

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

DOS CARACTERÍSTICAS NO-LINEALES DE EL NIÑO-OSCILACIÓN SUR (ENOS) EN OBSERVACIONES Y MODELOS CMIP5

Juan Sulca¹

RESUMEN

Existen pocos estudios que describen las características no-lineales de El Niño-Oscilación Sur (ENOS) tales como: a) el coeficiente principal de la función cuadrática entre las dos primeras componentes principales de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre el Pacífico ecuatorial (i. e., parámetro cuadrático α) y b) la retroalimentación no-lineal de Bjerknes asociados con El Niño central y oriental, caracterizados a través de la no-linealidad de los índices C y E, respectivamente. Para abordar estas características, se utilizan en conjunto datos observados de esfuerzo de viento zonal y radiación de onda larga saliente (OLR, por sus siglas en inglés) y simulaciones históricas y atmosféricas (AMIP) pertenecientes al Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados de la Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés).

Los resultados muestran que la mayoría de los modelos CMIP5 subestiman la TSM sobre el Pacífico este (E), lo cual podría limitar la caracterización de la no-linealidad de El Niño central y oriental. También se muestra que 8 de los 21 modelos históricos del CMIP5 que simulan un parámetro cuadrático negativo ($\alpha < 0$) también simulan la retroalimentación no-lineal de Bjerknes. Lo contrario no ocurre necesariamente. El reducido número de modelos CMIP5 que simulan la retroalimentación no-lineal de Bjerknes se debe a que la mayoría de los modelos CMIP5 simulan una relación lineal entre C y las anomalías de esfuerzo del viento zonal sobre el océano Pacífico central.

Estos resultados nos permiten seleccionar ocho de los modelos CMIP5 que simulan dos características no-lineales de ENOS para estudiar la dinámica no-lineal de El Niño central y oriental e incluso sus impactos en las lluvias y temperaturas del Perú.

El artículo científico original se encuentra en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.6998>

Palabras clave: La no-linealidad de ENOS (α), retroalimentación no-lineal de Bjerknes, El Niño central y oriental, CMIP5

AFILIACIÓN:

1- Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Citar como: Sulca, J., (2021). Dos características no-lineales de El Niño-Oscilación Sur (ENOS) en observaciones y modelos CMIP5. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 8 n.º 03, págs. 5-14.

INTRODUCCIÓN

El Niño-Oscilación Sur (ENOS) es un fenómeno oceánico-atmosférico que modula la variabilidad interanual del Pacífico tropical (Neelin et al., 1998) y al mismo tiempo las temperaturas y lluvias del resto del globo (Ropelewski & Halpert 1987). El Niño es la fase cálida de ENOS y La Niña es la fase fría. Las anomalías meteorológicas a gran escala asociadas con las condiciones de El Niño y La Niña se han documentado en todo el mundo a través de las teleconexiones atmosféricas y oceánicas (Ropelewski & Halpert 1987; Trenberth et al., 1998; McPhaden et al., 2006).

En la última década, el número de estudios sobre la dinámica no-lineal de los diferentes tipos de eventos de El Niño/La Niña ha aumentado (Takahashi et al., 2011; Capotondi et al., 2015; Takahashi & Dewitte, 2016). Capotondi et al. (2015) resaltaron que la mayoría de los estudios identifica la diversidad de El Niño a través de los patrones de la temperatura superficial del mar (TSM) del Pacífico ecuatorial. Takahashi et al. (2011) encontraron que la superposición de la variabilidad del Pacífico central y oriental —identificados con los índices C y E, respectivamente— describen la variabilidad de la TSM del Pacífico ecuatorial.

Utilizando los índices C y E, Takahashi & Dewitte (2016; en adelante TD16) mostraron que, comparando observaciones con simulaciones largas del modelo acoplado GFDL CM2.1, los episodios extremos de El Niño tienen comportamientos dinámicos bastante diferenciados. En TD16 se propone que la retroalimentación de Bjerknes (i. e., las superficie oceánicas que se calientan inducen anomalías de vientos del oeste que luego contribuyen al calentamiento inicial) es un proceso no-lineal en el Pacífico tropical central y oriental que explica cómo los episodios moderados de El Niño se intensifican para convertirse en episodios extremos de El Niño cuando la temperatura (T) supera un valor crítico (T_c) llamado C_{crit} y E_{crit} en el Pacífico tropical central y oriental, respectivamente. El umbral E_{crit} está asociado con la activación de la convección profunda de gran escala sobre la región más oriental del Pacífico tropical, la cual es climatológicamente fría, una vez que T_c excede 26°C (Jauregui & Takahashi, 2018).

Las simulaciones preindustriales son simulaciones acopladas control para el periodo preindustrial (1850-1900). Estas simulaciones se caracterizan por la prescripción del uso del suelo y la prescripción de la concentración de diferentes tipos de gases y aerosoles (i. e., ellos no evolucionan). Trabajando con simulaciones preindustriales (piControl, ~500 años) de los modelos climáticos globales (GCM, siglas en inglés) acoplados del Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados en fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) (Taylor et al., 2012; <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>), Karamperidou et al. (2017) definieron el parámetro α para cuantificar una característica no-lineal de ENOS en el clima presente. El parámetro α es el coeficiente principal del ajuste cuadrático de la forma $PC2 = \alpha \times PC1^2 + b \times PC1 + c$ en el plano $PC1-PC2$. Los autores encontraron que los modelos de circulación general con α mayores a -0.12 (α_{obs}) simulan la retroalimentación de ENOS en estrecha concordancia con las observaciones. Además,

los GCMs con α cercanos a cero o positivos tergiversan en gran medida la retroalimentación de la termoclina y subestiman la amortiguación termodinámica sobre el Pacífico oriental.

El objetivo principal de este estudio es describir las dos características no-lineales del ENOS en observaciones y en los modelos CMIP5 usando las metodologías propuestas en Takahashi & Dewitte (2016) y Karamperidou et al. (2017). Los resultados de este estudio permitirán identificar los modelos CMIP5 más adecuados para estudiar la dinámica no-lineal de ENOS y la estructura vertical de la convección profunda asociadas a episodios extremos de El Niño en el Pacífico este, generando así nuevas herramientas para el monitoreo del fenómeno El Niño.

DATOS Y METODOLOGÍA

Para describir el cambio de la TSM, se utilizó el conjunto de datos denominado Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST v4; Huang et al., 2014). El conjunto de datos de ERSST v4 tiene una resolución horizontal de $2^\circ \times 2^\circ$ y está disponible desde enero de 1854 hasta marzo del 2020.

Este estudio utilizó los índices C y E de El Niño (Takahashi et al., 2011) para la caracterización de las anomalías de la TSM del Pacífico central y oriental, respectivamente. Estos índices se calcularon a partir de los datos de ERSST v3b y están disponibles en el sitio web de IGP (<http://met.igp.gob.pe/datos/EC.txt>). La ventaja de incluir los índices C y E es su relación lineal deficiente entre ellos.

Se utilizó los datos de TSM, esfuerzo de viento zonal y OLR de las simulaciones AMIP e históricas de los modelos del proyecto CMIP5. Todos los datos grillados son interpolados bilinealmente a una resolución de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

Para medir una de las características no-lineales del ENOS en las observaciones y simulaciones AMIP e históricas de los modelos CMIP5, se utilizó la métrica α (Karamperidou et al., 2017). El parámetro cuadrático α es el coeficiente principal del ajuste cuadrática de la relación entre las dos primeras componentes principales de la TSM (PC1 y PC2), la cual presenta la siguiente ecuación:

$$PC2 = \alpha \times PC1^2 + b \times PC1 + c \quad (1)$$

Para comparar la no-linealidad de los índices C y E entre las observaciones y simulaciones AMIP e históricas del CMIP5, se definieron dos índices de anomalías de esfuerzo de viento zonal (τ_{uu} , $N\ m^{-2}$) y radiación de onda larga saliente (OLR, por sus siglas en inglés $W\ m^{-2}$) sobre el Pacífico central y oriental ($160^\circ - 130^\circ W$, $5^\circ S - 5^\circ N$ y $150^\circ E - 180^\circ W$, $5^\circ S - 5^\circ N$, respectivamente). Luego, ambos índices se estandarizaron para homogenizar la escala de las observaciones y todos los modelos CMIP5 para la comparación entre ellos.

Para establecer si las simulaciones AMIP e históricas de los modelos CMIP5 reproducen la no-linealidad de la convección profunda asociada a eventos extremos a El Niño sobre la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, se utilizó el parámetro no-lineal ($\frac{H_i}{I_o}$) asociado con la retroalimentación no-lineal de Bjerknes propuesto en TD16. El parámetro ($\frac{H_i}{I_o}$) es definido como la razón de las pendientes de las tendencias de los índices de esfuerzo de viento zonal (τ_{uu}) y OLR por encima (H_i) y por debajo (I_o) de las temperaturas críticas (E_{crit} y C_{crit}). Se realizó una regresión lineal por partes para identificar los valores críticos y el parámetro ($\frac{H_i}{I_o}$) en las simulaciones AMIP e históricas de los modelos CMIP5. Se utilizó una herramienta del MATLAB llamada ARESLab (Jekabsons, 2015; www.cs.rtu.lv/jekabsons/regression.html).

RESULTADOS

EL PARÁMETRO CUADRÁTICO α EN LOS MODELOS CMIP5

La Figura 1 muestra el amplio rango de valores del parámetro cuadrático α entre los GCMs del CMIP5 comparados con las observaciones (Figura 1a). Los datos ERSSTv3b y quince de los 23 modelos CMIP5 simulan α negativo, mientras que los GCMs restantes presentan α positivo (Figura 2). La Figura 2 también muestra que 15 modelos simulan valores negativos de α menores a $-0,1$. Catorce de los modelos CMIP5 simulan valores menores a $-0,12$ (CNRM-CM5, CNRM-CM5-2, FIO-ESM, CCSM4, GFDL-CM3, HadCM3, GISS-E2-H, BNU-ESM, IPSL-CM5B-LR, CMCC-CMS, CISS-E2-R-CC, GISS-E2-R, CMCC-CESM y GFDL-ESM2M), mientras que el modelo CanESM2 tiene un α negativo pero cercano a cero. Estos resultados muestran que 14 de 23 GCMs acoplados del proyecto CMIP5 simulan el parámetro cuadrático α , lo que evidencia que la simulación de esta característica no-lineal de ENOS en los modelos climáticos globales acoplados sigue siendo un gran desafío. Estos mismos resultados también sugieren una diferencia en la simulación de las retroalimentaciones oceánicas, que afectan la profundidad de la termoclina y la intensidad de la TSM, durante eventos extremos de El Niño. Esto es concordante con lo documentado para las simulaciones piControl de los modelos CMIP5 en Karamperidou et al. (2017). Sin embargo, estas diferencias en la profundidad de la termoclina se presentarán en los próximos números de este Boletín.

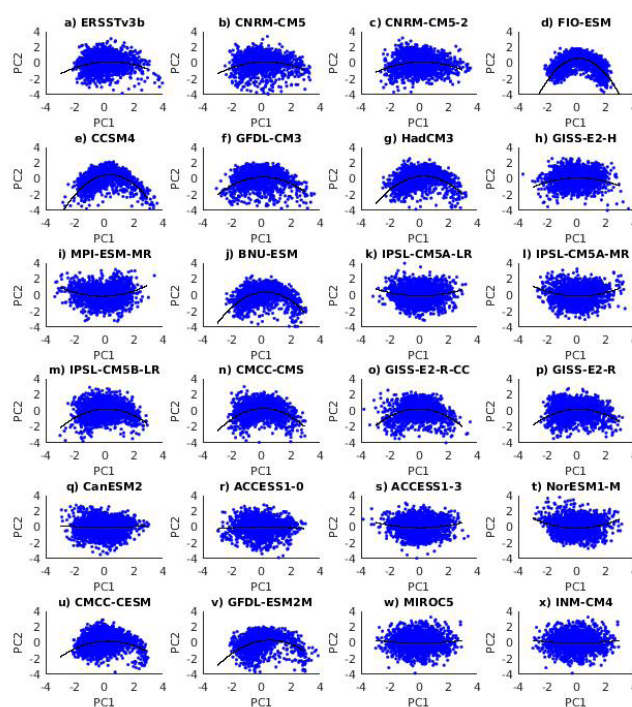


Figura 1. Plano de las dos primeras componentes principales (PC1, PC2) de las anomalías mensuales de TSM en el Pacífico ecuatorial en (a) ERSST v3b y (b – x) simulaciones históricas del proyecto CMIP5, con las curvas cuadráticas ajustadas. El análisis EOF se calcula en el Pacífico tropical limitado latitudinalmente por 10°S-10°N. Figura adaptada de Sulca (2021).

Tabla 1. Los valores críticos (C_{crit} y E_{crit}) y los parámetros ($\frac{H_i}{I_o}$) para los índices del esfuerzo de viento zonal ($N\ m^{-2}$) y OLR ($W\ m^{-2}$) asociados con los índices de El Niño del Pacífico (C y E). En negrita representan los modelos CMIP5 que simulan el comportamiento no-lineal en los dos índices de El Niño del Pacífico (C y E). Este análisis está basado en simulaciones AMIP del CMIP5 para el período 1979-2008. Tabla adaptada de Sulca (2021).

Modelo	AMIP							
	C				E			
	tauu		OLR		tauu		OLR	
	C_{crit}	$(\frac{H_i}{I_o})$	C_{crit}	$(\frac{H_i}{I_o})$	E_{crit}	$(\frac{H_i}{I_o})$	E_{crit}	$(\frac{H_i}{I_o})$
OBS	0	1.54	-0.12	1.98	1.59	3.3	1.49	3.68
ACCESS1-0	*	*	-0.22	1.2	1.51	2.07	1.65	4.32
ACCESS1-3	-0.41	2.11	-0.21	1.36	1.32	2.45	1.34	5.17
CanAM4	-0.48	2.1	*	*	1.39	2.25	1.45	3.54
CMCC-CM	*	*	*	*	*	*	**	**
CNRM-CM5	*	*	*	*	*	*	2.02	5.25
FGOALS	*	*	*	*	2.81	3.05	1.44	3.3
GFDL-CM3	0.1	1.6	-1.05	2.75	2.66	5.67	1.38	5.3
GISS-E2-R	*	*	*	*	1.3	4	1.32	3.61
HadGEM2	-0.35	1.53	*	*	2.46	2.99	3.34	12.78
INM-CM4	*	*	*	*	2.8	5.11	1.33	5.98
IPSL-CM5A-LR	-1.23	3.3	*	*	3.1	4.36	2.49	4.21
IPSL-CM5A-MR	*	*	*	*	1.14	2.16	*	*
IPSL-CM5B-LR	-0.39	3	**	**	*	*	**	**
MPI	-0.43	2.25	-1	2.02	1.14	1.42	0.84	2.7
MIROC5	*	*	*	*	1.37	2.76	1.75	3.46
MRI-CGCM3	*	*	*	*	1.77	2.21	1.39	3.61
Promedio	-0.4	2.18	-0.52	1.86	1.88	3.13	1.66	4.78

* representa un comportamiento lineal.

** representa un comportamiento complejo.

Tabla 2. Los valores críticos (C_{crit} y E_{crit}), el parámetro cuadrático α y los parámetros (H_{lo}) para los índices estandarizados del esfuerzo de viento zonal ($N\ m^{-2}$) y OLR ($W\ m^{-2}$) asociados con los índices de El Niño del Pacífico (C y E). En negrita se representan los modelos CMIP5 que simulan el comportamiento no-lineal en los dos índices de El Niño del Pacífico (C y E). Este análisis está basado en simulaciones históricas del CMIP5 para el período 1850-2005. Tabla adaptada de Sulca (2021).

Modelo	HISTÓRICO								
	α	C				E			
		tauu		OLR		tauu		OLR	
		C_{crit}	$\langle H_{lo} \rangle$	C_{crit}	$\langle H_{lo} \rangle$	E_{crit}	$\langle H_{lo} \rangle$	E_{crit}	$\langle H_{lo} \rangle$
OBS	-0.13	-0	1.54	-0.12	1.98	1.59	3.3	1.49	3.68
ACCESS1-0	-0.03	0.80	5.95	*	*	*	*	-0.37	1.8
ACCESS1-3	0.07	1.36	4.17	0.62	2.15	0.35	1.89	1.82	4.89
BNU	-0.36	0.41	2.94	-0.29	1.6	-0.43	1.5	0.1	2.26
CanESM2	0.02	0.7	6.1	-0.05	2.18	**	**	**	**
CCSM4	-0.44	-0.38	1.81	-0.83	1.96	-0.17	1.74	-0.2	4.32
CMCC-CESM	-0.18	0.49	2.51	0.28	2.75	1.67	2.51	1.28	17.8
CMCC-CMS	-0.28	-1.01	2.35	-1.39	3.51	2.91	17.62	1.32	9.21
CNRM-CM5	-0.14	0.45	2.22	-0.78	2.73	2.83	4.32	0.33	2.54
CNRM-CM5-2	-0.13	1.09	2.49	0.43	1.53	*	*	0.18	2.84
FIO	-0.59	0.23	3.33	*	*	-0.07	1.99	**	**
GFDL-CM3	-0.23	0.64	2.47	1.76	2.84	1.92	1.43	1.76	7.78
GFDL-ESM2M	-0.25	0.98	6.37	-0.1	5.48	1.05	1.85	0.69	6.83
GISS-E2-R-CC	-0.24	0.56	1.35	*	*	*	*	0.92	1.48
GISS-E2-R	-0.2	0.92	1.77	-1.13	1.57	-0.59	2.89	0.65	1.8
GISS-E2-H	-0.12	-0.3	*	-0.77	1.53	-0.88	1.31	1.68	2.77
HadCM3	0.07	-1.42	*	0.29	2.39	0.23	1.88	1.27	5.99
INMCM4	0.04	*	*	-0.31	1.62	2.15	2.01	*	*
IPSL-CM5A-LR	0.09	*	*	*	*	*	*	0.75	2.86
IPSL-CM5A-MR	0.12	*	*	*	*	0.915	2.27	1.42	3.87
IPSL-CM5B-LR	-0.23	0.03	1.87	-1.82	2.64	*	*	0.84	5.94
MIROC5	0.04	**	**	**	**	**	**	**	**
MPI-ESM-LR	0.14	-0.2	1.8	0.77	2.96	*	*	0.76	3.28
NorESM1-M	0.13	-1.27	*	*	**	**	**	0.11	3.57
Promedio	-0.12	0.28	3	-0.2	2.45	0.9	3.23	0.84	4.78

* representa un comportamiento lineal.

** representa un comportamiento complejo.

LA RETROALIMENTACIÓN NO-LINEAL DE BJERKNES EN LOS MODELOS CMIP5

Para el índice C, el conjunto de las simulaciones AMIP subestima los valores de TSM críticos y $\frac{H_i}{l_o}$ asociados con los índices de esfuerzo del viento zonal y OLR ($C_{crit - \tau_{uu}} = -0.4$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 2.18$, $C_{crit - OLR} = -0.52$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 1.86$) en comparación con las observaciones ($C_{crit - \tau_{uu}} = 0$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 1.54$, $C_{crit - OLR} = -0.12$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 1.98$) (Tabla 1). Por el contrario, el conjunto de las simulaciones históricas sobreestima los valores observados de TSM críticos y $\frac{H_i}{l_o}$ asociados con los índices de esfuerzo del viento zonal y OLR ($C_{crit - \tau_{uu}} = 0.28$, $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 3$, $C_{crit - OLR} = -0.2$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 2.45$) (Tabla 2). Estos resultados evidencian que los modelos AMIP y modelos CMIP5 inician la no-linealidad de la convección profunda sobre el Pacífico central a un TSM menor y mayor que el TSM crítico observado (C_{crit} ; TD16). Las simulaciones históricas presentan valores altos de C_{crit} porque tienen un sesgo frío de TSM sobre el Pacífico centro-occidental, el cual debilita la formación de convección profunda y minimiza el aumento de anomalías de esfuerzo del viento zonal en esta región (Kug et al., 2010).

Además, las Tablas 1 y 2 muestran que los 9 de 16 modelos AMIP y 10 de 23 modelos CMIP5 no simulan la relación no lineal observada entre C y τ_{uu} . Esta deficiencia está en concordancia con el predominio de la relación lineal entre el índice Niño 3.4 y la retroalimentación del esfuerzo de viento zonal en las simulaciones AMIP de CMIP5 (Bayr et al., 2018). Todos estos resultados muestran que los modelos AMIP e históricos de CMIP5 tienen una deficiencia para simular la no-linealidad de C. No obstante, esta no-linealidad es mejor reproducida en las simulaciones AMIP.

En cuanto al índice E, la Tabla 1 muestra que el conjunto de las simulaciones AMIP sobreestima los valores de la TSM crítica y el parámetro $\frac{H_i}{l_o}$ de los índices de esfuerzo del viento y OLR ($E_{crit - \tau_{uu}} = 1.88$, $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 3.13$, $E_{crit - OLR} = 1.66$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 4.78$) en comparación con las observaciones ($E_{crit - \tau_{uu}} = 1.59$, $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 3.3$, $E_{crit - OLR} = 1.49$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 3.68$; TD16). Por el contrario, el conjunto de las simulaciones históricas subestima los valores de la TSM crítica y el parámetro $(\frac{H_i}{l_o})$ para los índices E y C (i. e., $E_{crit - \tau_{uu}} = 0.9$, $(\frac{H_i}{l_o})_{\tau_{uu}} = 3.23$, $E_{crit - OLR} = 0.84$ y $(\frac{H_i}{l_o})_{OLR} = 4.78$) (Tabla 2). Estos resultados muestran que los modelos AMIP y modelos CMIP5 inician la convección profunda sobre el Pacífico oriental a un TSM mayor y menor que el Crit observado, respectivamente. Estos resultados también muestran que la mayoría de los experimentos AMIP e históricos del CMIP5 simulan el comportamiento no-lineal de E.

Tres de los 16 modelos AMIP (GFDL-CM2.1, MPI y ACCESS1-3) simulan la no-linealidad de ambos índices de El Niño (C y E) con las anomalías de esfuerzo de viento zonal y OLR (Tabla 1). Ocho de los 21 modelos históricos (BNU, CCSM4, CMCC-CESM, CMCC-CMS, CNRM5, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M y GISS-E2-R) simulan la retroalimentación no-lineal de Bjerknes y no-linealidad de ENOS en ambos índices de El Niño (C y E) (Tabla 2). Estos resultados revelan que todos los modelos históricos que no pueden simular un parámetro cuadrático negativo (i. e., $\alpha < 0$) no simulan la no-linealidad de los índices de El Niño Pacífico (C y E). Sin embargo, los mismos resultados muestran que el modelo ACCESS1-3, que simula un parámetro cuadrático positivo ($\alpha > 0$, Figura 2), simula la no-linealidad de los índices C y E. Por lo tanto, los modelos históricos que simulan un parámetro cuadrático negativo ($\alpha < 0$) tienen una mayor probabilidad de simular la no-linealidad de los índices C y E.

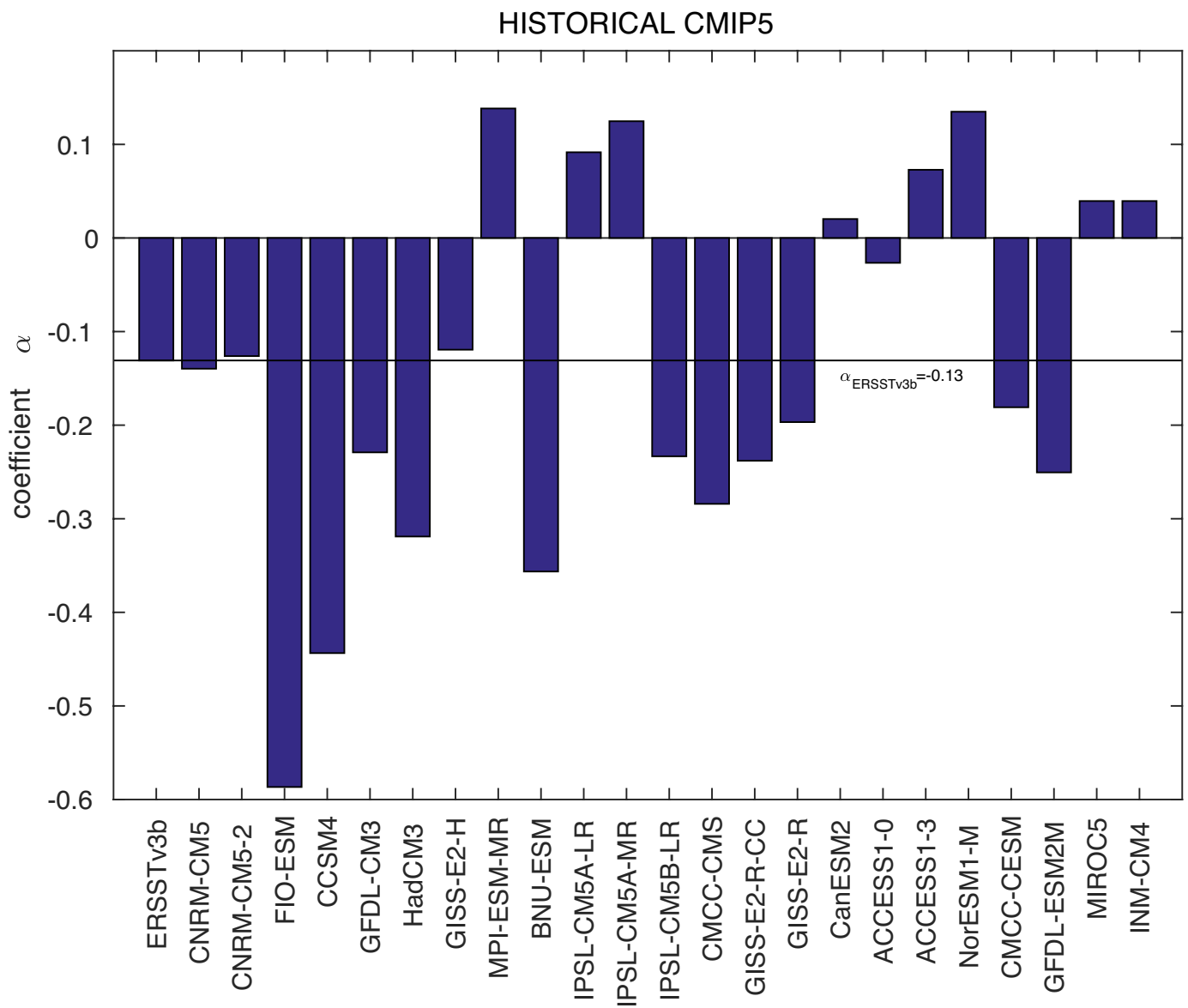


Figura 2. El parámetro cuadrático de no-linealidad (α) en las simulaciones históricas de los modelos CMIP5, definidos como el coeficiente principal del ajuste cuadrático en el plano PC1 y PC2 de anomalías de verano (diciembre-febrero) de la TSM en el dominio del Pacífico tropical. Las líneas negras representan el valor observado (datos ERSST v3b). Figura adaptada de Sulca (2021).

CONCLUSIONES

En un estudio anterior (TD16), se propuso la existencia de la retroalimentación no-lineal de Bjerknes como un proceso físico necesario para intensificar la actividad convectiva sobre el Pacífico tropical oriental que permita pasar de episodios moderados a extremos de El Niño. Sin embargo, la retroalimentación no-lineal no se verificó de manera concluyente porque los autores solo usaron el modelo acoplado GFDL CM2.1. Por otro lado, Karamperidou et al. (2017) propuso el parámetro cuadrático α para cuantificar otro tipo de no-linealidad de ENOS. Sin embargo, no existen estudios sobre la simulación de las dos características no-lineales del ENOS en los modelos CMIP5.

Tres de los 16 modelos AMIP y ocho de los 21 modelos históricos del CMIP5 simulan parámetro cuadrático negativo ($\alpha < 0$) y la no-linealidad de los dos índices de El Niño (C y E). Este reducido número de GCMs se debe a que todos los modelos históricos que simulan un parámetro cuadrático positivo ($\alpha > 0$) no simulan la no-linealidad de C y E, y los modelos históricos que simulan la no-linealidad de C y E no garantizan la simulación de parámetro cuadrático negativo ($\alpha < 0$). Por lo tanto, los GCMs que simulan un parámetro cuadrático negativo tiene una mayor probabilidad de simular la no-linealidad de los índices C y E.

Finalmente, solo ocho de 23 modelos CMIP5 (BNU, CCSM4, CMCC-CESM, CMCC-CMS, CNRM5, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M y GISS-E2-R), basados en la simulación de las dos características no-lineales de ENOS, son los más adecuados para estudiar la dinámica no-lineal de El Niño central y oriental, así como, también, sus teleconexiones atmosféricas.

REFERENCIAS

Bayr, T., Latif, M., Dommenges, D., Wengel, C., Harlaß, J. and Park, W., (2018). Mean-state dependence of ENSO atmospheric feedbacks in climate models. *Climate Dynamics*, 50, 3171–3194. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3799-2>.

Behringer, DW., and Xue, Y., (2004). Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean. Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington, 11–15. Available from: https://ams.confex.com/ams/84Annual/techprogram/paper_70720.htm

Capotondi, A., Wittenberg, AT., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J., Braconnot, P., Cole, J., Dewitte, B., Giese, B., Guilyardi, E., Jin, F., Karneuskas, K., Kirtman, B., Lee, T., Schneider, N., Xue, Y., and Yeh, S., (2015). Understanding ENSO diversity. *Bulletin of American Meteorological Society*, 96, 921–938. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00117.1>.

Huang, B., Banzon, VF., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, TC., Smith, TM., Thorne, PW., Woodruff, SD., and Zhang, H-M., (2014). Extended Reconstructed Sea surface temperature version 4 (ERSST.v4): part I. upgrades and Intercomparison. *Journal of Climate*, 28, 911–930. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00006.1>.

Jauregui, YR., and Takahashi, K., (2018). Simple physical-empirical model of the precipitation distribution in the tropical oceans and the effects of climate change. *Climate Dynamics*, 50, 2217–2237. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3745-3>.

Jekabsons, G., (2015). *ARESLab: adaptive regression splines toolbox for Matlab/Octave v. 1.10.1*. Reference Manual.

Karamperidou, C., Jin, FF., and Conroy, JL., (2017). The importance of ENSO nonlinearities in tropical Pacific response to external forcing. *Climate Dynamics*, 49, 2695–2704. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3475-y>.

Kug, JS., Choi, J., An, SI., Jin, FF., and Wittenberg, A., (2010). Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL 2.1 coupled GCM. *Journal of Climate*, 23, 1226–1239. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3293.1>.

McPhaden, MJ., Zebiak, SE., and Glantz, SE., (2006). ENSO as an integrating concept in Earth Science. *Science*. 314(5806): 1740–1745.

Neelin, J., Battisti, D., Hirst, A., Jin, F., Wakata, Y., Yamagata, T., and Zebiak, S., (1998). ENSO theory. *Journal of Geophysical Research*, 103, 14261–14290. <https://doi.org/10.1029/97JC03424>.

Ropelewski, CF., and Halpert, MS., (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*. 115: 1606–1626. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2).

Sulca, J., (2021). Evidence of nonlinear Walker circulation feedbacks on extreme El Niño Pacific diversity: Observations and CMIP5 models. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.6998>

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., and Dewitte, B., (2011). ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(L10704). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>.

Takahashi, K., and Dewitte, B., (2016). Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 46, 1627–1645. <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>.

Taylor, KE., Stouffer, RJ., and Meehl, GA., (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of American Meteorological Society*, 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Trenberth, KE., Branstator, GW., Karoly, D., Kumar, A., Lau, N., and Ropelewski, C., (1998). Progress during TOGA in understanding and modelling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*. 103(C7), 14291–14324.