océano, generalmente extendidas entre los 50 y 1000 m de profundidad, cuyas aguas son muy pobres en contenido de oxígeno (Figura 2). Actualmente dichas regiones cubren casi el 10% de la superficie de los océanos, por lo que intervienen en los ciclos biogeoquímicos globales (e.g., del carbono, nitrógeno y fósforo) y, en consecuencia, son fuentes de gases de efecto invernadero (e.g., el óxido nitroso). Además, representan una barrera respiratoria para las

especies marinas, siendo así perjudiciales para el desarrollo de la biodiversidad marina y el clima del planeta. Dichas zonas son creadas por el efecto combinado de la circulación lenta y la alta productividad marina que es sostenida por el afloramiento costero; este último es producido por los vientos alisios que soplan hacia el ecuador a lo largo de la costa casi constantemente, provocando el ascenso de agua fría, rica en nutrientes y pobre en oxígeno, hacia la superficie.

Los bordes, límites o fronteras, de la ZMO frente a Perú se caracterizan por tener fuertes gradientes o diferencias en el contenido de oxígeno y, además, por presentar zonas fuertemente turbulentas (Montes et al., 2014). El estudio más reciente que trata de entender el mecanismo responsable de las fluctuaciones de la ZMO y cuantificar el papel de los remolinos oceánicos en el transporte de oxígeno en las fronteras señala que dichos fenómenos oceánicos son responsables de estructurar la ZMO desarrollada frente al Perú, actuando como paredes o barreras que impiden la entrada de oxígeno. La investigación desarrollada por Bettencourt et al. (2015) emplea un modelo numérico regional de alta resolución para el Pacífico Tropical Oriental, capaz de representar la hidrodinámica de la zona de estudio (i.e., circulación



oceánica e hidrografía) y la biogeoquímica del océano. Los datos numéricos provenientes del modelo físico-biogeoquímico del océano (ROMS-BioEBUS) fueron utilizados específicamente para representar la actividad de remolinos en el océano y su efecto en el transporte de oxígeno. Además, un método de análisis estadístico tomado de la teoría de la física del caos, los exponentes de Lyapunov, fue utilizado para diagnosticar la actividad de los remolinos simulados. Dicha investigación fue capaz de mostrar que los remolinos oceánicos localizados hasta aproximadamente los 600 metros de profundidad modulan la difusión de oxígeno a través de las fronteras de la ZMO, manteniendo separadas las aguas ricas de las pobres en oxígeno (Figura 3). Asimismo, reveló que, en ocasiones, los remolinos introducen agua con altas concentraciones de oxígeno manera esporádica y rápida.

Como ha sido mencionado, si bien el desarrollo de modelos numéricos y sistemas de observación más completos ha permitido conocer más detalles de las características y comportamiento de los remolinos oceánicos, aún queda mucho por entender sobre estos fenómenos oceánicos, especialmente sobre su rol. Por ejemplo, las investigaciones señalan que, desde hace 50 años, las ZMO presentan una expansión, la cual podría estar relacionada al cambio climático (Stramma et al., 2008). Sin embargo, se desconocen los mecanismos que

pueden estar controlando la expansión y los efectos de la actividad de mesoescala sobre esta, aún cuando ha sido sugerido que los efectos de los remolinos oceánicos frente al cambio climático serán moderadamente pequeños (WPI-IPCC, <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/285.htm>). Por otro lado, a escala interanual, los estudios establecen una relación compleja entre la actividad de mesoescala y el calentamiento desarrollado frente a la costa de América, producido por El Niño. Mientras que la actividad de remolinos tiende a estar reducida en superficie (Chaigneau et al., 2009) y en subsuperficie (Combes et al., 2015) frente a Perú durante eventos extraordinarios (e.g., El Niño 97-98), los trabajos son poco concluyentes con respecto a los otros tipos o variedades de El Niño (e.g., Takahashi et al., 2011). Por lo que, estudios combinados que involucren modelos numéricos de alta resolución que permitan resolver la dinámica de los remolinos y sistemas de observación superficial-subsuperficial son necesarios para el mejor entendimiento.

Vale resaltar que el nuevo programa internacional TPOS2020 (<http://tpos2020.org/>), que trabaja sobre el diseño del futuro sistema de observación en el Pacífico Tropical, planifica integrar mediciones biogeoquímicas en la red existente para poder abordar de manera más cuantitativa preguntas científicas en relación a la ZMO del Pacífico e iniciar un monitoreo a largo plazo.

Los remolinos oceánicos y la Zona de Mínima de Oxígeno

Montes I., Dewitte B., Garçon V.

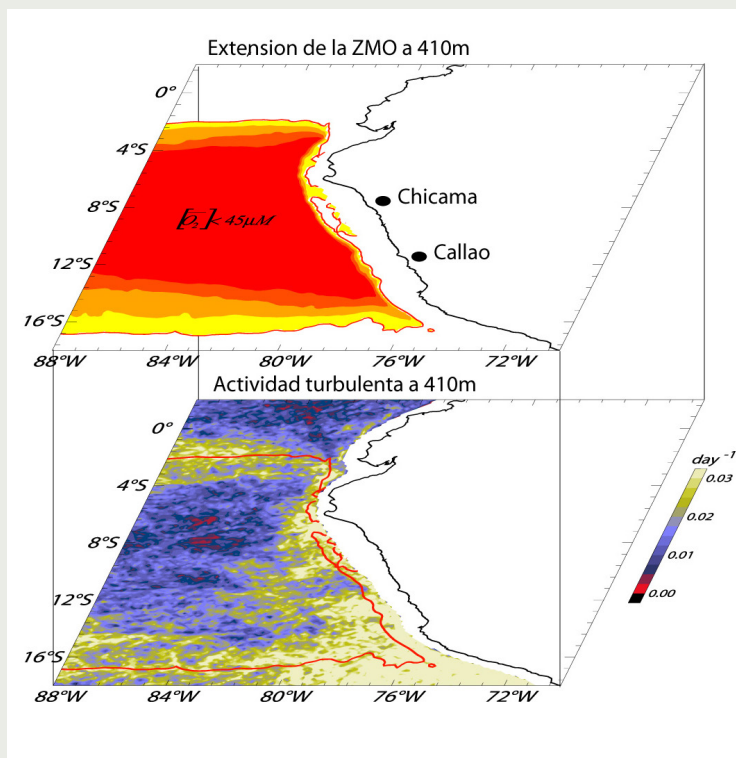


Figura 3. (Superior) Distribución de la Zona de Mínima de Oxígeno frente al Perú a 400 m de profundidad simulada por un modelo regional de alta resolución, considerada con valores menores a $45 \mu\text{M}$. (Inferior) Distribución de la actividad de remolinos cuyas zonas más turbulentas son resaltadas en color amarillo; la línea roja delimita las fronteras de la ZMO.

Referencias

Altabet, M. A., E. Ryabenko, L. Stramma, D. W. R. Wallace, M. Frank, P. Grasse, and G. Lavik, 2012: An eddy-stimulated hotspot for fixed nitrogen-loss from the Peru oxygen minimum zone, *Biogeosciences*, 9, 4897-4908, doi:10.5194/bg-9-4897-2012, 2012.

Bettencourt, J. H., C. López, E. Hernández-García, I. Montes, J. Sudre, B. Dewitte, A. Paulmier and, V. Garçon, 2015: Boundaries of the Peruvian oxygen minimum zone shaped by coherent mesoscale dynamics, *Nature Geoscience*, 8, 937-940, doi:10.1038/ngeo2570.

Biastoch, A., C. W. Böning, and J. R. E. Lutjeharms, 2008: Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation, *Nature*, 456 (7221), 489-492, doi:10.1038/nature07426.

Capet, X., J. C. McWilliams, M. J. Molemaker, and A. F. Shchepetkin, 2008: Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part I: Flow Structure, Eddy Flux, and Observational Tests, *Journal of Physical Oceanography*, 38, 29-43, doi: http://dx.doi.org/10.1175/2007JPO3671.1

Chaigneau, A., G. Eldin, and B. Dewitte, 2009: Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992-2007), *Progress in Oceanography*, 83, 117-123, doi:10.1016/j.pocean.2009.07.012.

Chelton, D. B., and S.-P. Xie, 2010: Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales, *Oceanography*, 23, 52-69.

Chelton, D. B., M. G. Schlax, and R. M. Samelson, 2011: Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 91, 167-216.

Colas, F., J. C. McWilliams, X. Capet, and J. Kurian, 2012: Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system, *Climate dynamics*, 39 (1-2), 509-529.

Combes, V., S. Hormazabal, and E. Di Lorenzo, 2015: Interannual variability of the subsurface eddy field in the Southeast Pacific, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 4907-4924, doi:10.1002/2014JC010265.

Ducet, N., P. Le Traon, and G. Reverdin, 2000: Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/POSEIDON and ERS-1 and-2, *Journal of Geophysical Research*, 105, 19,477-19,498, doi:10.1029/2000JC900063.

Frenger, I., N. Gruber, R. Knutti, and M. Münnich, 2013: Imprint of southern ocean eddies on winds, clouds and rainfall, *Nature Geoscience*, 6, 608-612.

Gruber, N., Z. Lachkar, H. Frenzel, P. Marchesiello, M. Münnich, J. C. McWilliams, T. Nagai, and G.-K. Plattner, 2011: Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems, *Nature Geoscience*, 4, 787-792, doi:10.1038/ngeo1273.

Hormazabal, S., V. Combes, C. E. Morales, M. A. Correa-Ramirez, E. Di Lorenzo, and S. Nuñez, 2013: Intrathermocline eddies in the Coastal Transition Zone off central Chile (31-41°S), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 1-11.

Montes, I., B. Dewitte, E. Gutknecht, A. Paulmier, I. Dadou, A. Oschlies, and V. Garçon, 2014: High-resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119 (8), 5515-5532.

Rossi, V., C. López, J. Sudre, E. Hernández-García, and V. Garçon, 2008: Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems, *Geophysical Research Letters*, 35, L11602, doi:10.1029/2008GL033610.

Stramma, L., G. C. Johnson, J. Sprintall, and V. Mohrholz, 2008: Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans, *Science*, 320, 655-658.

Stramma, L., H. W. Bange, R. Czeschel, A. Lorenzo, and M. Frank, 2013: On the role of mesoscale eddies for the biological productivity and biogeochemistry in the eastern tropical Pacific Ocean off Peru, *Biogeosciences*, 10, 7293-7306, doi: 10.5194/bg-10-7293-2013, 2013.

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