

BALANCE DE CALOR EN LAS REGIONES NIÑO 1+2 Y NIÑO 3.4 DURANTE EL NIÑO 2023/2024

Jeremy Romero^{1,2}, Kobi Mosquera¹, Miguel Andrade¹, Jorge Quispe²

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)

Palabras clave: El Niño, capa de mezcla, advección, flujos de calor

Citar como Romero, J., Mosquera, K., Andrade, M. & Quispe, J. (2024). Balance de calor en las regiones Niño 1+2 y Niño 3.4 durante El Niño 2023/2024. *Boletín Científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 08, págs. 11-15.

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para la comunidad académica?*

Los resultados iniciales de esta investigación indican que el calentamiento en el Pacífico central y oriental durante El Niño 2023/2024 fue impulsado principalmente por los cambios en los movimientos de masas de agua, lo cual enfatiza la necesidad de que la comunidad científica y académica incluya el monitoreo de las corrientes oceánicas y patrones de circulación para mejorar la predicción de futuros eventos El Niño.

Resumen

La siguiente investigación tiene como objetivo analizar los principales procesos físicos que contribuyeron al inicio y final del desarrollo del evento El Niño 2023/2024 en el Pacífico ecuatorial (2° S-2° N y 160° E-90° W). Para ello, se emplea un modelo simple de capa de mezcla de 50 metros de profundidad que considera la advección horizontal y vertical, así como el flujo de calor neto "entrante" a la superficie. La información usada para el modelo de capa de mezcla proviene de los datos del *reanalysis* Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). Los resultados preliminares muestran una contribución significativa al aumento de temperatura de las componentes advectivas en el Pacífico central y oriental desde enero de 2023 hasta principios de 2024, mientras que el flujo neto de calor en el Pacífico oriental contribuyó

a un enfriamiento. No obstante, el residuo también tuvo una contribución importante, especialmente al final del evento, lo cual será analizado en estudios posteriores.

1. Introducción

El Niño es uno de los eventos climáticos más importantes a nivel mundial debido a su potencial impacto significativo en el clima global, los ecosistemas marinos y terrestres, así como en las economías de las regiones afectadas (Trenberth, 1997). Se sabe que, en el territorio peruano, el desarrollo de El Niño frente a la costa peruana (denominado Niño Costero; ENFEN, 2012) puede provocar lluvias intensas durante el verano e incluso durante la primavera, mientras que El Niño en el Pacífico central puede

producir un incremento (disminución) de lluvias a mediados (durante) de primavera (el verano) en la sierra centro y sur, así como en la Amazonía (Lagos et al., 2008; Lavado-Casimiro & Espinoza, 2011; Sulca et al., 2017).

Durante el periodo 2023-2024, se desarrolló nuevamente un evento El Niño que, según la información del Índice Costero El Niño (ICEN, http://met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos.html), se inició en febrero de 2023 y culminó en marzo de 2024. Entre finales del verano e inicios de la primavera de 2023, se desarrollaron lluvias intensas a lo largo de la costa peruana que provocaron desbordes de ríos, huaicos, etc. Asimismo, según los valores del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php), El Niño en el Pacífico central se inició en mayo de 2023 y se extendió hasta abril de 2024.

Este trabajo tiene como objetivo identificar, de manera preliminar, cuáles fueron los procesos físicos más relevantes durante el inicio y el final de El Niño 2023/2024 en las regiones Niño 1+2 (localizada frente a la costa norte y centro del Perú) y Niño 3.4 (ubicada en el Pacífico central). Para ello, se utilizará un modelo simple de capa de mezcla que emplea información oceánica proveniente de un *reanalysis* oceanográfico.

2. Datos y metodología

2.1 Reanalysis GODAS

GODAS (NCEP Global Ocean Data Assimilation System; Behringer, 2007) es un *reanalysis* oceánico que integra la información de un modelo oceánico con datos oceanográficos obtenidos de diversas fuentes, como boyas, satélites y buques de investigación. GODAS abarca un amplio rango geográfico, desde los 75° S hasta los 65° N, con una resolución inicial de 1° × 1°, que aumenta a 1/3° en la banda que va de 5° S a 5° N. Además, cuenta con 40 niveles verticales, con una resolución de 10 metros por encima de los 200 metros de profundidad. De este producto, basado en la versión 3 del modelo oceánico MOM (Modular Ocean Model), se usa la información de temperatura y corrientes, desde la superficie hasta los 50 metros de profundidad; además, el flujo de calor neto “entrante”

a la superficie. Se utilizó la información mensual desde enero de 2023 a mayo de 2024.

2.2 Modelo de capa de mezcla

Para determinar los procesos físicos involucrados en el evento El Niño 2023/2024 se utiliza un modelo simple de capa de mezcla de profundidad constante, en el cual se asume que la temperatura del mar es uniforme. Este tipo de modelo es de uso común para este tipo de investigaciones (Wang and McPhaden, 1999; Mosquera et al., 2013; entre otros). El modelo de capa de mezcla se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left\langle \frac{\partial T_A}{\partial t} \right\rangle_h = - \langle V_A \cdot \nabla T_C \rangle_h - \langle V_C \cdot \nabla T_A \rangle_h - \langle V_A \cdot \nabla T_A \rangle_h + F_A + R \quad (1)$$

El término de la izquierda indica la tendencia de la anomalía de la temperatura potencial. Los primeros 3 términos de la derecha representan procesos advectivos, es decir, el transporte de calor a través del océano debido a su propio movimiento. F y R son el flujo de calor neto entrante a la superficie y el residuo (procesos físicos no representados en la ecuación), respectivamente. Los corchetes angulares indican que las variables están promediadas dentro de la capa de mezcla de profundidad h que, en este trabajo, es de 50 m. Los subíndices C y A indican si la variable es climatológica o anomalía, respectivamente. Finalmente, $V = (u, v, w)$, donde u , v , w son las velocidades zonal, meridional y vertical, respectivamente.

3. Resultados preliminares

La Figura 1 muestra, en colores, las tendencias para cada una de las componentes del modelo de capa de mezcla (ver ecuación 1) a lo largo de la franja ecuatorial (2° S-2° N) del Pacífico, entre 120° E y 80° W, mientras que en contornos se puede apreciar la anomalía de la temperatura del mar (ATM) promediada dentro de la capa de mezcla. Estas gráficas corresponden al periodo comprendido entre enero de 2023 a mayo de 2024, durante el cual se desarrolló el evento El Niño 2023/2024. A inicios de 2023, se observa una tendencia positiva de la ATM (Figura 1a) en casi toda la región ecuatorial, pero especialmente intensa en el extremo oriental,

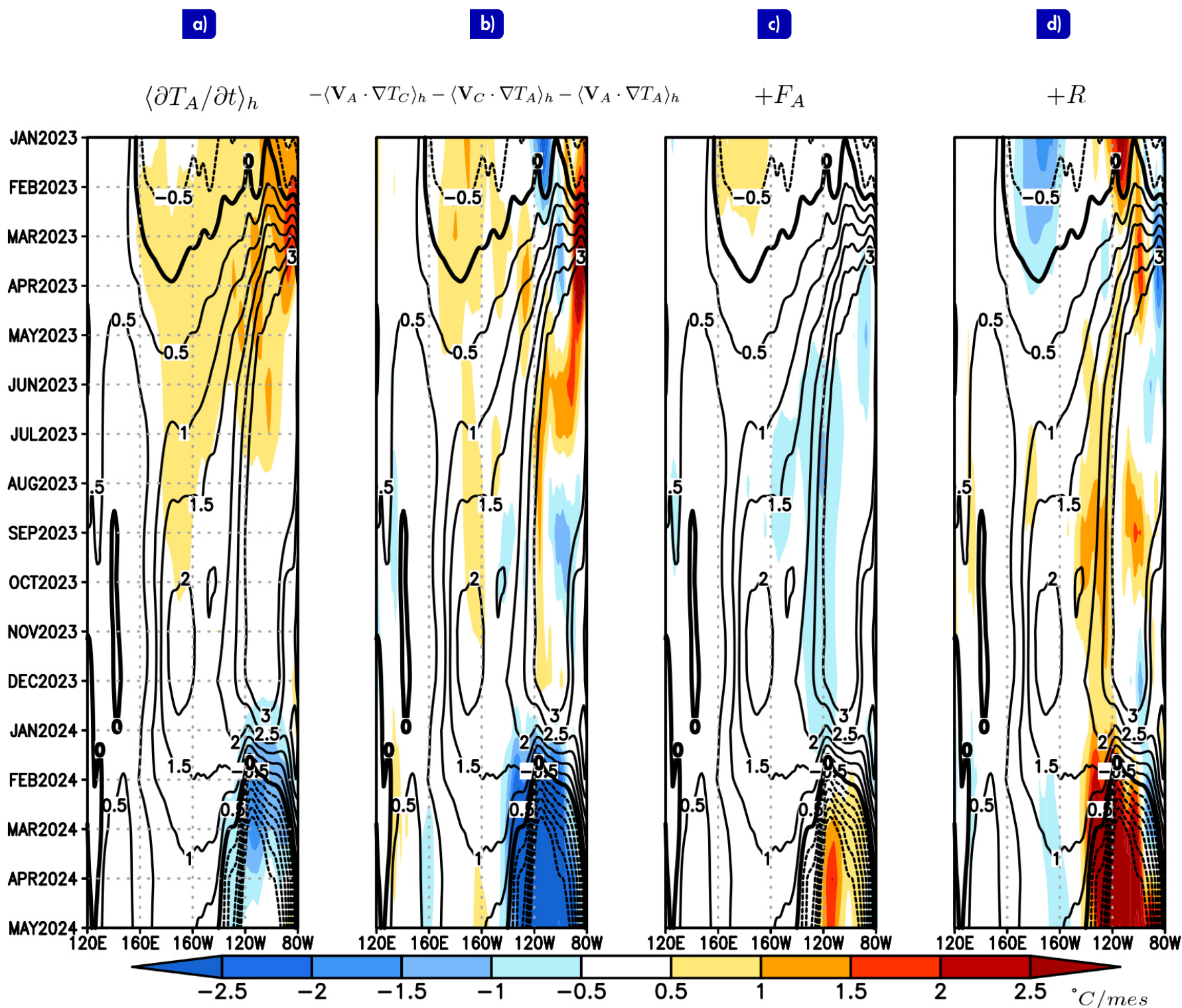
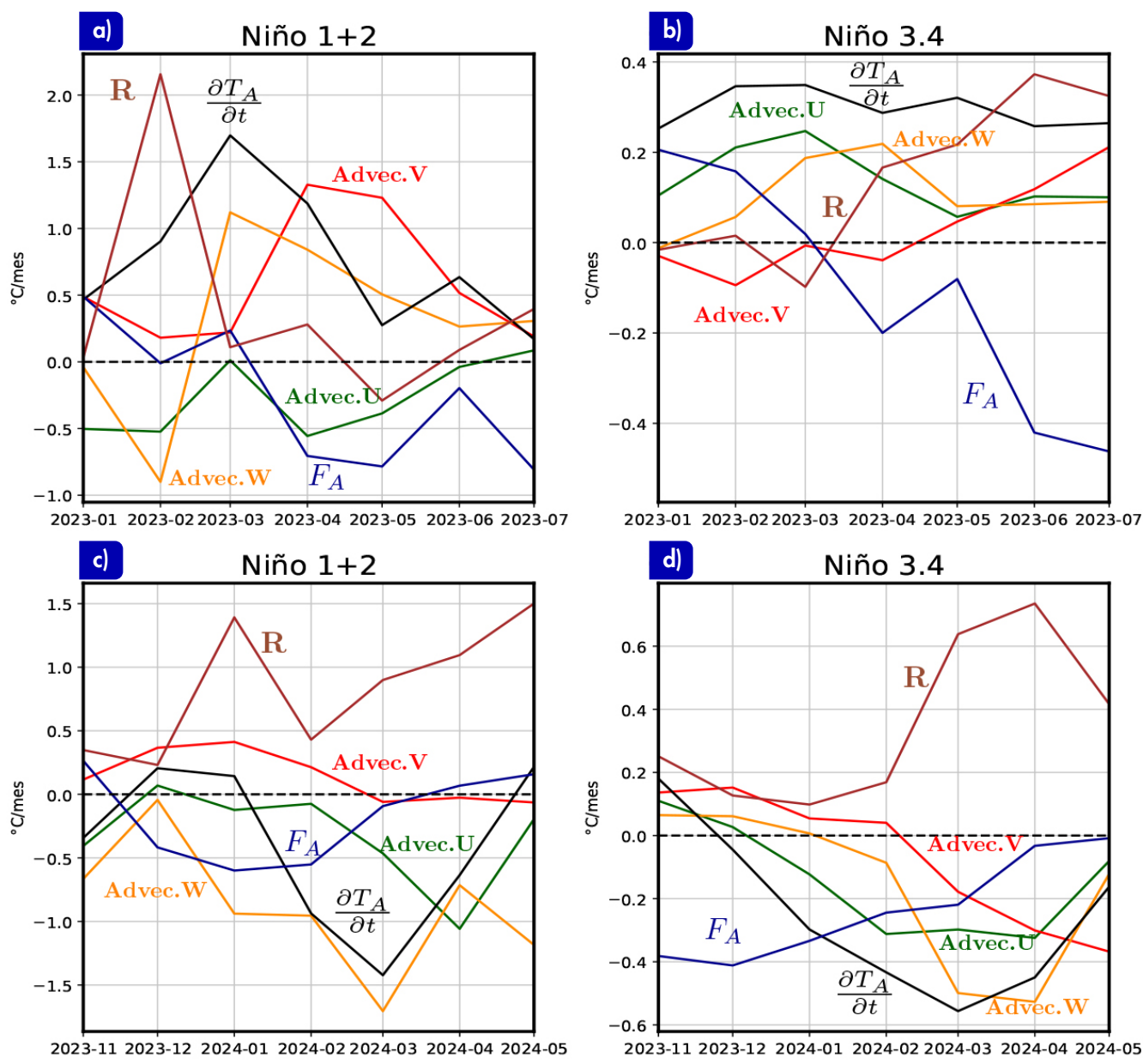


Figura 1. Diagramas Hovmöller que muestran, en colores, (a) la tendencia de la anomalía de la temperatura del mar, (b) los procesos advectivos, (c) los flujos entrantes en la superficie y (d) el residuo, todos dentro de la capa de mezcla ($h = 50$ m). En contornos, se muestra la anomalía de la temperatura del mar.

donde alcanzó valores de hasta $2 \text{ }^\circ\text{C/mes}$ entre febrero y marzo. La tendencia positiva se mantiene hasta mayo de 2023 en el extremo oriental y hasta octubre de 2023 en la zona central. Estas tendencias se traducen en incrementos de la ATM de hasta $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) en la zona oriental (en el Pacífico central), desde marzo hasta diciembre de 2024 (desde octubre y diciembre de 2023). A inicios de 2024, se observa una tendencia negativa en la zona oriental, lo que indica

una disminución muy rápida de la ATM en dicha región, lo cual no se observó en la zona del Pacífico central. Según la Figura 1b, en una primera aproximación, los procesos advectivos han jugado un rol importante en el inicio, desarrollo y fin de este evento, mientras que los flujos netos entrantes han compensado a los primeros (Figura 1c). En el residuo (Figura 1d) también se observa una contribución al calentamiento, pero es más importante al final del evento.



$$\begin{aligned}
 \text{Advec.U} &= -u_A \frac{\partial T_C}{\partial x} - u_C \frac{\partial T_A}{\partial x} - u_A \frac{\partial T_A}{\partial x} \\
 \text{Advec.V} &= -v_A \frac{\partial T_C}{\partial y} - v_C \frac{\partial T_A}{\partial y} - v_A \frac{\partial T_A}{\partial y} \\
 \text{Advec.W} &= -w_A \frac{\partial T_C}{\partial z} - w_C \frac{\partial T_A}{\partial z} - w_A \frac{\partial T_A}{\partial z} \\
 R &= \text{Residuo}
 \end{aligned}$$

Figura 2. Series de tiempo de las tendencias de los procesos advectivos zonales (Advec.U, líneas verdes), meridionales (Advec.V, líneas rojas) y verticales (Advec.W, líneas anaranjadas). Las líneas azul y marrón representan los flujos superficiales entrantes (FA) y el residuo (R), respectivamente. Los paneles superiores (inferiores) muestran las tendencias para el inicio (fin) del evento El Niño 2023/2024 para las regiones Niño 1+2 y Niño 3.4.

En la Figura 2 se muestran las series temporales en la región Niño 1+2 (0°-10° S y 90° W-80° W) y en la región Niño 3.4 (5° S-5° N y 170° W-120° W) de las diferentes componentes descritas en la ecuación 1 durante el inicio (paneles superiores, a y b) y el final (paneles inferiores, c y d) del evento El Niño 2023/2024. Las líneas representan la tendencia de la anomalía de la temperatura del mar (en negro), las componentes advectivas zonales (en verde), meridionales (en rojo) y verticales (en naranja), los flujos de calor (en azul) y el residuo (en marrón).

En la Figura 1a, en la región Niño 1+2, se observa el

incremento de la tendencia de la ATM hasta marzo, la cual decae luego hasta mayo para después incrementarse en junio y decaer nuevamente en julio. El aumento de la tendencia de la ATM durante este periodo (enero-febrero) fue amortiguado por la advección vertical y la advección zonal. La tendencia alcanzó su pico máximo en marzo, donde el principal contribuyente fue la advección vertical, aunque la advección meridional y los flujos también contribuyeron, pero en menor medida. A partir de marzo, fueron las advecciones meridionales y verticales las que mantuvieron la tendencia positiva; no obstante, el flujo de calor fue la principal

componente que comenzó a contrarrestar el aumento en la tendencia (liberación de calor) junto con la componente zonal, razón por la cual la tendencia comenzó a decaer. Para el final del evento (Figura 1c), durante el periodo de noviembre de 2023 a enero de 2024, la tendencia, que ya era negativa, comenzó a incrementarse ligeramente debido a la advección meridional y al residuo, principalmente; sin embargo, las demás componentes advectivas, junto con los flujos, provocaron la caída en la tendencia, siendo esta nuevamente negativa desde enero.

En la región Niño 3.4, la tendencia se mantuvo positiva durante todo el periodo. De enero a marzo de 2023, la principal componente que ayudó a mantener positiva la tendencia fue la advección zonal; sin embargo, la advección vertical también tuvo una contribución significativa junto a los flujos de calor. Por otro lado, la advección meridional y el residuo compensan en menor medida este aumento en la tendencia. Desde marzo en adelante, todas las advecciones, así como el residuo, mantuvieron positiva la tendencia, mientras que los flujos de calor fueron la principal componente en tratar de contrarrestar este aumento hasta finales del periodo analizado. Para el final de este periodo, durante noviembre de 2023 a febrero de 2024, las advecciones, junto con el residuo, contribuyeron en menor medida al aumento de tendencia; sin embargo, durante todo este periodo, fueron los flujos de calor los que jugaron un rol importante en la disminución de la tendencia, convirtiéndose en negativa a finales de noviembre de 2023 hasta el final de este periodo de análisis. Los flujos de calor tuvieron una gran contribución en la disminución de la tendencia hasta mediados de febrero, cuando la advección vertical y la advección zonal se convirtieron en las principales contribuyentes. Además, la advección meridional también tuvo una contribución, pero en menor medida, hasta finales del periodo de análisis, donde el residuo jugó un rol importante en contrarrestar esta disminución de la tendencia.

Estos resultados preliminares en la región Niño 1+2 coinciden con los encontrados por Peng et al. (2023), quien describe que el inicio del evento se habría debido a fuertes vientos del norte. Es posible que estos hayan contribuido a la advección meridional a inicios del evento; luego, la presencia de ondas de Kelvin de hundimiento, proyectadas sobre la costa, donde tendrían una componente meridional, podría haber sumado a esta advección. Asimismo, la

componente vertical Ekman *feedback* (no mostrada) jugó un rol importante en su desarrollo inicial, tal como también lo menciona Peng et al. (2023). Aunque el modelo reproduce relativamente bien la física de este evento, aún es necesario realizar ciertos ajustes y verificaciones con otros eventos El Niño y La Niña.

Referencias

- Behringer, D. W. (2007). *The Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) at NCEP*. Preprints, 11th Symp. on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, San Antonio, TX. Amer. Meteor. Soc., 3.3. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/119541.pdf>
- ENFEN (2012). *Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú*. Nota Técnica del ENFEN. <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/icen-nota-tecnica-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-y-la-nina-y-sus-magnitudes-en-la-costa-del-peru/?wpdmdl=729&refresh=675346a8190c41733510824>
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E. y Mosquera, K. (2008). El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14, 231-237. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-231-2008>
- Lavado-Casimiro, W. y Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 171-182.
- Mosquera-Vásquez, K., Dewitte, B., Illig, S., Takahashi, K. y Garric, G. (2013). The 2002/2003 El Niño Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 346-357. <https://doi.org/10.1029/2012JC008551>
- Peng, Q., Xie, S.-P., Passalacqua, G. A., Miyamoto, A. y Deser, C. (2024). The 2023 extreme coastal El Niño: Atmospheric and air-sea coupling mechanisms. *Science Advances*, 10(12). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk8646>
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J.C., Vuille, M. y Lavado-Casimiro, W. (2017). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *Int. J. Climatol.*, 38(1). <https://doi.org/10.1002/joc.5185>
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Wang, W. y McPhaden, M. J. (1999). The surface layer heat balance in the equatorial Pacific ocean. Part I: Mean seasonal cycle. *J. Phys. Oceanogr.*, 29(8), 1812-1831. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1812:TSLHBI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1812:TSLHBI>2.0.CO;2)