

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

OCEANOGRAFÍA DEL OCÉANO PACÍFICO SUDESTE: AVANCES Y PERSPECTIVAS

Ivonne Montes¹

RESUMEN

El presente texto narra los aportes científicos a favor de la exploración del océano Pacífico a fin de conocer sus características y, especialmente, describir las contribuciones desarrolladas por el IGP en el campo de la oceanografía.

Palabras clave: Oceanografía, modelos numéricos, OMZ, océano Pacífico sudeste

AFILIACIÓN:

1. Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú

Citar como: Montes, I. (2021). Oceanografía del océano Pacífico sudeste: Avances y perspectivas. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 8 n.º 05, págs. 5 -11.

INTRODUCCIÓN

Según se evidencia en las fotografías tomadas desde el espacio, más del 70 % de la superficie del planeta está ocupada por el océano, de ahí la denominación de Planeta Azul. Pero lo que vemos en la superficie es, en realidad, un volumen de agua que tiene una profundidad promedio de aproximadamente 3700 m, pudiendo tener zonas muy profundas. Por ejemplo, en la fosa de Perú-Chile, la profundidad registrada hasta el momento alcanza los 8000 m. Sin embargo, nuestro conocimiento del océano se limita a la capa superior (es decir, los primeros 500 metros), aquella que interactúa con la atmósfera y que regula el clima por medio de procesos físicos.

DATOS Y METODOLOGÍA

Si nos referimos al océano Pacífico tropical, la investigación y exploración del océano han estado ligadas al desarrollo tecnológico. Por ejemplo, entre los años 1950 y 1980, la recolección de datos mediante barcos mercantes, navales y de investigaciones internacionales fueron los medios más frecuentes para obtener información oceanográfica (Brainard y McLain, 1987). Estos barcos utilizaron una variedad de instrumentos de muestreo, incluyendo botellas hidrográficas, batitermógrafos mecánicos (MBT), batitermógrafos consumibles (XBT) y sondas electrónicas de conductividad-temperatura-profundidad (CTD, por sus siglas en inglés) para obtener perfiles de datos oceanográficos desde la superficie hasta el fondo en zonas estratégicas, y conocer así sus características. A partir de la década de los 90 se desarrolló, a nivel internacional, un sistema de observación denominado TAO (Tropical Atmosphere Ocean Project). Este sistema es un conjunto de boyas que están distribuidas estratégicamente para obtener información entre los 10°S y 10°N y hasta aproximadamente los 500 metros de profundidad. En los últimos treinta años, una serie de satélites dedicados a la observación meteorológica y oceanográfica han generado una amplia base de datos para monitorizar y estudiar las características superficiales del océano, así como los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera, tal como el fenómeno El Niño.

Más recientemente, el uso de vehículos o plataformas autónomas proporcionan información oceanográfica por debajo de los 500 metros. Un grupo de estos incluye a los flotadores ARGO, instrumentos que obtienen información de alta resolución vertical (típicamente de 1 o 2 dbar), desde la superficie hasta los 1000 o 2000 metros, en un periodo de 5 a 10 días, aproximadamente (dependiendo de la programación que tengan). Las variables que miden son, principalmente, temperatura, salinidad, presión y, en los últimos tiempos, oxígeno, así como otras del tipo bioquímicas. Estos datos son enviados en tiempo real a



una base de datos que es accesible a la comunidad científica internacional.

En el Perú, las entidades científicas utilizan la información de los flotadores ARGO para el monitoreo de la temperatura subsuperficial del mar. En el caso particular del IGP, desde el año 2014 se procesa la información de estos instrumentos para el monitoreo de las ondas Kelvin en el Pacífico ecuatorial para prever el tiempo de llegada de estas ondas hacia al extremo oriental y el posible impacto que podría tener en la costa peruana.

Una herramienta importante para suplir la carencia espacio-temporal de datos observacionales es el modelado numérico. Para el caso de la geofísica, el modelado numérico es, en general, una representación matemática de las propiedades físicas de la Tierra y sus interacciones (basado en leyes fundamentales de la naturaleza, p. ej. conservación de energía, masa y momentum). Dependiendo de la complejidad de las ecuaciones (es decir del caso de estudio), estas pueden tener soluciones analíticas, requiriendo desde tan sólo lápiz y papel hasta computadores personales. Sin embargo, si se quiere modelar el sistema climático o alguno de sus componentes, se requerirá resolver muchas ecuaciones en el dominio del espacio y tiempo necesitando supercomputadores que permiten hacer una gran cantidad de cálculos. Esta herramienta numérica permite generar una serie de escenarios sobre situaciones observadas e ideales, a fin de ganar entendimiento y contribuir a la solución de problemas en muchas áreas del conocimiento. Hay que considerar también que, dependiendo del caso de estudio, esta herramienta requiere de datos observados para realizar la experimentación, calibrar las ecuaciones y/o validar los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para el caso del océano Pacífico sudeste, el modelado numérico ha sido clave para el entendimiento de procesos oceanográficos que se desarrollan en diferentes escalas de tiempo (Figura 1). Se sabe que esta región presenta una dinámica compleja como consecuencia del fuerte acoplamiento entre el océano y la atmósfera, y que además tiene gran influencia en la variabilidad del clima del Perú y el mundo. En particular, el océano frente a las costas de Perú es principalmente dominado por la variabilidad local de los vientos que soportan el afloramiento costero (Garçon et al., 2019). Sin embargo, al ser el único sistema de borde oriental en proximidad y conexión directa con la zona ecuatorial, la región oceánica frente a las costas de Perú es afectada por la variabilidad remota ejercida por la dinámica ecuatorial en varias escalas de tiempo (p. ej., intraestacional, interanual, decadal) a través de ondas y advección de masas de agua. Mediante el modelado numérico, también, se ha podido determinar, por ejemplo, que la advección es principalmente desarrollada por las corrientes ecuatoriales subsuperficiales (EUC: Corriente Ecuatorial Subsuperficial; pSSCC: Contracorriente Subsuperficial Sur primaria; sSSCC: Contracorriente Subsuperficial Sur secundaria), que contribuyen, al final, a la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile - PCUC (Montes et al., 2010). Esta corriente, que fluye hacia el polo a lo largo de las costas de Perú y Chile sobre la plataforma y el talud continental, es la fuente principal de agua para el afloramiento costero.

El afloramiento costero es el proceso físico que provoca el ascenso de masas de agua subsuperficiales frías y ricas en nutrientes que, a su vez, son pobres en oxígeno. Las pobres o bajas concentraciones de oxígeno se deben a una circulación oceánica lenta y a las tasas altas o moderadas de descomposición de materia orgánica que consume oxígeno disuelto (Breitburg et al., 2018), desarrollando lo que conocemos como la Zona de Mínima de Oxígeno (OMZ, por sus siglas en inglés) del océano Pacífico sudeste (ESP, por sus siglas en inglés).

A partir de la experimentación con modelos numéricos regionales acoplados físicos-biogeoquímicos (Montes et al., 2014; Vergara et al., 2016), se ha determinado que el equilibrio de estos procesos físicos y biogeoquímicos puede variar en diferentes escalas de tiempo. Debido a la geometría de la costa, que es favorable para la transmisión de energía de las ondas planetarias, la OMZ del ESP está fuertemente influenciada por la variabilidad remota generada en el Pacífico ecuatorial (es decir, El Niño en sus diferentes facetas) que modula el afloramiento costero impulsado por la divergencia en el transporte de Ekman y la actividad de mesoescala.

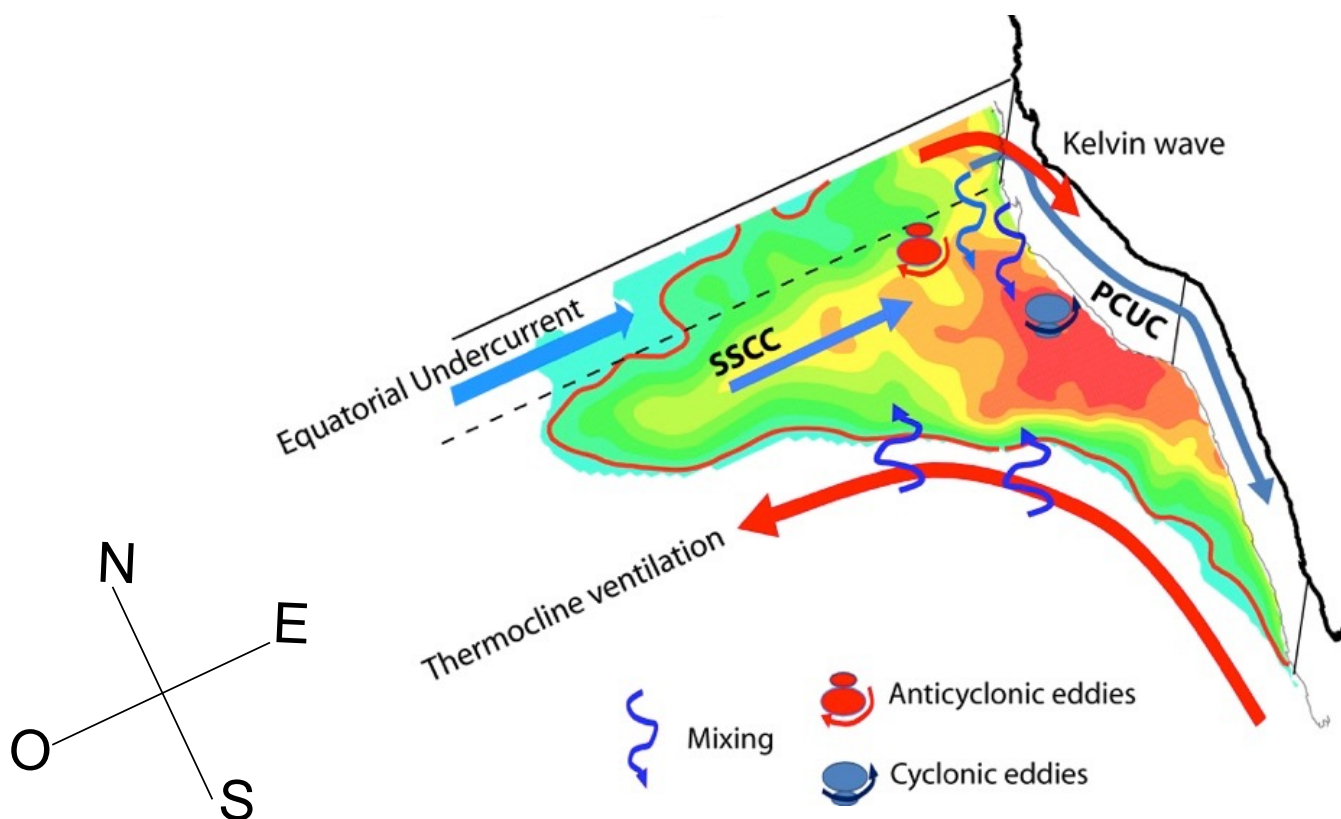


Figura 1. Esquema de los procesos físicos involucrados en el mantenimiento de la OMZ del ESP. Contorno coloreados representan las concentraciones de oxígeno (escala logarítmica), el contorno rojo más oscuro corresponde a concentraciones de oxígeno $< 1 \text{ ml l}^{-1}$ a 300 m (datos CARS, www.cmar.csiro.au/cars). Las flechas de color azul claro ilustran a las corrientes subsuperficiales ecuatoriales. Los remolinos anticiclónicos (ciclónicos) están en rojo (azul). La flecha larga roja gruesa que se curva de sur a oeste representa la ventilación de la termoclina, es decir, en su visión conceptual, el transporte subsuperficial hacia el ecuador de masas de agua a través de la conservación de la vorticidad potencial desde la superficie en las latitudes medias y altas. A lo largo de esta vía de masa de agua, el límite OMZ puede erosionarse a través de la mezcla diapícnal (flechas onduladas azules).

En términos de circulación promedio, las aguas transportadas por el Sistema de Corrientes Ecuatoriales son importantes en la dinámica de la OMZ porque suministran aguas de diferente contenido de oxígeno en la OMZ del ESP. Las estimaciones desde los resultados de la modelación numérica indican que el principal contribuyente a los cambios en los flujos de oxígeno al sistema costero proviene de la EUC ($\sim 300 \times 10^3 \text{ mol s}^{-1}$); mientras que el pSSCC ($\sim 70 \times 10^3 \text{ mol s}^{-1}$) y el sSSCC ($> \sim 20 \times 10^3 \text{ mol s}^{-1}$) solo contribuyen marginalmente (Montes et al., 2014). Estas estimaciones son consistentes con las observaciones disponibles (p. ej., Stramma et al., 2010), las que indican que la OMZ del ESP está ventilada por chorros zonales (p. ej., pSSCC y sSSCC), ricos en nutrientes pero bajos en oxígeno (p. ej., Llanillo et al., 2013), que contribuyen a la reducción de los niveles medios de oxígeno de la OMZ. En términos de variabilidad en la OMZ, la varianza en la advección es un orden de magnitud mayor que la varianza en los procesos biogeoquímicos. La advección es particularmente fuerte a través de los límites de la OMZ donde se encuentran los mayores gradientes de oxígeno (particularmente en las cercanías de la oxiclina y cerca de la costa). La advección no lineal también contribuye a gradientes locales transitorios (es decir, no estables) de oxígeno, los que están asociados con procesos aeróbicos biogeoquímicos locales (como la descomposición óxica y nitrificación en la región de la oxiclina) o la actividad de mesoescala de alta frecuencia que genera gradientes de oxígeno dentro de un flujo promedio de mayor escala (Montes et al., 2014).

En particular, los límites de la OMZ del océano Pacífico sudeste se caracterizan por fuertes gradientes en el contenido de oxígeno y la presencia de zonas altamente turbulentas (Montes et al., 2014; Vergara et al., 2016), donde las estructuras de mesoescala juegan un papel doble (Bettencourt et al., 2015). A profundidades entre ~ 400 y ~ 600 m, los modelos indican que los remolinos y frentes de mesoescala actúan como barreras para la entrada de oxígeno en el núcleo de la OMZ. Aquí, los remolinos sirven para modular la difusión de oxígeno a través de los límites de la OMZ y, por lo tanto, mantienen la separación de las aguas ricas y pobres en oxígeno. Sin embargo, esporádicamente, los remolinos pueden introducir aguas con alto contenido de oxígeno a través de las fronteras de la OMZ.

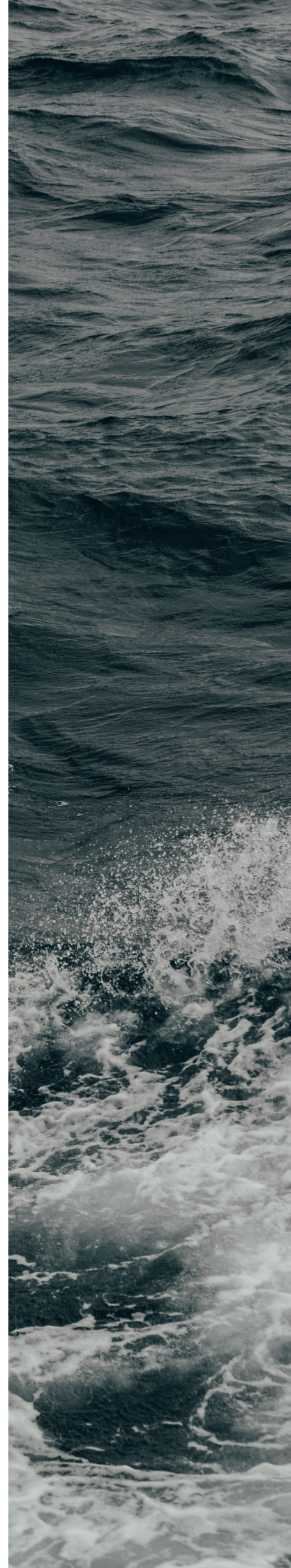
Asimismo, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es el principal impulsor de la OMZ del ESP. Garçon et al. (2019) reportaron una asimetría en la respuesta de la OMZ del ESP a los diferentes tipos de El Niño, donde los eventos de El Niño en el Pacífico Oriental producen una mayor reducción de la OMZ, mientras que los eventos de El Niño en el Pacífico Central están asociados a una OMZ intensificada que puede favorecer condiciones de agua más desoxigenadas. Cabe señalar que durante el ENOS (es decir, en cualquier fase de El Niño y La Niña) se experimenta una modulación en la energía cinética de los remolinos (EKE) en el ESP (Conejero et al., 2020). La EKE tiende a aumentar durante los fuertes eventos de El Niño a lo largo de la costa peruana, mientras que apenas cambia durante los eventos de El Niño y La Niña en el Pacífico Central. Sin embargo, la magnitud de los cambios de EKE durante los fuertes eventos de El Niño en el ESP no es proporcional a su fuerza. En particular se destaca el evento de El Niño de 1972/1973 como un evento extremo en términos de aumento de EKE frente a Perú, alcanzando una amplitud tres veces mayor a la observada durante el evento El Niño 1997/1998. Durante El Niño 2015/2016 se obtuvo un impacto débil en EKE.

Así, los procesos potencialmente importantes en el forzamiento de la OMZ se han documentado en base a modelos regionales (Grant et al., 2021) y globales que revelan una dependencia significativa en la parametrización y resolución del modelo. Los pocos conjuntos de datos de alta resolución disponibles sugieren que la degradación de la materia orgánica dentro de la OMZ juega un papel importante en la variabilidad de alta frecuencia (p. ej., Bretagnon et al., 2018), un proceso que no se considera adecuadamente en los modelos actuales. Por lo tanto, es necesario un enfoque que combine el análisis de datos oceánicos y atmosféricos, la implementación y, también, la experimentación con modelos numéricos regionales.

PERSPECTIVAS

En aporte a la expansión del sistema de observación oceanográfico frente a las costas de Perú, actualmente se viene desarrollando el proyecto “Circulación del Pacífico Este a partir de Flotadores ARGO” (SEPICAF), que proporcionará información oceánica periódica no solo para el monitoreo sino también para abordar problemas científicos claves e implementar sistemas de pronósticos regionales. Especialmente, permitirá soportar las actividades de monitoreo del ENFEN (Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno de “El Niño”). Además, SEPICAF contribuirá a las actividades de monitoreo de los programas ARGO y TPOS2020 (Tropical Pacific Observing System 2020 project), siendo este último una iniciativa de la comunidad científica internacional que tiene como objetivo principal ampliar y rediseñar el sistema de observación océano-atmósfera en la región del Pacífico ecuatorial, zona en la que se desarrolla el fenómeno El Niño/La Niña. Ello a través de la implementación y despliegue de un total de 17 flotadores ARGO entre 2021 y 2023 frente a las costas de Perú y Chile —9 y 8, respectivamente— para asegurar una cobertura suficiente para aplicaciones oceanográficas y climáticas (p. ej., producción de *reanalysis* confiable a través de la asimilación de los datos), y para proporcionar observaciones que permitan la validación de modelos físico-biogeoquímico regionales, así como el estudio de la circulación oceánica y la dinámica de OMZ.

A la fecha, 3 boyas ya han sido liberadas frente a la región centro-norte de Chile gracias a la colaboración de la expedición científica de la Fundación TARA Oceans a bordo de un velero instrumentado con equipos oceanográficos y tripulado por personal científico. Se espera que en el marco de colaboración con entidades públicas (p. Ej., Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú - DIHIDRONAV) y privadas (por ejemplo, empresa pesquera TASA) se inicie, a partir de finales del presente año, el despliegue de los flotadores frente al Perú.



REFERENCIAS

Brainard, R.E., & McLain, D.R. (1987). Seasonal and interannual subsurface temperature variability off Peru, 1952 to 1984. In D. Pauly and I. Tsukayama (eds.). *The Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: Three decades of change*. ICLARM Studies and Reviews 15, 14-45.

Bretagnon, M., Paulmier, A., Garçon, V., Dewitte, B., Illig, S., Leblond, N., ... Scouarnec, L. (2018). Modulation of the vertical particle transfer efficiency in the oxygen minimum zone off Peru. *Biogeosciences*, 15, 5093-5111. doi.org/10.5194/bg-15-5093-2018

Bettencourt, J.H., López, C., Hernández-García, E., Montes, I., Sudre, J., Dewitte, B., ... Garçon, V. (2015). Boundaries of the Peruvian Oxygen Minimum Zone shaped by coherent mesoscale dynamics. *Nature Geoscience*, 8, 937-940. doi:10.1038/ngeo2570

Breitburg, D., Levin, A., Oschlies, A., Grégorie, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., ... Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359, doi:10.1126/science.aam7240

Conejero, C., Dewitte, B., Garçon, V., Sudre, J., Montes, I. (2020). ENSO diversity driving low-frequency change in mesoscale activity off Peru and Chile. *Scientific Report*, 10, 17902. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74762-x>

Garçon, V., Dewitte, B., Montes, I., & Goubanova, K. (2019). *Land-Sea-Atmosphere interactions exacerbating ocean deoxygenation in Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS)*, in *Ocean Deoxygenation: Everyone's problem, Causes, impacts, consequences and solutions*, Eds D. Laffoley and J.M. Baxter, IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources Report, Gland, Switzerland), pp 171-186.

Grant, P., Aguirre-Velarde, A., Breitburg, D., Cardich, J., Carstensen, J., Conley, J.D., ... Zhu, Z. (2021). System controls of coastal and open ocean oxygen depletion. *Progress in Oceanography*. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102613>

Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., & Garçon, V. (2014). High-resolution 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

Montes I., Schneider, W., Colas, F., & Blanke, B. (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 Oceans*, 115(C09003). doi:10.1029/2009JC005710

Stramma, L., Johnson, G.C., Firing, E., & Schmidtko, S. (2010). Eastern Pacific oxygen minimum zones: Supply paths and multidecadal changes. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 115, C09011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005976>

Vergara, O., Dewitte, B., Montes, I., Garçon, V., Ramos, M., Paulmier, A., & Pizarro, O. (2016). Seasonal Variability of the Oxygen Minimum Zone off Peru in a high-resolution regional coupled. *Biogeosciences*, 13, 4389-4410. doi:10.5194/bg-13-4389-2016