

El modo acoplado océano-atmósfera cercano al periodo anual en el Pacífico tropical ecuatorial



Mg. Octavio Fashé Raymundo

PROFESOR PRINCIPAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS (UNMSM)

Magíster en Física con Mención en Geofísica por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) y catedrático de la Facultad de Ciencias Físicas de la misma casa de estudios. Coordinador del Grupo de Investigación en Ciencias de la Tierra, Clima y Medio Ambiente - CTCLIMA, de la Facultad de Ciencias Físicas. Es autor de artículos publicados en revistas internacionales con amplia experiencia en la Gestión del Riesgo de Desastres. Actualmente su investigación se encuentra enfocada en la radiación solar sobre el Valle del Mantaro.

VARIABILIDAD EN EL OCEANO PACÍFICO TROPICAL

Se encuentra bien documentada que la variabilidad del océano Pacífico tropical es dominada por El Niño- Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Philander, 1990). Los mecanismos físicos responsables del ENSO, así como su generación, son ahora mejor comprendidos, lográndose importantes avances desde que en la década de 1980 se dieron los primeros pasos para su predicción (Zebiak y Cane, 1987).

Sin embargo, el ENSO no es la única fuente de variabilidad, pues encontramos señales muy importantes en escalas de tiempo decadales (Tourre et al. 1999; Zhang et al. 1999), bienales (Ropelewski et al., 1992), intra-estacionales (Madden y Julian, 1994) y cercanas a la anual (Mantua y Battisti, 1995; Jin et al. 2003; Fashé y Dewitte, 2013).

La variabilidad cercana a la anual fue considerada, en un inicio, como una expresión de "ruido" durante el modelado de los procesos físicos concernientes al ENSO (Zebiak 1984; Périgaud y Dewitte 1996). En particular, ese modo se interpretó como una señal del tipo resonante del Pacífico ecuatorial, ya que aproximadamente le toma a la onda de Kelvin -y luego a la onda de Rossby reflejada cruzar el Pacífico ecuatorial- un lapso de 9 meses. Además del hecho de que esta variabilidad, que

era prominente en modelos de aguas superficiales, se encontraba poco documentada en las observaciones y se manifiesta como una modulación del ciclo estacional (Jin et al. 2003, Kang et al. 2004, Dewitte et al. 2007).

IDENTIFICACIÓN DEL MODO CERCANO AL ANUAL

La variabilidad cercana a la anual ha sido bien documentada en modelos acoplados océano-atmósfera de diferente complejidad (Jin et al., 2003; Kang et al. 2004; Dewitte et al. 2007). Jin et al. (2003) analiza la existencia del modo cercano al anual en el periodo 1991-2001 basándose en datos de reanálisis NCEP, haciendo un análisis wavelet sobre del índice de anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) en la región Niño 3.4 y describe la presencia del modo cercano al anual en relación con el estado de fondo. La existencia de la variabilidad cercana a la anual en los datos hasta hace poco fue difícil de identificar, debido a que en las observaciones la señal cercana a la anual se encuentra muy próxima a la variabilidad anual (Jin et al. 2003), depende del estado de fondo (Dewitte et al. 2007; Kang et al. 2004), se encuentra inmersa dentro de la variabilidad ENSO o se encuentra amortiguada.

A continuación se presenta un procedimiento para la identificación de la variabilidad cercana a la anual, haciendo uso de herramientas estadísticas (Fashé y Dewitte, 2013) sobre datos de satélite.

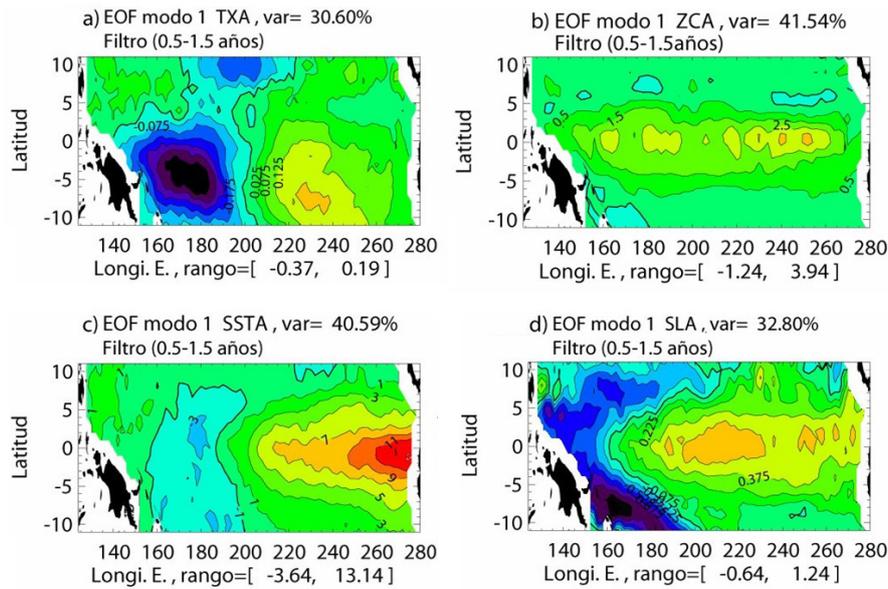


Figura 1. Patrones espaciales del primer modo EOF para: (a) la TXAf, (b) la ZCAf, (c) SSTAf y (d) la SLAf. El porcentaje de la varianza explicada se muestra en la parte superior de los gráficos. CI = 0.05, 1.0, 2.0 y 0.15 unidades, respectivamente.

FUNCIONES ORTOGONALES EMPÍRICAS (EOF)

Con el fin de identificar los patrones dominantes representantes de cambios de largo y corto periodo de variabilidad en el océano Pacífico tropical ecuatorial, se usará el análisis EOF. Los campos estudiados son: la anomalía del esfuerzo de viento zonal [TXA] (CERSAT-IFREMER, 2002), la anomalía de la corriente zonal superficial [ZCA] (Bonjean y Lagerloef, 2002), la anomalía de la temperatura superficial del mar [SSTA] (Wentz y Meissner, 2000) y la anomalía de la altura del nivel del mar [SLA] (AVISO, 2009). Al enfocarse en la variabilidad cercana a la anual, se filtran las señales características de la variabilidad bienal, interdecadal e intraestacional de los datos originales. Para ello se usa un filtro “pasa banda”, el cual restringe la información a periodos que van de 0.5 a 1.5 años, de esta manera se obtiene un conjunto de datos libre de señales de alta y baja frecuencia [TXAf, ZCAf, SSTAf y SLAf].

Iniciando el análisis con la TXAf (Fig. 1a), se observan dos polos definidos al sur de la línea ecuatorial. De forma similar los datos ZCAf muestran (Fig. 1b) un patrón espacial con valores máximos a lo largo del Pacífico central hacia el Pacífico este, indicando que el modo cercano al anual involucra la propagación de ondas. Las anomalías de temperatura superficial del mar (Fig. 1c) muestran una distribución simétrica a lo largo del Ecuador con un máximo a 275°E. Notamos que el patrón espacial de la SSTAf está desplazado zonalmente al este [~15°] en comparación con el patrón espacial de la SSTA, lo que se traduce en una respuesta distinta de la atmósfera entre la señal total [interanual] y el modo cercano al anual. Finalmente, el patrón espacial de la SLAf (Fig. 1d) muestra que los valores de amplitud máximos se encuentran simétricamente distribuidos a lo largo del ecuador desde 180°E hasta la costa oeste americana.

DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES (SVD)

La técnica SVD resulta más adecuada para el estudio de dos campos de diferentes variables a fin de maximizar la covarianza entre ellos, en este caso se aplicará a los campos atmosféricos y oceánicos. Los resultados presentados en la Tabla 1 muestran el análisis SVD de los campos ZCAf, SSTAf y SLAf contra el campo TXAf.

	Modo 1	Modo 2
Campo	Varianza explicada por el SVD (%)	
ZCAf y TXAf	43.03	22.76
	Varianza (%)	Varianza (%)
ZCAf	20.44	13.84
TXAf	21.09	15.34
	Correlación	
	0.8	0.73
SSTAf y TXAf	54.17	30.13
	Varianza (%)	Varianza (%)
SSTAf	32.57	14.52
TXAf	11.65	22.31
	Correlación	
	0.88	0.89
SLAf y TXAf	65.58	14.39
	Varianza (%)	Varianza (%)
SLAf	31.5	13.03
TXAf	20.32	12.26
	Correlación	
	0.89	0.79

Tabla 1. Análisis SVD entre la TXAf y ZCAf, SSTAf y SLAf

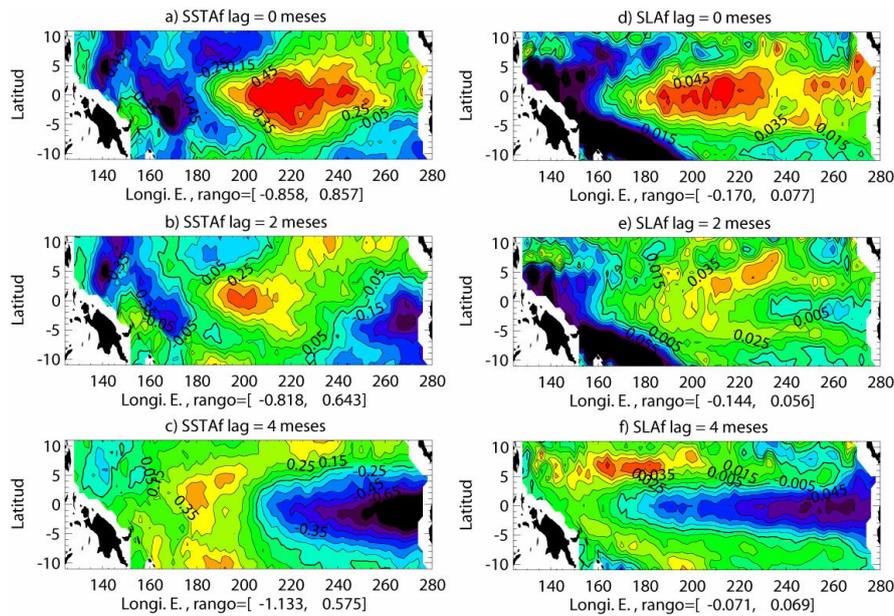


Figura 2. (a)-(c) Compuestos para la SSTAf y (d)-(f) para la SLAf. (a), (d) durante la fase madura, (b), (e) dos meses después de la fase madura y (c), (f) cuatro meses después de la fase madura. Las unidades son $^{\circ}\text{C}$ y m y los CI = 0.1 y 0.01 para SSTAf y SLAf, respectivamente.

PROCESOS EOF Y SVD

Realizando una reconstrucción de los primeros tres modos EOF durante todo el periodo de estudio, observamos que en esencia los campos reconstruidos TXAf, ZCAf, SSTAf y SLAf representan bien a la data original, ya que ellos explican un porcentaje de varianza significativa de la data original, 58.17%, 56.67%, 67.61% y 58.79%, respectivamente.

Un análisis *wavelet* (Fashé y Dewitte, 2013) de las series de tiempo asociadas al primer modo EOF y SVD muestran evidencias claras de actividad cercana a la anual durante el periodo 2000-2003. En dicho periodo, una fluctuación cercana a la anual en la SSTAf y la TXAf entre el 2000 y 2001 se propaga desde el Pacífico este hacia el Pacífico central para la SSTAf y desde el Pacífico central hacia el oeste para la TXAf. En ambas situaciones se puede apreciar que la propagación de la SSTAf y TXAf se produce con la misma velocidad y fase, lo que confirma la naturaleza acoplada del modo cercano al anual. Se realizó un análisis consistente en la elaboración de diferencias entre los compuestos durante las fases maduras cálidas y frías, lo que permite una manera ideal de analizar el comportamiento dinámico de la variabilidad cercana a la anual.

Los patrones espaciales asociados a la diferencia de los compuestos de mapas de fases extrema y de transición para la SSTAf y SLAf se muestran en la figura 2 y para la TXAf y ZCAf en la figura 3. Los compuestos muestran las condiciones durante la fase madura [lag = 0 meses], dos meses después [lag = 2 meses] y cuatro meses después [lag = 4 meses]. Inicialmente se nota que el máximo de variabilidad para los vientos zonales se localiza a 5°S [Fig. 3a], lo que significa que el patrón de vientos zonales [lag = 0 meses] no fuerza una respuesta de tipo onda Kelvin. Por el contrario, puede forzar una onda Rossby que va a reflejarse en la frontera oeste como una onda Kelvin de tipo afloramiento.

Seguidamente el patrón de la SSTAf tiene su centro localizado en el Pacífico ecuatorial este y central [Fig. 2a]. Como respuesta a estas anomalías, esfuerzos de vientos anómalos emergen desde el oeste en el Pacífico ecuatorial oeste y anomalías de esfuerzos de vientos del este en el Pacífico este [Fig. 3a]. Estas anomalías de esfuerzos de vientos conducen corrientes zonales anómalas que se presentan fuertes y positivas [Fig. 3d], reforzando de esta manera las anomalías de temperatura superficial del mar en el Pacífico este y central indicando una realimentación positiva a través de una advección zonal. Si bien las anomalías del nivel del mar en el ecuador son pequeñas y positivas [Fig. 2d], estas indican la existencia de anomalías cálidas en las temperaturas subsuperficiales que favorecen a las anomalías positivas de la SST. En la fase de transición, lag = 2 meses, se observa la presencia de corrientes zonales anómalas negativas [Fig. 3e] que se extienden por el Pacífico ecuatorial entero. Observamos también que las anomalías del nivel del mar se encuentran ligeramente negativas en el extremo del Pacífico ecuatorial este [Fig. 2e]. La advección producida por las anomalías negativas de las corrientes zonales superficiales intensifican y expanden las anomalías negativas de la temperatura superficial del mar desde el Pacífico ecuatorial central-este hacia el Pacífico ecuatorial central [Fig. 2b] conduciendo a las SSTAf ecuatoriales hacia la fase fría.

Finalmente durante la fase fría, lag = 4 meses, observamos una inversión completa de las anomalías del nivel del mar [Fig. 2f]. Asimismo, la advección producida por las anomalías negativas de las corrientes zonales superficiales [Fig. 3f] permite la expansión de las anomalías negativas de la temperatura superficial del mar desde el Pacífico ecuatorial central hacia el Pacífico oeste [Fig. 2c]. Estas corrientes anómalas se encuentran muy asociadas a las ondas Rossby reflejadas desde la frontera este y a las ondas Rossby forzadas por las anomalías de vientos hacia el este en el Pacífico central y este (Jin et al. 2003).

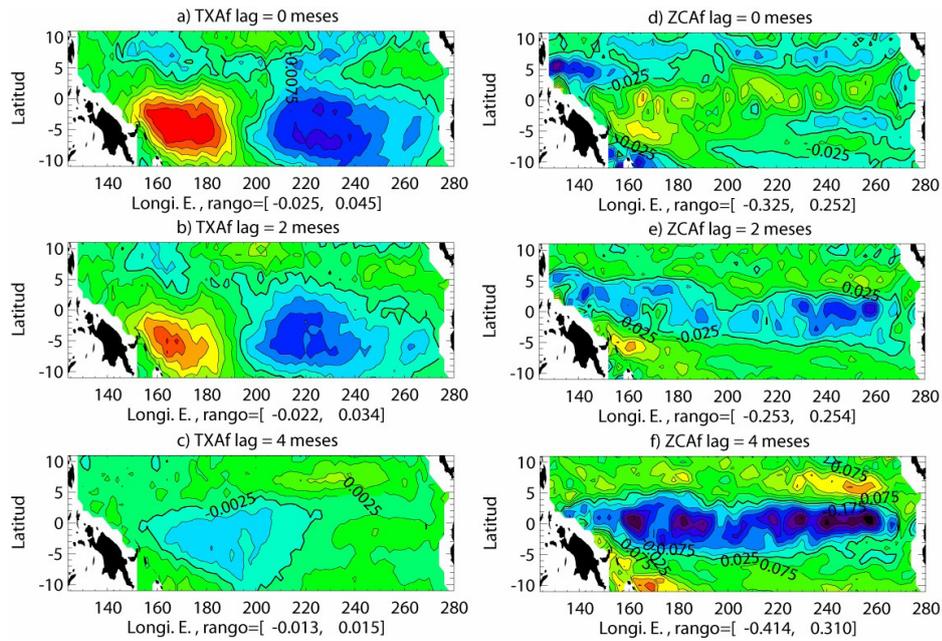


Figura 3. (a)-(c) Compuestos para la TXAf y (d)-(f) para la ZCAf. (a), (d) durante la fase madura, (b), (e) dos meses después de la fase madura y (c), (f) cuatro meses después de la fase madura. Las unidades son $N\ m^{-2}$ y $m\ s^{-1}$ y los CI = 0.005 y 0.05 para TXAf y ZCAf, respectivamente.

CONCLUSIONES

La existencia del acoplamiento océano-atmósfera debido a esta variabilidad cercana a la anual ha sido demostrada mediante un análisis SVD, que indica que este tipo de variabilidad se transmite a la parte dinámica [anomalías de corrientes zonales] y termodinámica [anomalías de temperatura superficial del mar], dado que los patrones espaciales asociados a las anomalías de esfuerzos de vientos zonales, presentaban patrones muy similares para ambas interacciones SVD. Mediante un análisis de compuestos de mapas de fases extremas y de transición sobre los campos estudiados, se muestra que la variabilidad cercana a la anual impacta en las anomalías de temperatura superficial del mar mediante una realimentación positiva a través de advección zonal en el Pacífico ecuatorial tropical central a este.

REFERENCIAS

- AVISO, 2009: SSALTO/DUACS User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products. CLS-DOS-NT-06.034. Version 1.10. 41 pp.
- Bonjean F. and G.S.E. Lagerloef, 2002: Diagnostic Model and Analysis of the Surface Currents in the Tropical Pacific Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 32, No. 10, pages 2938-2954.
- CERSAT-IFREMER, 2002: Quikscat scatterometer mean wind field products user manual. Version 1. C2-MUT-W-03-IF. 47 pp.
- Dewitte, B., C. Cibot, C. Perigaud, S.-I. An, L. Terray, 2007: Interaction between Near-Annual and ENSO Modes in a CGCM Simulation: Role of the Equatorial Background Mean State. *J. Climate*, 20, 1035-1052.
- Fashé, O., and Dewitte, B., 2013: Enhancement of near-annual variability in the equatorial Pacific in 2000-2008. DOI: 10.5194/adgeo-33-13-2013
- Jin, F.-F., J. S. Kug, S.-I. An, and I. S. Kang, 2003: A near-annual coupled ocean-atmosphere mode in the equatorial Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1080, doi:10.1029/2002GL015983.
- Kang, I.-S., J.-S. Kug, S.-I. An, and F.-F. Jin, 2004: A near-annual Pacific Ocean basin mode. *J. Climate*, 17, 2478-2488.
- Madden, R.A., and P.R. Julian, 1994: Observations of the 40-50-Day Tropical Oscillation—A Review. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 814-837.
- Mantua, N. J., and D. S. Battisti, 1995: Aperiodic Variability in the Zebiak-Cane Coupled Ocean-Atmosphere Model: Air-sea Interaction in the Western Equatorial Pacific, *J. Climate*, 8, 2897-2927.
- Perigaud, C., and B. Dewitte, 1996: El Niño-La Niña events simulated with Cane and Zebiak's model and observed with satellite and in situ data: Part I: Model Data Comparison, *J. Climate*, 9, 66-84.
- Philander, 1990: *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, 289 pp.
- Ropelewski, C. F., M. S. Halpert, and X. Wang, 1992: Observed tropospheric biennial variability and its relationship to the Southern Oscillation. *J. Climate*, 5, 594-614.
- Tourre, Y. M., Y. Kushnir, and W. B. White, 1999: Evolution of interdecadal variability in sea level pressure, sea surface temperature, and upper ocean temperature over the Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1528-1541.
- Wentz, F. J., and T. Meissner, 2000: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). AMSR Ocean Algorithm. Version 2. RSS Tech. Proposal 121599A-1. 59 pp.
- Zebiak, S. E., 1984: Tropical atmosphere-ocean interaction and the El Niño/Southern Oscillation phenomenon, Ph.D. dissertation, MIT.
- , and M. A. Cane, 1987: A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2262-2278.
- Zhang, R.-H., L. M. Rothstein, and A. J. Busalacchi, 1999: Interannual and decadal variability of the subsurface thermal structure in the Pacific Ocean. *Climate Dyn.*, 15, 703-717.