

Disponibilidad de flotadores ARGO para el monitoreo oceánico continuo frente a la costa sudamericana

Gerardo Rivera y Kobi Mosquera

Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima-Perú

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la cantidad de observaciones en el océano Pacífico han aumentado considerablemente, cubriendo gran parte de las regiones tropicales y ecuatoriales. Esto ha servido de insumo principal para la asimilación de datos de los modelos oceánicos y, de esta manera, obtener una mejor representación de la dinámica y termodinámica, tanto para el presente como el futuro. Hasta hace un par de décadas, el proyecto de observación oceanográfico TAO/TRITON (McPhaden et al., 2010) sirvió como única ventana para observar, en tiempo real, el Pacífico ecuatorial tanto en la superficie como debajo de ella. No obstante, hoy en día se cuenta con una nueva red observacional que abarca todos los océanos y se denomina "Programa internacional ARGO" (ARGO, 2019). Esta red de monitoreo consiste en un conjunto de instrumentos (que llamaremos de ahora en adelante "flotadores ARGO") con la capacidad de descender y ascender dentro del océano, midiendo su estructura vertical de manera periódica, para obtener información de distintas variables que luego es transmitida al satélite. Es gracias a esta disponibilidad de datos que el Instituto Geofísico del Perú, como otros institutos científicos nacionales e internacionales, usa estos flotadores como herramienta para el monitoreo de las ondas Kelvin oceánicas (Aparco et al., 2014). El presente trabajo busca evaluar la disponibilidad histórica de los datos ARGO a lo largo de la costa

sur de América y su repartición, a fin de ubicar zonas potenciales de monitoreo.

FLOTADORES ARGO

Las observaciones de alta resolución vertical son proporcionadas por la red de flotadores del programa ARGO, los cuales son desplegados a lo largo del océano global. Estos instrumentos proporcionan mediciones, en su mayoría, de temperatura y salinidad desde la superficie hasta una profundidad estándar de 1000 m y 2000 m; extendiéndose hasta los 4000 m y 6000 m en versiones experimentales, conocidos como la serie DEEP ARGO (Roemmich et al., 2019). Los datos proporcionados otorgan una vista a la dinámica vertical del océano, lo cual permite complementar las observaciones superficiales en las tareas de monitoreo e investigación.

Si bien los datos cubren muchas regiones del océano, ciertas zonas dejan de contar con mediciones debido al movimiento de los flotadores que es producido por las corrientes oceánicas, tanto del fondo como de la superficie. Esto provoca que la información se distribuya de manera irregular en el océano. Es por tal motivo que diversas instituciones despliegan cada año más flotadores con la misión de mantener la densidad de datos en al menos un flotador activo en un área de

3° x 3°, sumando una cantidad total de 3000 flotadores activos distribuidos por todo el océano global (Argo Steering Team, 1998). Las proyecciones del proyecto ARGO buscan alinear las misiones de observación a aumentar la densidad de datos disponibles (Roemmich et al., 2019), siendo un ejemplo el de duplicar la densidad de flotadores entre 10°S-10°N como objetivo del Tropical Pacific Ocean Observing System 2020 - TPOS20 (Cravatte et al., 2016).

A fin de obtener series de tiempo casi continuas de los flotadores ARGO, lo cual permita monitorizar o estudiar las condiciones oceánicas en ciertas regiones frente a la costa sudamericana, es que se calcula la función de densidad correspondiente a la distribución histórica de datos (1999-2019) usando un estimador del tipo "Núcleo Gaussiano".

METODOLOGÍA

Estimación de tipo Núcleo

La estimación de tipo Núcleo es una forma de calcular la función probabilística de la densidad de una variable aleatoria de manera no paramétrica (Pedregosa et al., 2012), es decir, sin asumir que los datos forman parte de alguna función de distribución específica. La densidad estimada nos permite observar la probabilidad de encontrar muestras dentro de un intervalo específico. Al igual que el método del histograma, donde la selección de los "bins" afecta los resultados (Silverman, 1998), la selección del ancho de banda para la función "núcleo" tiene el mismo efecto sobre el resultado obtenido, por lo que debe escogerse de acuerdo a la dispersión de los datos, a fin de no obtener un suavizado excesivo. Esta estimación se puede interpretar como una suma de contribuciones individuales en forma de perturbaciones, o pequeños "bultos", que están centrados sobre cada muestra, en donde la superposición de estos equivale a una interacción constructiva, lo cual aumenta el valor de la densidad local.

Matemáticamente, esta estimación se define por:

$$\rho_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

En donde n es la cantidad de observaciones x_i , K representa la función "núcleo" escogida y h es el ancho de banda. Debido a que el resultado es una medida de probabilidad, la función de densidad no puede tomar valores negativos y, a su vez, la integral sobre todo el dominio de datos debe ser 1.

$$\rho(x) \geq 0, \int f(x)dx = 1$$

Para el caso presentado, se escogió una distribución gaussiana como "núcleo", con un ancho de banda empírico de 1.2 ya que, para fines exploratorios, la configuración usada facilitó la interpretación de los patrones obtenidos.

Zonas de monitoreo

La superficie de densidad obtenida corresponde a una distribución multimodal sobre la cual se pueden resaltar dos zonas altamente densas de información, las que corresponden a la ubicación de boyas oceanográficas mantenidas de manera regular por cruceros de la NOAA (Figura 1). La primera zona (Zona 1) corresponde a una región del océano Pacífico ecuatorial centrada aproximadamente en 110°W, cerca de una boya del proyecto TAO, mientras que la segunda zona (Zona 2) se encuentra cerca a 20°S y 85°W, en donde se han desplegado constantemente flotadores ARGO debido al proyecto Stratus (ver reportes de crucero¹).

Habiendo determinado estas dos regiones, se procedió a calcular la anomalía de la temperatura para cada región usando la climatología del reanalysis Global Ocean Data Assimilation (GODAS; Behringer and Xue, 2004), tal como se puede ver en la Figura 1 para el periodo enero de 2015 – abril de 2019. En el panel superior de esta última, el cual representa la Zona 1, se puede observar claramente el impacto de El Niño extremo 2015/2016, La Niña 2016, La Niña 2017-18 y El Niño 2018/2019 hasta los 100 y 150 metros. En el caso particular de los eventos La Niña, se puede apreciar que estos estarían impactando también por debajo de los 250 metros de profundidad. Para la Zona 2, panel inferior de la Figura 2, se aprecia una anomalía positiva en todo el periodo centrada alrededor de los 150 metros de profundidad. Estas anomalías positivas se extienden hacia la superficie entre en los periodos enero- julio de 2016 y enero - junio de 2018. Las anomalías negativas son evidentes a partir de julio de 2017 hasta abril de 2019.

En la parte inferior de cada panel se puede ver la densidad de datos en cada región. En la primera, se observa que esta ha venido disminuyendo con el tiempo, lo cual es esperado debido a la divergencia que existe en dicha región. Para el caso de la Zona B, la mayor densidad de datos se da a partir de aproximadamente el tercer trimestre hasta fines del año 2018. Esto se debe al despliegue, como parte del proyecto Stratus-XVII, del flotador ARGO 3902142, el cual tuvo una resolución temporal de 12 horas, aproximadamente.

¹ <http://uop.whoi.edu/currentprojects/stratus/stratus.html>

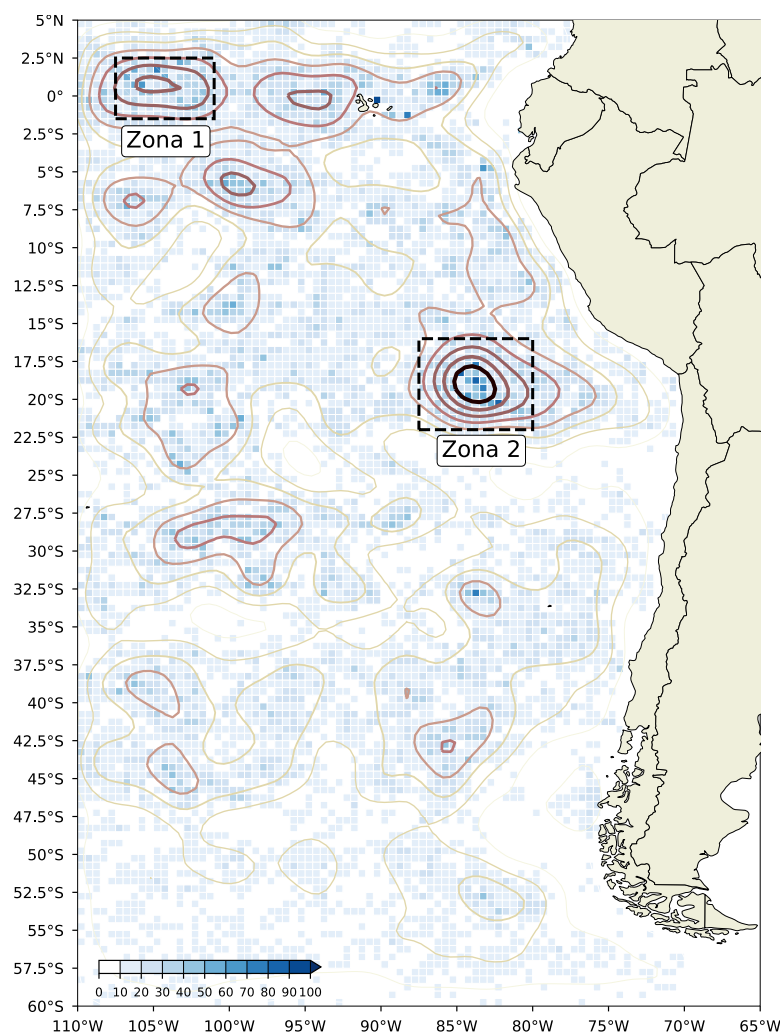


Figura 1. Histograma con "bins" de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ para los datos ARGO. Los contornos representan la función de densidad calculada y las regiones sombreadas equivalen a máximos locales. Los cuadros con línea punteada representan la extensión de las zonas usadas para el monitoreo. El primer dato registrado en la Zona 1 fue el 7/04/2001 mientras que para la Zona 2 fue el 24/10/2001.

Comentarios

Además de identificar las zonas en las que se cuenta con una robustez mayor de datos, se identificó también regiones que tienen una densidad mucho menor, especialmente al sur de 20°S , por lo que las acciones de monitoreo a cargo de instituciones mundiales deben apuntar a suplir esta falta de información oceanográfica subsuperficial. Una de estas propuestas es la del proyecto SEPICAF (*South Eastern Pacific Circulation from ARGO Floats*; Mosquera et al., 2018), el cual lanzará un conjunto de flotadores ARGO en las zonas de Perú y Chile en los años 2020 y 2021, lo cual está alineado a las recomendaciones de TPOS2020.

Hay que indicar que el método usado dio una primera aproximación sobre la estadística de los datos ARGO, pudiendo extenderse a distintas regiones para afinar la tarea de monitoreo; sin embargo, tiene lugar a mejoras, ya que se usó un kernel con ancho de banda constante el cual puede agregar ruido en zonas de baja densidad (Silverman, 1998), no otorgando una estimación adecuada. Además, se evidenció que la presencia de varios datos en un periodo específico, que no necesariamente es reciente, puede elevar la

función de densidad como lo fue en el caso de la Zona 2 (Figura 2a), lo cual sería útil para investigaciones en periodos específicos

BIBLIOGRAFÍA

Aparco, J., Mosquera, K., Takahashi, K., 2014. Flotadores Argo para el cálculo de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aplicación Operacional). Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño" 1, 8–9.

Argo, 2019. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Centre (Argo GDAC). <https://doi.org/10.17882/42182>

Argo Steering Team, 1998. On the design and Implementation of ARGO - an initial plan for the global array of profiling floats (International CLIVAR Project Office Report No. 21).

Behringer, D., Xue, Y., 2004. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific

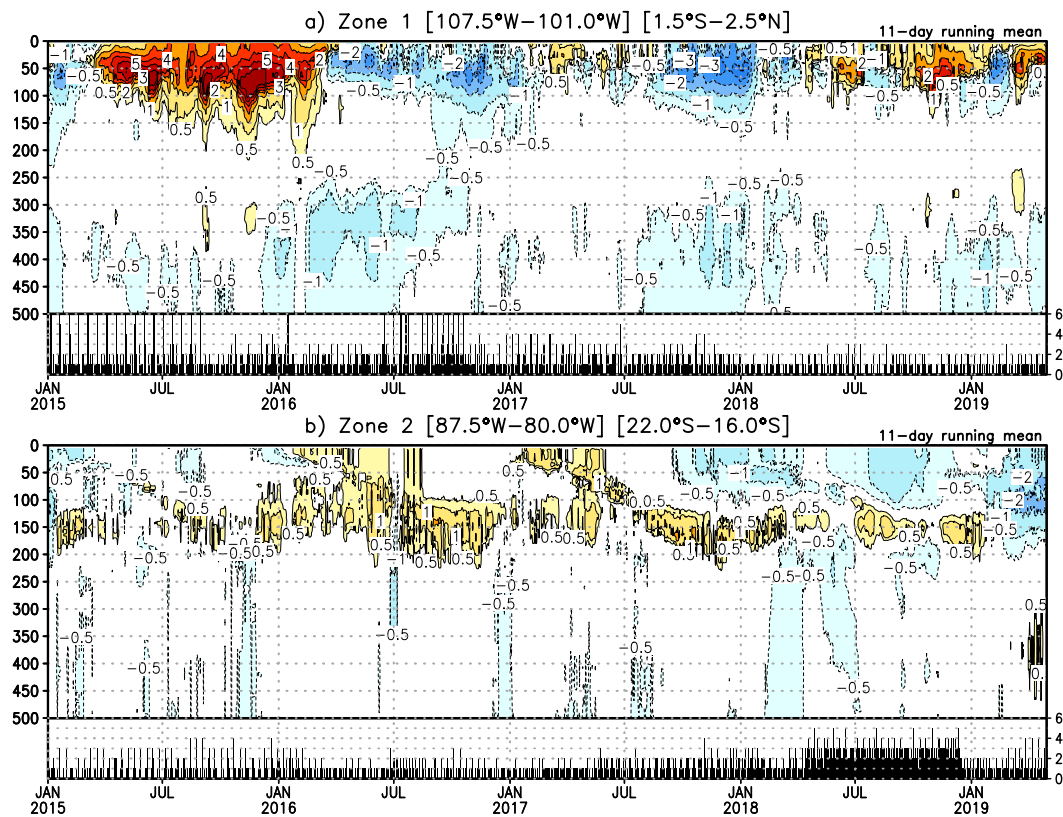


Figura 2. Hovmöller de anomalías de temperatura para la Zona 1 (arriba) y Zona 2 (abajo) obtenidas con una climatología de GODAS (1981-2010). Debajo de cada figura se muestra un histograma que indica la cantidad de datos usados en los cálculos diarios.

Ocean, in: Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface. Presented at the AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington, pp. 11–15.

Cravatte, S., Kessler, W.S., Smith, N., Wijffels, S.E., 2016. First Report of TPOS 2020 (GOOS No. 215).

McPhaden, M.J., Ando, K., Bourles, B., Freitag, H.P., Lumpkin, R., Masumoto, Y., Murty, V.S.N., Nobre, P., Ravichandran, M., Vialard, J., Voursden, D., Yu, W., 2010. The Global Tropical Moored Buoy Array, in: Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. Presented at the OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, European Space Agency, pp. 668–682. <https://doi.org/10.5270/OceanObs09.cwp.61>

Mosquera, K., Montes, I., Dewitte, B., 2018. La Red ARGO para mejorar la monitorización de la circulación oceánica en el mar del Perú. Boletín Técnico “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño” 5, 5–9.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Müller, A., Nothman, J., Louppe, G., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M.,

Perrot, M., Duchesnay, É., 2012. Scikit-learn: Machine Learning in Python. arXiv:1201.0490 [cs].

Roemmich, D., Alford, M.H., Claustre, H., Johnson, K., King, B., Moum, J., Oke, P., Owens, W.B., Pouliquen, S., Purkey, S., Scanderbeg, M., Suga, T., Wijffels, S., Zilberman, N., Bakker, D., Baringer, M., Belbeoch, M., Bittig, H.C., Boss, E., Calil, P., Carse, F., Carval, T., Chai, F., Conchubhair, D.Ó., d’Ortenzio, F., Dall’Olmo, G., Desbruyeres, D., Fennel, K., Fer, I., Ferrari, R., Forget, G., Freeland, H., Fujiki, T., Gehlen, M., Greenan, B., Hallberg, R., Hibiya, T., Hosoda, S., Jayne, S., Jochum, M., Johnson, G.C., Kang, K., Kolodziejczyk, N., Körtzinger, A., Traon, P.-Y.L., Lenn, Y.-D., Maze, G., Mork, K.A., Morris, T., Nagai, T., Nash, J., Garabato, A.N., Olsen, A., Pattabhi, R.R., Prakash, S., Riser, S., Schmechtig, C., Schmid, C., Shroyer, E., Sterl, A., Sutton, P., Talley, L., Tanhua, T., Thierry, V., Thomalla, S., Toole, J., Troisi, A., Trull, T.W., Turton, J., Velez-Belchi, P.J., Walczowski, W., Wang, H., Wanninkhof, R., Waterhouse, A.F., Waterman, S., Watson, A., Wilson, C., Wong, A.P.S., Xu, J., Yasuda, I., 2019. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science* 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00439>

Silverman, B.W., 1998. Density estimation for statistics and data analysis, Monographs on statistics and applied probability. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.