



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
PERÚ 2021



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Variabilidad de los
flujos de CO₂
durante episodios
El Niño y La Niña
costeros

Pág. 5

Análisis de
sensibilidad del
sistema acoplado
regional COW para
el Pacífico sudeste

Pág. 12

Resumen del informe
técnico de El Niño

Pág. 18

Resumen del
Comunicado ENFEN

Pág. 19



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

Vol. 8 n.º 02 Febrero 2021

CRÉDITOS

Gabriel Quijandría Acosta

Ministro del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú:

Hernando Tavera Huarache

Presidente Ejecutivo

Edmundo Norabuena Ortiz

Director Científico

Ivonne Montes Torres

Directora

Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera

Equipo editorial:

James Apaéstegui Campos

Kobi Mosquera Vásquez

Diseño y diagramación

Unidad Funcional de Comunicaciones

Carátula: agua en el estrecho de Bransfield (océano Antártico)

Foto: Ivonne Montes

El boletín científico “El Niño” es generado en el marco del Programa Presupuestal n.º 068 “Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”.

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres

Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño

Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012.

Teléfono: 51-1-3172300

Lima, agosto de 2022

EDITORIAL

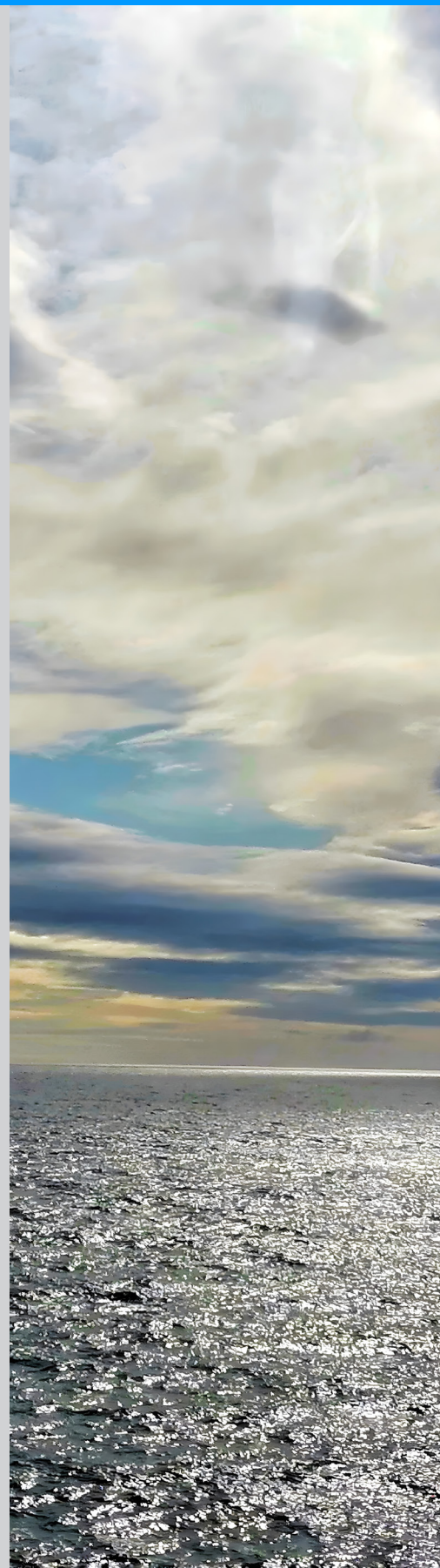
El Instituto Geofísico del Perú (IGP), institución pública adscrita al Ministerio del Ambiente, tiene por finalidad generar, utilizar y transferir conocimientos e información científica y tecnológica en el campo de la geofísica y ciencias afines. El IGP forma parte de la comunidad científica internacional y contribuye a la gestión del riesgo de desastres en el Perú, con énfasis en la prevención y mitigación de desastres naturales y de origen antrópico.

El IGP, a través del Programa de Investigación en Variabilidad y Cambio Climático, genera conocimiento científico sobre los componentes del sistema climático (atmósfera, océano, suelo, biósfera y criósfera) y la interacción entre ellos. El Niño - Oscilación del Sur es uno de los principales modos de variabilidad, el cual es objeto de estudio en el programa de investigación, debido a la alta vulnerabilidad del Perú y los impactos negativos asociados.

Desde el 2014, el IGP y otras instituciones integrantes de la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN) participan en el Programa Presupuestal 068: "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"- PREVAED, contribuyendo con el producto denominado "Estudios para la estimación del riesgo de desastres". El IGP realiza la síntesis y evaluación de los pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos, además de otros estudios que fortalecen en forma continua la capacidad de monitoreo y pronóstico de El Niño en el Perú.

Con el fin de divulgar el conocimiento científico, el Instituto Geofísico del Perú presenta periódicamente sus investigaciones y avances en temas de variabilidad y cambio climático, a través de su Boletín Científico "El Niño", tratando de presentar la información con un lenguaje sencillo y sintetizando los aspectos más relevantes de dichas investigaciones. El objetivo es que las autoridades y técnicos especialistas en la gestión del riesgo de desastres (GRD) pertenecientes a los tres niveles de gobierno, así como el público en general interesado, puedan tener como fuente de conocimiento a los materiales de investigación que el IGP genera.

El presente ejemplar suma dos artículos de investigación. El primero, titulado "Variabilidad de los flujos de CO_2 durante episodios El Niño y La Niña costeros", se enfoca en evaluar la influencia de los episodios El Niño y La Niña costeros en las tasas de emisión de CO_2 para la región más productiva del sistema norte de la corriente del Humboldt. Los resultados muestran que ambos episodios configuran al mar peruano como un emisor de CO_2 , siendo más intenso durante episodios La Niña.



EDITORIAL

El segundo artículo, titulado “Análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional COW para el Pacífico sudeste”, muestra los resultados preliminares del análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional CROCO-OASIS-WRF (COW), implementado para el sistema océano-atmósfera del Pacífico sudeste, haciendo uso de la infraestructura computacional del IGP denominada HPC-Linux-Cluster.

En este boletín se presenta también el resumen del informe técnico de El Niño, documento que forma parte de los compromisos asumidos por el IGP en el marco del PPR 068. El informe indica que en la actualidad se observan condiciones neutras frente a la costa peruana. Por otro lado, en el Pacífico central se muestran condiciones frías moderadas. Según el promedio de las predicciones numéricas de los siete modelos climáticos de NMME, inicializados con información oceánica y atmosférica del mes de febrero de 2021, continúan indicando valores, en promedio, por debajo de lo normal frente a la costa peruana hasta agosto de 2021. En el Pacífico central se mantiene el desarrollo del evento La Niña, que se extendería hasta el mes de agosto.

La Comisión Multisectorial ENFEN mantiene el estado de Alerta “No Activo” debido a que las temperaturas del mar en la región Niño 1+2, que incluye la zona norte y centro del mar peruano, se mantendría dentro de su rango normal hasta mayo del 2021. Por su parte, La Niña en el Pacífico central, se ha venido debilitando desde noviembre 2020 y continuaría con magnitud débil hasta el otoño; sin embargo, aún podría contribuir a la ocurrencia de lluvias superiores a lo normal en la sierra central y sur, así como en algunos sectores de la selva en lo que resta del verano. Es importante advertir que, en caso de existir discrepancias con el informe técnico de El Niño emitido por el IGP, prevalecerá lo establecido en el Comunicado Oficial del ENFEN.



DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

VARIABILIDAD DE LOS FLUJOS DE CO₂ DURANTE EPISODIOS EL NIÑO Y LA NIÑA COSTEROS

Rodrigo Mogollón¹

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en evaluar la influencia de los episodios El Niño y La Niña costeros en las tasas de emisión de CO₂ en la región más productiva del sistema norte de la corriente del Humboldt. Se encontró que el mar peruano se comporta como un emisor, relativamente débil, de CO₂ durante un episodio promedio de El Niño costero y se estimó que 24.7 toneladas métricas de carbono podrían estar dejando de ser emitidas hacia la atmósfera durante estas condiciones como consecuencia de la intensificación de los vientos costeros que inducen un intercambio gaseoso más intenso que compensa el debilitamiento del gradiente de presiones parciales de CO₂ entre el océano y la atmósfera. En contraste, durante un episodio promedio de La Niña costera, la costa peruana se comporta como un fuerte emisor de CO₂ atmosférico, que contribuye con 3.3 millones de toneladas métricas de carbono adicionales a las que se emiten en condiciones neutrales (53.1 Tg C año⁻¹, periodo 1998-2015). Este comportamiento de fuente de CO₂ durante un episodio promedio de La Niña costera es consecuencia de un afloramiento costero más intenso que trae aguas con mayores concentraciones de carbono inorgánico disuelto hacia la superficie.

El artículo científico original se encuentra en: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103240>

Palabras clave: El Niño Oscilación Sur, Flujos de CO₂ en la interfase aire-mar, Sistema de corriente de Humboldt, CO₂ del Sistema carbonato, variabilidad interanual.

AFILIACIÓN:

1. Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Callao

Citar como: Mogollón, R. (2021). Variabilidad de los flujos de CO₂ durante episodios El Niño y La Niña costeros. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 8 n.º 02. págs. 5-11.

INTRODUCCIÓN

El sistema norte de la corriente del Humboldt (SNCH) depende particularmente de las condiciones asociadas al modo de variabilidad de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), el cual impacta fuertemente la circulación atmosférica y oceánica. Debido a la cercanía del SNCH con el ecuador y las directas conexiones subsuperficiales con el sistema de corrientes ecuatoriales (Montes et al., 2010), las fases de ENOS afectan la posición e intensidad de las principales corrientes en el mar peruano, como es el caso de la corriente subsuperficial Perú-Chile, que provee de nutrientes a lo largo de la costa peruana. En consecuencia, cualquier perturbación asociada a ENOS tiene implicancias desde una perspectiva física y biogeoquímica (Colas et al., 2008; Montes et al., 2010; Espinoza-Morriberón et al., 2017; Mogollón & Calil, 2017). Por tal motivo, es importante cuantificar potenciales efectos derivados de ENOS, no sólo desde una perspectiva global, sino también desde una perspectiva local y, además, dentro de un contexto climático, considerando la fragilidad del sistema carbonato oceánico y el intercambio de flujos de dióxido de carbono (CO_2) con la atmósfera en las regiones costeras que son altamente productivas.

Comúnmente, se asocia la fase cálida de ENOS o El Niño con condiciones desfavorables para la pesca, es decir, menores tasas de producción primaria, menor suministro de nutrientes, entre otros (Ñiquen & Bouchon, 2004). Sin embargo, El Niño podría ser considerado como un evento favorable en otros aspectos, dado que se consumen grandes cantidades de energía térmica a través de la evaporación en el Pacífico este, lo cual en promedio tiende a enfriar los océanos globales (Trenberth et al., 2002). También, Bakun & Weeks (2008) sugirieron que El Niño reinicia el ecosistema marino peruano desde un estado base, que es intrínsecamente muy productivo, al interrumpir cualquier *feedback* negativo de largo plazo que potencialmente pueda afectar la productividad. En relación a los gases, El Niño también jugaría un papel positivo, ya que al demostrarse que es una fase de alta oxigenación (Montes et al., 2014; Espinoza Morriberón et al., 2018), se suprime fuertemente la emisión de óxido nitroso (un gas de efecto invernadero 300 veces más dañino que el propio CO_2), el cual es principalmente generado cuando el océano está bajo condiciones subóxicas (Mogollón & Calil, 2017). Muchos trabajos han indicado que el intercambio de CO_2 en la interfase aire-mar es altamente influenciado por el ENOS; sin embargo, su impacto neto sobre el mar peruano no ha sido cuantificado, puesto que la mayoría de las investigaciones se abordan desde una perspectiva de gran escala con un enfoque en la región oceánica del Pacífico ecuatorial y tropical. Por ejemplo, Feely et al. (1999) mostraron una reducción en la emisión de los flujos de CO_2 durante El Niño 1991-1994. Chavez et al. (1999) también encontraron que el océano Pacífico retuvo cerca de 0.7 Pg de carbono durante El Niño 1997-1998. Estudios realizados en otras regiones, como el sistema de corrientes de California en el Pacífico norte (Chavez et al., 1999; Friederich et al., 2002), sugieren que existiría un cambio en la naturaleza de los flujos de CO_2 , es decir, de emisor a sumidero, a causa de ENOS. En el caso del SNCH, las observaciones y simulaciones muestran que no cambia su naturaleza de emisor bajo casi ninguna circunstancia (Friederich et al., 2008; Mogollón & Calil, 2018).

En el presente estudio se abordan básicamente tres preguntas:

¿Cuál es la variabilidad espacial de los factores que controlan el flujo de CO_2 durante un episodio promedio de El Niño/La Niña y en condiciones normales? ¿Cómo contribuyen la velocidad del viento, el contenido de CO_2 en el agua de mar, y la variabilidad conjunta de ambos en la magnitud del flujo resultante de CO_2 durante episodios El Niño/La Niña? ¿Cuánto carbono desde la parte costera más productiva y la adyacente franja ecuatorial del SNCH se retiene o libera durante un episodio promedio de El Niño/La Niña?

Para este estudio se usaron resultados de simulaciones globales validadas, las cuales son producidas en MERCATOR-Ocean, proporcionadas por el servidor de disseminación del Copernicus (CMEMS) (<https://marine.copernicus.eu/>). El experimento consiste en una simulación hidrodinámica en retrospectiva que inicia en el año 1993, llamada GLORYS2V4, la cual también alimentó un experimento numérico regional que contiene la biogeoquímica. Estas simulaciones son a 25 km de resolución horizontal y en promedios mensuales. El periodo de análisis fue entre 1998 y 2015.

COMPOSICIÓN DE EL NIÑO/LA NIÑA COSTEROS

Se utilizó el Índice Costero El Niño (ICEN) (<http://met.igp.gob.pe/variabclim/indices.html>) para considerar sólo periodos El Niño costero (de aquí en adelante El Niño) que son categorizados como “fuerte/extraordinario”, y periodos La Niña costera (de aquí en adelante La Niña) que son consideradas como “fuerte”. De esta forma, se podrá inferir un estado promedio que represente las anomalías inducidas por un episodio genérico El Niño o La Niña para cada variable de interés. Se hicieron composiciones para 3 variables diferentes: la primera que represente la física del océano; la segunda, la física de la atmósfera; y la tercera, el sistema de carbonatos en el agua de mar. Estas variables fueron la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), la velocidad del viento, y el carbono inorgánico disuelto (DIC, por sus siglas en inglés), respectivamente. Los resultados indicaron que durante un episodio El Niño, la SST se encuentra anómalamente más caliente que en condiciones normales, lo cual es bien conocido, dada la advección de aguas cálidas proveniente del sistema ecuatorial y la influencia de las ondas Kelvin y subsecuentes ondas atrapadas en la costa (CTW, por sus siglas en inglés) (Echevin et al., 2014). Contraintuitivamente, durante un episodio El Niño existe un moderado incremento en la velocidad del viento con dirección favorable para el afloramiento costero, a pesar de la observada disminución del viento en el Pacífico ecuatorial. Este incremento de la velocidad del viento costero (~ 1 m/s) podría deberse a gradientes térmicos meridionales, conocido como “el efecto Chamorro” (Chamorro et al., 2018). En contraste, durante La Niña, la tensión del viento disminuye (~ 0.5 m/s) pero aún mantiene su dirección favorable para el afloramiento costero. En relación al DIC, se inducen anomalías positivas y negativas durante un episodio El Niño y La Niña, respectivamente. Esto era de esperarse dada la relación lineal inversa entre DIC y SST. Sin embargo, la explicación podría ser más compleja debido a la depresión de la termoclina durante los episodios El Niño, que hace que las aguas que afloran contengan una menor concentración de DIC. En contraste, durante un episodio La Niña, el afloramiento resulta más eficiente dado que la corriente subsuperficial, que suele ser abundante en nutrientes y DIC, se encuentra en una posición más estratégica (Colas et al., 2008; Montes et al., 2010, 2011; Espinoza-Morriberón et al., 2017). Esto hace que las aguas-fuente, que son transportadas a la superficie, lleven mayores concentraciones de DIC que lo habitual. Es importante resaltar que, aunque el mar peruano esté anómalamente más frío que en condiciones neutrales, el efecto que tiene la disminución de la SST en disminuir la $p\text{CO}_2$ oceánica (a través de la solubilidad termal) es mucho menor que la influencia del afloramiento de aguas ricas en DIC en aumentar la $p\text{CO}_2$ oceánica (Mogollón & Calil, 2018), y, como consecuencia, el mar peruano emitiría CO_2 a la atmósfera a una mayor tasa durante los periodos de La Niña. Si bien estas consideraciones son un tanto especulativas, proveen, al menos, una explicación plausible a las anomalías antes descritas.

En la Figura 1 se muestran las composiciones resultantes para todos los factores involucrados en el cálculo del flujo de CO_2 . Se considera la diferencia de las presiones parciales de CO_2 entre el océano y la atmósfera ($\Delta p\text{CO}_2$), la velocidad de transferencia del CO_2 (K_w) y la solubilidad del CO_2 (K_0). Cuantitativamente, durante un episodio El Niño promedio, $\Delta p\text{CO}_2$ y K_0 disminuyen en aproximadamente $35 \mu\text{atm}$ y $1.5 \text{ mol m}^{-3} \text{ atm}^{-1}$, respectivamente; mientras que K_w aumenta en 1 cm h^{-1} . Sin embargo, estos valores varían dependiendo del lugar de interés. Durante un episodio de La Niña promedio, los patrones son opuestos, aunque en menor magnitud, por lo que se podría decir que existe una respuesta asimétrica.

En promedio, el SNCH es un fuerte emisor de CO_2 (del océano hacia la atmósfera), tal como se aprecia en la Figura 1a donde el flujo es positivo en casi toda la región. Sin embargo, existe una fuerte disminución de su naturaleza fuente durante un episodio El Niño promedio (Figura 1b) y un relativo incremento durante un episodio La Niña promedio (Figura 1c). Considerando que su estado promedio está por arriba de los $4 \text{ mol C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, las anomalías ($\pm 2 \text{ mol C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) que se inducen durante las episodios El Niño/La Niña no llevarían al SNCH a un estado de sumidero de CO_2 .

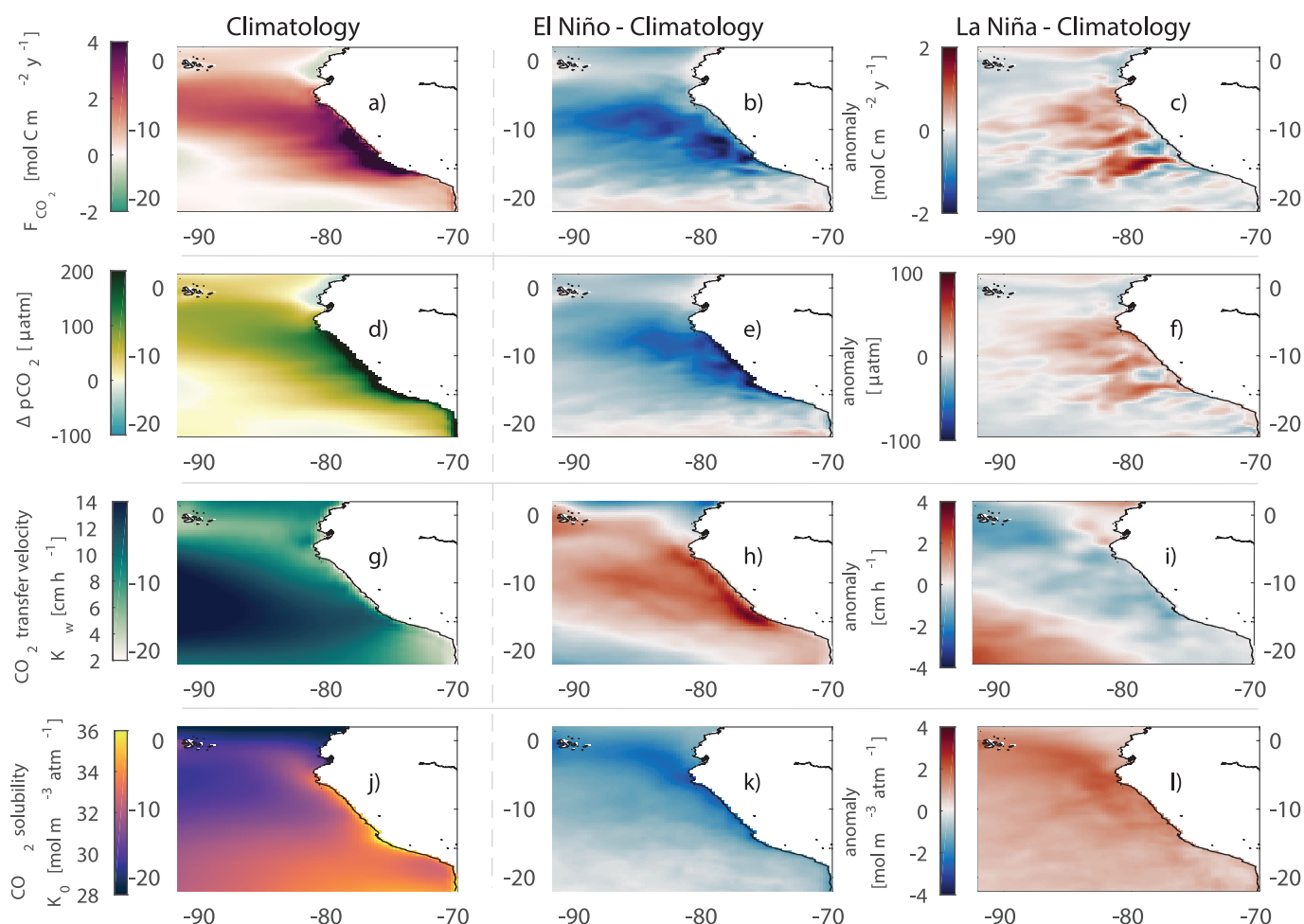


Figura 1. a) Promedio anual de los flujos de CO_2 (F_{CO_2}). Sus respectivas anomalías inducidas durante un episodio El Niño y La Niña promedio se muestran en las columnas del medio y de la derecha, paneles b y c, respectivamente. Análogamente, paneles d, e y f corresponden a la diferencia de las presiones parciales de CO_2 entre el océano y la atmósfera como variable $\Delta p\text{CO}_2$, g, h e i muestran velocidad de transferencia del CO_2 como variable K_w y j, k y l corresponden a la variable K_0 que representa la solubilidad del CO_2 .

SENSIBILIDAD DE LOS FLUJOS DE CO_2

Para cuantificar estadísticamente las contribuciones relativas de cada factor de la ecuación del flujo de CO_2 a su propia variabilidad interanual, se siguió la metodología propuesta en Doney et al. (2009), la cual consiste en hacer una descomposición de Reynolds a cada factor para poder separar estadísticamente las anomalías y la media del campo instantáneo. Los factores son: $\Delta p\text{CO}_2$ y $K_w \cdot K_0$. El primero está directamente relacionado con el contenido de CO_2 en el agua de mar, ya que una mayor concentración de DIC aumentaría la $p\text{CO}_2$ en el agua de mar y consecuentemente la $\Delta p\text{CO}_2$, debido a que la $p\text{CO}_2$

atmosférica no varía mucho estacionalmente (Mogollón, R. 2020). El segundo factor está relacionado, en conjunto, con la SST y la velocidad del viento, debido a la propia parametrización de K_w y K_0 (con una conocida menor influencia de la salinidad). Sin embargo, para facilitar el análisis, se asumió que la variabilidad asociada al factor $(K_w K_0)$ refleja únicamente los cambios en la velocidad del viento. Esto es aceptable dada la opuesta influencia de la SST en K_w y K_0 , los cuales tienden a compensarse.

Los términos involucrados en la variabilidad interanual de los flujos de CO_2 (Figura 2a) corresponden a las variaciones en el viento (Figura 2b), contenido de CO_2 (Figura 2c) y la contribución del viento y del contenido de CO_2 , en conjunto (Figura 2d). Dicho en otras palabras, y a modo de ejemplo, la Figura 2c muestra cómo serían las anomalías espaciales del flujo de CO_2 si se induce una variación en $\Delta p\text{CO}_2$ y se mantiene constante el resto de los factores.}

Como se aprecia, la variabilidad del flujo de CO_2 es más sensible a las variaciones de la $\Delta p\text{CO}_2$ (Figura 2c) que a la asociada a los cambios en la velocidad del viento (Figura 2b), mientras que la contribución asociada a cambios en el contenido de CO_2 y en el viento en conjunto es de menor proporción (Figura 2d). La Figura 2e muestra la variación temporal de estos términos y se nota más claramente que las variaciones del viento (en azul) tienden a compensar parcialmente las variaciones en el contenido de CO_2 (en rojo).

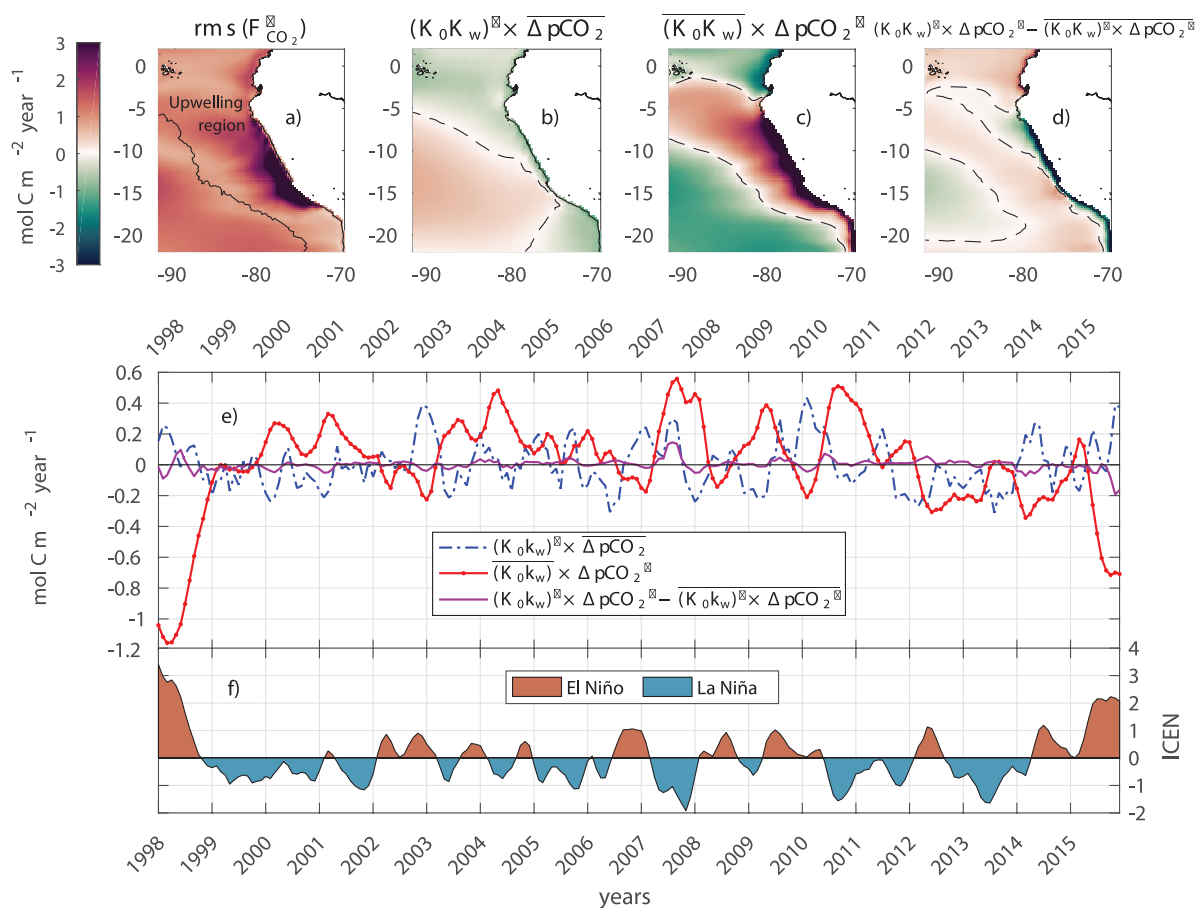


Figura 2. a) Sensibilidad de los factores involucrados en el cálculo del flujo de CO_2 . b) Contribución de la velocidad del viento. c) Contribución del contenido de CO_2 en el agua de mar. d) Contribución del viento y del contenido de CO_2 en conjunto. e) Serie temporal de los términos. f) ICEN.

FLUJOS DE CARBONO INTEGRADO

Al integrar espacialmente los flujos de CO_2 a lo largo de la región de afloramiento costero y ecuatorial adyacente del SNCH (representado una área total de $2.86 \times 10^6 \text{ km}^2$), se estima una tasa de stock de carbono de 28.4 y 56.4 Tg C año^{-1} durante un episodio promedio El Niño y La Niña, respectivamente. Si se considera que un episodio promedio El Niño/La Niña dura aproximadamente un año, y dado que el promedio climatológico se calculó en 53.1 Tg C año^{-1} (periodo 1998-2015), se puede inferir que se deja de emitir, aproximadamente, 24.7 Tg C durante un episodio El Niño. Similarmente, se infiere que 3.3 Tg C son emitidos adicionalmente hacia la atmósfera durante un episodio de La Niña promedio. En otras palabras, El Niño representaría un periodo donde la región más productiva del SNCH retiene cerca de 24.7 millones de toneladas métricas de carbono que normalmente se hubieran perdido hacia la atmósfera.

CONCLUSIONES

En conclusión, durante eventos El Niño, se aprecia que la contribución del aumento de la velocidad del viento tiende a aumentar el flujo de CO_2 , del océano a la atmósfera, al estimular el intercambio gaseoso en la interfase aire-mar. Contrariamente, la contribución de las variaciones en la $\Delta p\text{CO}_2$ induce a una disminución en la magnitud de los flujos de CO_2 , lo cual es concordante con la observada disminución de DIC durante la fase El Niño. Por otro lado, durante eventos La Niña, el comportamiento es opuesto.

Se demostró también otro efecto positivo asociado a un episodio El Niño, pues una gran cantidad de carbono se deja de emitir hacia la atmósfera, lo que indica que las costas altamente productivas, como el mar peruano, son regiones clave para un cómputo más realista del balance de carbono a nivel global. Estas generalizaciones deben ser tomadas con cautela porque cada episodio El Niño/La Niña tiene características únicas y lo que aquí se muestra corresponde a un comportamiento promedio relacionado al índice costero considerado.

REFERENCIAS

- Bakun, A., & Weeks, S. J. (2008). The marine ecosystem off Peru: what are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold?. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 290-299.
- Chamorro, A., Echevin, V., Colas, F., Oerder, V., Tam, J., & Quispe-Ccalluari, C. (2018). Mechanisms of the intensification of the upwelling-favorable winds during El Niño 1997–1998 in the Peruvian upwelling system. *Climate Dynamics*, 51(9), 3717-3733.
- Chavez, F. P., Strutton, P. G., Friederich, G. E., Feely, R. A., Feldman, G. C., Foley, D. G., & McPhaden, M. J. (1999). Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño. *Science*, 286(5447), 2126-2131.

Colas, F., Capet, X., McWilliams, J. C., & Shchepetkin, A. (2008). 1997–1998 El Niño off Peru: A numerical study. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 138-155.

Doney, S. C., Lima, I., Feely, R. A., Glover, D. M., Lindsay, K., Mahowald, N., ... & Wanninkhof, R. (2009). Mechanisms governing interannual variability in upper-ocean inorganic carbon system and air–sea CO₂ fluxes: Physical climate and atmospheric dust. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), 640-655.

Echevin, V., Albert, A., Lévy, M., Graco, M., Aumont, O., Piétri, A., & Garric, G. (2014). Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves. *Continental Shelf Research*, 73, 14-30.

Espinoza & Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., & Graco, M. (2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7), 5423-5444.

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., ... & Quispe-Ccalluari, C. (2018). Oxygen variability during ENSO in the tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5, 526.

Feely, R. A., Wanninkhof, R., Takahashi, T., & Tans, P. (1999). Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation. *Nature*, 398(6728), 597-601.

Friederich, G. E., Walz, P. M., Burczynski, M. G., & Chavez, F. P. (2002). Inorganic carbon in the central California upwelling system during the 1997–1999 El Niño–La Niña event. *Progress in Oceanography*, 54(1-4), 185-203.

Friederich, G. E., Ledesma, J., Ulloa, O., & Chavez, F. P. (2008). Air–sea carbon dioxide fluxes in the coastal southeastern tropical Pacific. *Progress in Oceanography*, 79 (2-4), 156-166.

Mogollón, R., & Calil, P. H. (2017). On the effects of ENSO on ocean biogeochemistry in the Northern Humboldt Current System (NHCS): A modeling study. *Journal of Marine Systems*, 172, 137-159.

Mogollón, R., & Calil, P. H. (2018). Modelling the mechanisms and drivers of the spatiotemporal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the Northern Humboldt Current System. *Ocean Modelling*, 132, 61-72.

Mogollón, R. (2020). ENSO-driven CO₂ efflux variability and the role of the upwelling region on the carbon exchange in the Northern Humboldt Current System. *Journal of Marine Systems*, 201, 103240.

Montes, I., Colas, F., Capet, X., & Schneider, W. (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.

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

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(8), 5515-5532.

Ñiquen, M., & Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep sea research part II: topical studies in oceanography*, 51(6-9), 563-574.

Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P., & Caron, J. M. (2002). Interannual variations in the atmospheric heat budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D8), doi:10.1029/2000JD000297

AVANCE DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA ACOPLADO REGIONAL COW PARA EL PACÍFICO SUDESTE

Berlin Segura¹ e Ivonne Montes¹

RESUMEN

En este estudio se muestran los resultados preliminares del análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional CROCO-OASIS-WRF (COW), implementado para el sistema océano-atmósfera del Pacífico sudeste, haciendo uso de la infraestructura computacional del IGP denominada HPC-Linux-Cluster. Para este objetivo, se configuran dos simulaciones acopladas que son casi idénticas, ya que difieren en la versión del modelo atmosférico que están utilizando. Los resultados preliminares muestran que las configuraciones del modelo acoplado simulan con alta correlación el Índice Costero El Niño (ICEN) y, por lo tanto, son útiles para estudiar los procesos de interacción océano-atmósfera en el Pacífico Sudeste.

Palabras clave: *Modelo Acoplado, Sistema océano-atmósfera del Pacífico sudeste, Índice costero El Niño (ICEN).*

AFILIACIÓN:

1. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Citar como: Segura, B., Montes, I. (2021). Análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional COW para el Pacífico sudeste. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 8 n.º 02. págs. 12-17.

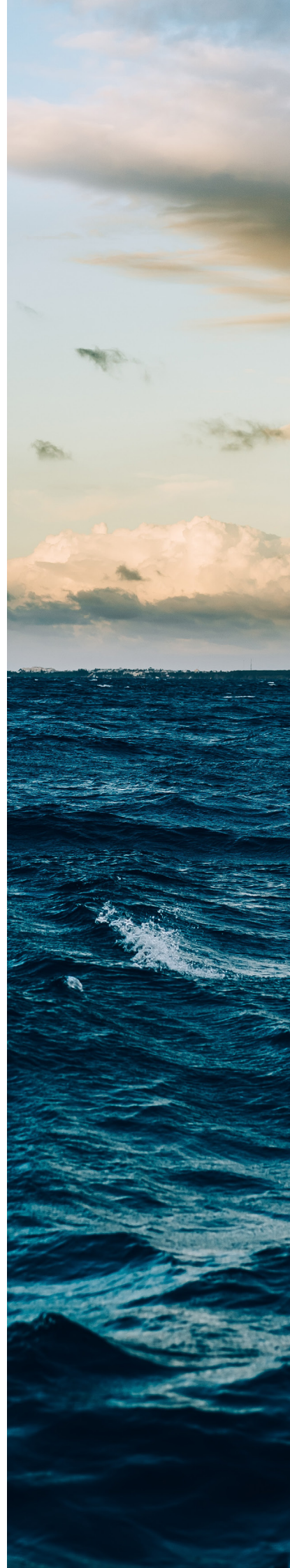
INTRODUCCIÓN

Frente a la costa peruana se desarrolla una fuerte interacción entre el océano y la atmósfera que gatilla una serie de procesos dinámicos, los cuales determinan las características oceanográficas del borde este del océano Pacífico sudeste. Sin embargo, la poca distribución espacio-temporal de datos limita el entendimiento de la dinámica compleja; que incluye las corrientes oceánicas a lo largo de la costa (hacia el ecuador en superficie y hacia el polo sur en la región subsuperficial), actividad de mesoescala, afloramiento costero permanente, filamentos, entre otros. Por otro lado, el uso de modelos regionales ha demostrado ser útil para estudiar la dinámica del océano, la atmósfera y la retroalimentación entre ambos.

Para el Pacífico este, por ejemplo, el uso de modelos numéricos del océano ha permitido entender que la variabilidad intraestacional de la temperatura superficial del mar es gobernada por el forzamiento atmosférico local (Illig et al., 2014), también que los mecanismos de propagación de las ondas ecuatoriales y su efecto en la temperatura dependen de varios factores (e.g., Mosquera-Vasquez et al., 2013; Illig et al., 2014). Asimismo, los modelos numéricos han permitido entender la relación dinámica entre las corrientes ecuatoriales subsuperficiales y la corriente subsuperficial de Perú-Chile (PCUC), principal fuente de agua para el afloramiento costero bajo condiciones normales (Montes et al., 2010), y los efectos relacionados a la variabilidad asociada a El Niño-Oscilación del Sur, que altera la contribución de agua de las corrientes ecuatoriales al sistema de afloramiento del Perú (Montes et al., 2011).

Recientemente se vienen desarrollando y empleando modelos acoplados oceánicos-atmosféricos, es decir, aquellos que incorporan tanto un modelo oceánico para tener toda la dinámica del océano como un modelo atmosférico para tener la dinámica de la atmósfera, de tal manera que trabajen juntos mediante un “acoplador”. Los modelos acoplados permiten investigar la interacción entre la dinámica y la termodinámica que ocurre entre el océano y la atmósfera de una manera más compleja. Por ejemplo, Renault et al. (2019) mostraron que se corrigen los sesgos en la representación de la Corriente del Golfo y la Corriente de Agulhas al emplear simulaciones acopladas océano-atmósfera; debido a los cambios en la cascada de energía inversa, responsable de la estabilización de la Corriente del Golfo y de la posición de retroflexión de la Corriente de Agulhas observada.

Por tanto, una de las estrategias que se viene desarrollando en el Instituto Geofísico del Perú (IGP) para entender los procesos dinámicos entre el océano y la atmósfera es la implementación de un sistema acoplado regional para el Pacífico sudeste. A continuación, se presenta el trabajo preliminar respecto al análisis de sensibilidad asociada a los cambios en las versiones del modelo atmosférico, que es utilizado por el modelo acoplado. Este artículo se enfoca en evaluar las simulaciones del Índice Costero El Niño (ICEN)



DESARROLLO

MODELO ACOPLADO

Para el presente trabajo se ha implementado el modelo numérico acoplado regional océano-atmósfera, el cual está construido en base al modelo oceánico CROCO (Coastal and Regional Ocean COMMunity model; Debreu et al., 2012), el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting model; Skamarock et al., 2019) y el acoplador OASIS (Ocean Atmosphere Sea Ice Surface; Valcke., 2013). El modelo acoplado regional se denomina Sistema acoplado regional CROCO-OASIS-WRF (COW, Figura 1) en la versión 3.6 (COWv3.6) y 4 (COWv4); para lo cual se usó la infraestructura computacional denominada «Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos computacional “HPC-Linux-Cluster”» del IGP.

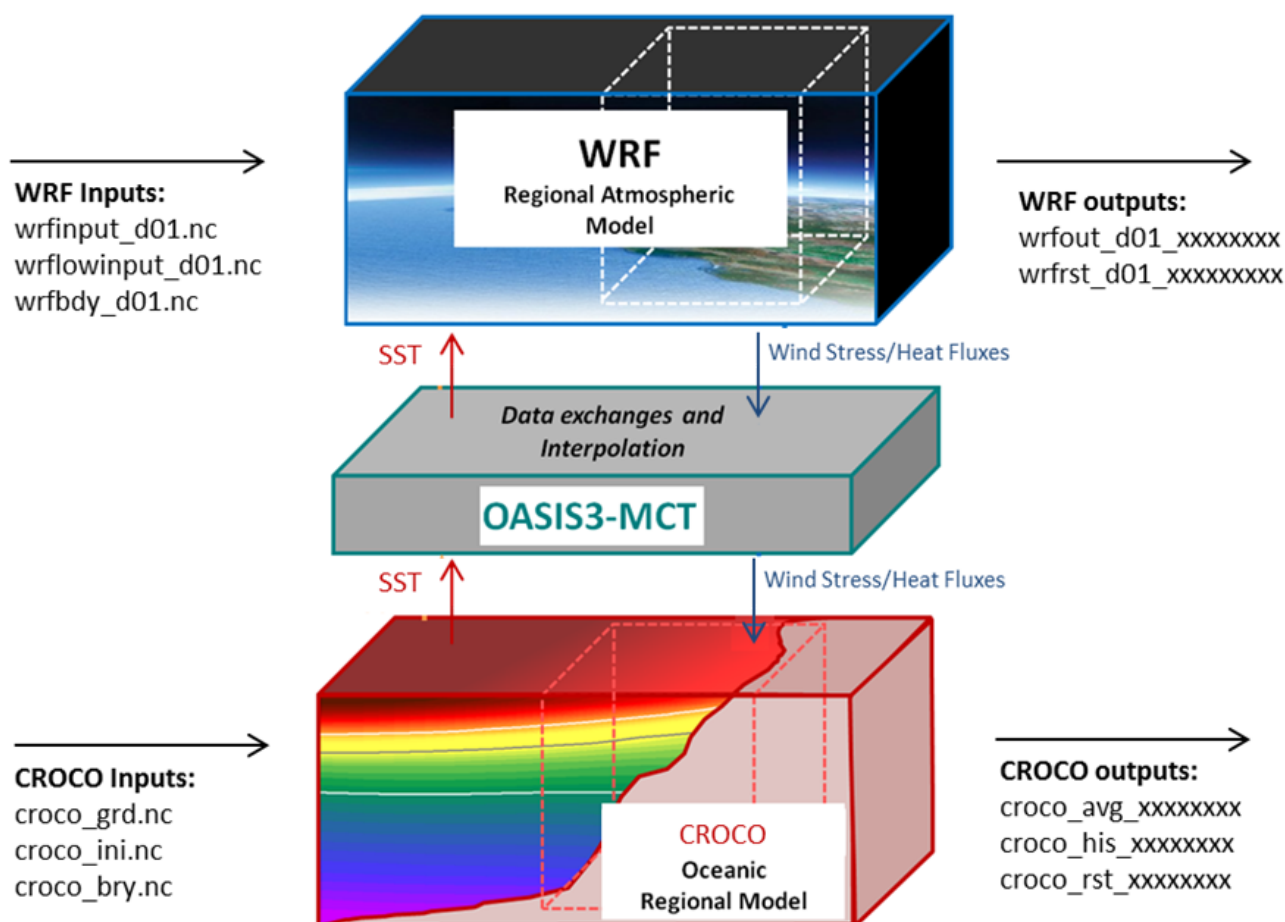


Figura 1. Esquema del acoplamiento regional CROCO-OASIS-WRF (COW), extraído de Cambon et al. (2014): el modelo WRF usa datos de entrada y frontera (WRF Inputs: wrfinput, wrflowinput, wrfbry) envía el esfuerzo de viento y flujo de calor al acoplador OASIS3-MCT, donde se interpola y lo envía al modelo CROCO, que utiliza datos de entrada y frontera (CROCO Inputs: croco_grd, croco_ini, croco_bry) y envía la TSM (SST) al acoplador que lo interpola y lo envía al modelo WRF, luego genera los datos de salida y reinicio (WRF Outputs: wrfout y wrfst), y envía el esfuerzo de viento y flujo de calor al acoplador que interpola y lo envía al modelo CROCO que genera los datos de salida (CROCO Outputs: croco_avg, croco_rst).

ACOPLAMIENTO OCEÁNICO-ATMOSFÉRICO REGIONAL

Para el presente estudio se han realizado dos simulaciones con el modelo acoplado cuyas configuraciones son casi idénticas, COWv3.6 y COWv4, ya que difieren en la versión del modelo atmosférico que están utilizando: WRF versiones 3.6 y 4, respectivamente. Además, cada simulación ha utilizado diferentes esquemas para representar la capa límite planetaria (PBL1 - Hong et al., 2006; PBL5 - Nakanishi y Niino, 2006) y para la microfísica (MP2 - Lin et al., 1983; MP6 - Hong y Lim, 2006). Para la representación de los cúmulos ambos utilizaron el esquema Kain-Fritsch (Kain, 2004).

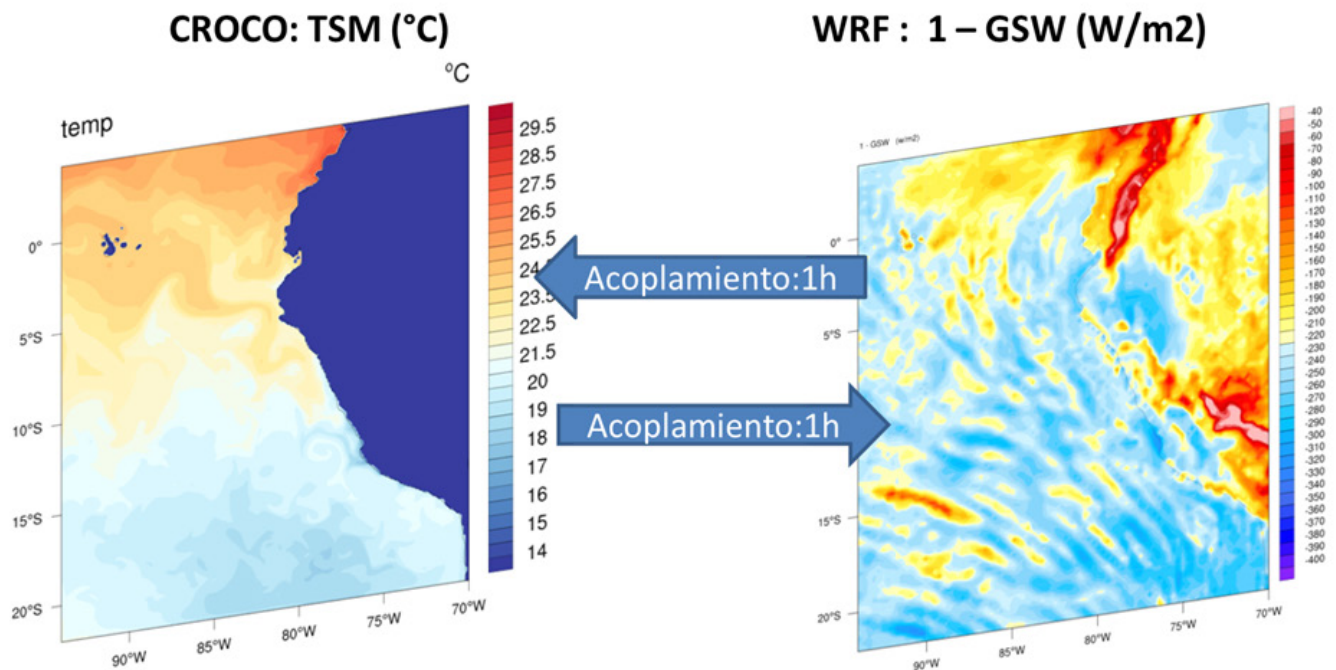


Figura 2. Esquema del acoplamiento entre el WRF y CROCO. WRF envía al CROCO, cada hora, los promedios horarios del flujo radiativo neto de onda corta (GSW); mientras que el CROCO envía al WRF, cada hora, el promedio horario de la TSM.

El acoplador *Ocean Atmosphere Sea Ice Surface - Model Coupling Toolkit* (OASIS3-MCT, Valcke, 2013) fue desarrollado por el Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Computación Científica (CERFACS, por sus siglas en francés) de Francia y el Laboratorio Nacional Argonne (ANL por sus siglas en inglés) de USA. Su principal función es intercambiar e interpolar los campos de acoplamiento entre ambos modelos CROCO y WRF. El WRF envía al CROCO, cada hora, los promedios horarios del esfuerzo de viento zonal y meridional, flujos radiativos de onda corta y larga, y los flujos de agua fresca (evaporación-precipitación); mientras que el CROCO envía al WRF, cada hora, el promedio horario de la temperatura superficial del mar (TSM, Figura 2).

CROCO está usando SODA (Simple Ocean Data Assimilation, Carton et al., 2018): para las condiciones iniciales se usan los datos de agosto de 1999 y los datos mensuales entre 08-1999 y 12-2015 para las condiciones de frontera. Mientras que para WRF se usan datos, cada 6 horas, del NCEP FNL (Operational Model Global Tropospheric Analyses) en el periodo 2000-2015.

DATOS

Para la validación de los resultados de COWv3.6 y COWv4 se calcula el ICEN (Índice Costero El Niño; Takahashi et al., 2014) referido a la media móvil de tres meses de la anomalía de la TSM en la región Niño 1+2, obtenida de los datos de la TSM en tiempo real de la fuente ERSST v3b menos la climatología del periodo 1981-2010. Además, se hará uso del producto OISST AVHRR, es decir la TSM de interpolación óptima diaria del satélite/sensor (NOAA/AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer) de resolución 25 km, para calcular el ICEN también.

RESULTADOS PRELIMINARES

Con relación al índice costero ICEN, la Figura 3 muestra el análisis comparativo de las series de tiempo calculadas a partir de los datos observados (AVHRR) y los simulados (COWv3.6 y COWv4) donde se aprecia que todas las curvas se ajustan a los valores reales. Sin embargo, los resultados de la correlación indican que la anomalía mensual de la TSM observado por ICEN es mejor simulada por el modelo COWv4 (0.71) seguido del COWv3.6 (0.60).

Por otro lado, se observa que la anomalía de la TSM es sobreestimada para el 2002, esto fue simulado con mayor magnitud por COWv3.6 que por COWv4, debido a que el flujo de radiación de onda corta (GSW) es mayor sobre la región costera. Mientras que ambas simulaciones acopladas muestran una intensidad que se aproxima a lo observado para los fenómenos La Niña fuerte de 2007, 2010 y 2013 y El Niño fuerte del 2015 (Figura 3).

Adicionalmente, se ha validado la TSM, la temperatura del aire, la precipitación y el viento para toda la región de estudio mostrando que ambas simulaciones son útiles para estudiar los procesos dinámicos y termodinámicos del Pacífico sudeste, lo cual es materia de investigación en curso.

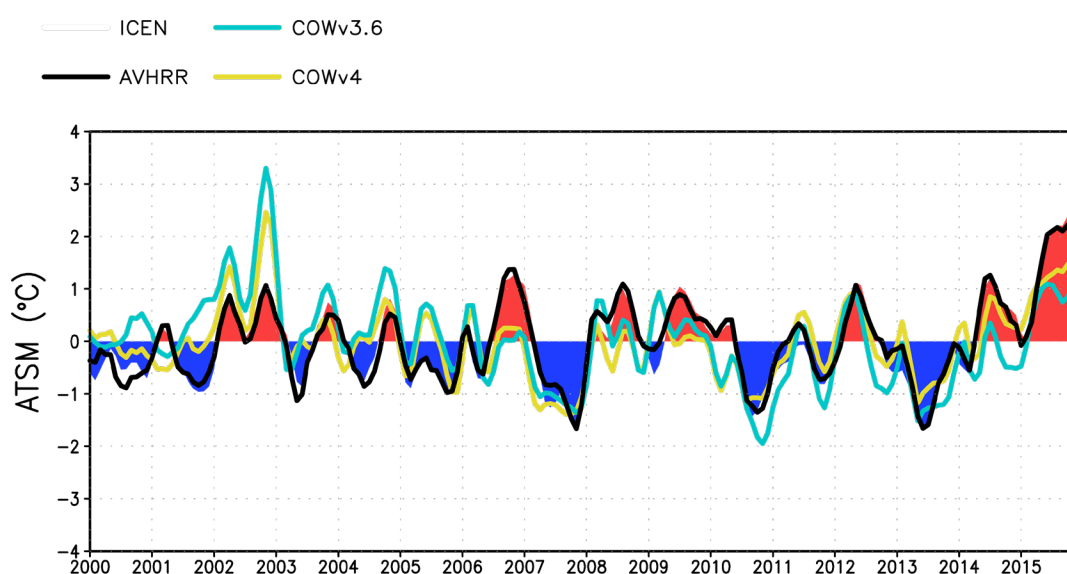


Figura 3. Serie de tiempo de la media móvil de 3 meses de la anomalía mensual de la TSM simulada por COWv3.6 y COWv4, así como observada de AVHRR e ICEN para la región Niño 1+2 en el periodo 2000-2015.

REFERENCIAS

Cambon et al. (2014). The ROW Coupled System, Workshops ROMS/TOMS, Croatia.

Carton, J., Chepurin, G., y Chen, L. (2018). SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis. *Journal of Climate*, 31, 6967-6983, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.

Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1–21.

Hong, S., Noh, Y., y Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341. <http://dx.doi.org/10.1175/MWR3199.1>

Hong, S., y Lim, J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.

Illig, S., Dewitte, B., Goubanova, K., Cambon, G., Boucharel, J., Monetti, F., Romero, C., Purca, S., Flores, R. (2014). Forcing mechanisms of intraseasonal SST variability off central Peru in 2000-2008. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 119, 3548-3573, 10.1002/2013jc009779

Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 43, 170-181.

Lin, Y., Farley, R., y Orville, H. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *Journal of Climate Applied Meteorology*, 22, 1065–1092.

Montes, I., Colas, F., Capet, X., y Schneider, W. (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., Schneider, W., Colas, F., Blanke, B., y Echevin, V. (2011). Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999–2001 and El Niño 2002–2003. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12), doi:10.1029/2011JC007624.

Mosquera-Vásquez, K., Dewitte, B., Illig, S., Takahashi, K., y Garric, G. (2013). The 200203 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research, Oceans*, doi:10.1029/2012JC008551

Nakanishi, M., y Niino, H. (2006). An Improved Mellor-Yamada Level 3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397-407. <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>

Renault, L., Marchesiello, P., Masson, S., y McWilliams, J.C. (2019). Remarkable control of western boundary currents by Eddy Killing, a mechanical air-sea coupling process. *Geophysical Research Letters*, 46 (5), 2743-2751. ISSN 0094-8276

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J., Duda, M., Barker, D., y Huang, X. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97

Takahashi, K., Mosquera, K., y Reupo, J. (2014). El Índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización. *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Instituto Geofísico del Perú, Febrero, 1, 2, 8-9.

Valcke, S. (2013). The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software, *Geoscientific Model Development*, 6(2), 373–388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013.

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE EL NIÑO

PP n.º 068/EL NIÑO-IGP/2021-1



Foto: Roger Manay

El valor del Índice Costero El Niño (ICEN) para diciembre (-0.88°C) presenta una condición climática neutra, la misma condición se observa con los valores temporales del ICEN (ICENtmp) para los meses de enero y febrero de 2021. Por otra parte, para el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para el mes de diciembre (-1.19°C) presenta la condición fría moderada, mientras que los valores temporales del ONI para enero y febrero de 2021 muestran condiciones frías débiles.

Durante el mes de enero se desarrollaron pulsos de viento del oeste en la zona oriental del Pacífico, los cuales habrían reforzado a otra onda de Kelvin cálida, que se habría formado por la reflexión de una onda de Rossby. La onda de Kelvin cálida habría impactado la costa norte del Perú entre finales de enero e inicios de febrero. Por otro lado, se observa la presencia de un paquete de ondas de Kelvin frías, las cuales se formaron por pulsos de viento del este durante la quincena del mes de enero. Este paquete, según la información *in situ* y de modelos, se encontraría aproximadamente en 110°W .

Las predicciones numéricas de los siete modelos climáticos de NMME, inicializados con la información oceánica y atmosférica del mes de febrero de 2021, continúan indicando, en promedio y hasta agosto de 2021, valores por debajo de su normal, pero sin llegar al rango de las condiciones frías débiles frente a la costa peruana. En el Pacífico central, según los valores observados, se mantiene el desarrollo del evento La Niña y, conforme a los valores pronosticados por los modelos de NMME, continuaría durante el mes de agosto. Cabe señalar que los pronósticos de estos modelos más allá de abril o mayo, son menos precisos debido a la barrera de predictibilidad.

Puede acceder al informe técnico de El Niño 2021-01 en el siguiente link:
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4931>

RESUMEN DEL COMUNICADO OFICIAL ENFEN n.º 2-2021

CALLAO, 12 DE FEBRERO DE 2021

ESTADO DEL SISTEMA DE ALERTA: **NO ACTIVO**¹

La Comisión Multisectorial del ENFEN mantiene el estado del “Sistema de alerta ante El Niño y La Niña Costeros” como “No activo”, debido a que la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2, que incluye la zona norte y centro del mar peruano, se mantendrá dentro de su rango normal al menos hasta mayo 2021.

Por su parte, La Niña en el Pacífico central, que alcanzó en noviembre su máxima intensidad (moderada), se ha debilitado desde entonces y continuaría con magnitud débil hasta el otoño; sin embargo, aún podría contribuir a la ocurrencia de lluvias superiores a lo normal en la sierra central y sur, así como en algunos sectores de la selva en lo que resta del verano.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando e informando sobre la evolución de las condiciones oceánicas y atmosféricas, y actualizando sus perspectivas.



ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO “EL NIÑO”

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO “EL NIÑO” (ENFEN)
DECRETO SUPREMO n.º 007-2017-PRODUCE

¹El Estado del Sistema de Alerta “No Activo” se da en condiciones neutras o cuando la Comisión ENFEN espera que El Niño o La Niña costeros están próximos a finalizar

Puede acceder al Comunicado Oficial del ENFEN n.º 02-2021 en el:
<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-02-2021/>
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4926>

Redes IGP:

<https://www.gob.pe/igp>

 <https://web.facebook.com/igp.peru>

 https://twitter.com/igp_peru

 https://www.youtube.com/c/IGP_videos