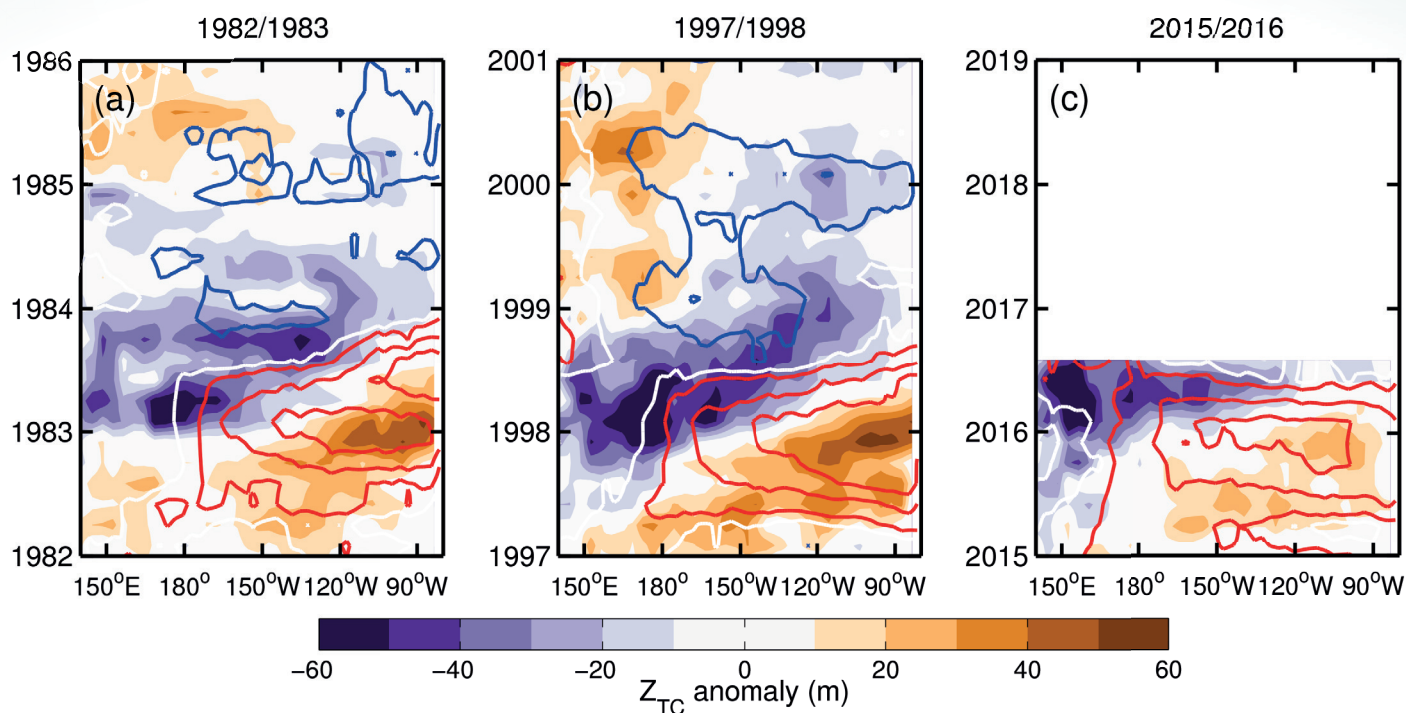


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

Predicción de La Niña



**Evolución de la anomalía de la temperatura superficial del mar
y profundidad de la termoclina ecuatorial**

Desafíos en la predicción de La Niña

Antecedentes

El Niño de 2015-2016 se ha desvanecido por ahora y, dada su gran intensidad, se esperaban condiciones La Niña para el próximo verano. Eventos El Niño fuerte anteriores, como los de 1982-1983 y 1997-1998, fueron seguidos por La Niña. Sin embargo, las observaciones y modelos de pronóstico no indican consistentemente que La Niña estaría en marcha el presente año. Por otra parte, las observaciones históricas indican que los eventos El Niño fuertes son seguidos por La Niña prolongada, por lo general con una duración de 2 años o más, como se ve en el índice de temperatura superficial del mar en el Pacífico central (Niño 3.4; Fig. 1). Las observaciones desde finales del siglo 19 muestran que la mayoría de los eventos El Niño fuerte han dado lugar rápidamente a La Niña (Kessler, 2002; McPhaden y Zhang 2009). Por otro lado, La Niña rara vez transiciona directamente a El Niño, sino que la gran mayoría de los eventos de La Niña decaen lentamente y, a menudo, toma varios años de condiciones casi neutras hasta que el próximo evento de El Niño se inicia (Kessler, 2002).

Predecir si La Niña iniciará a finales de año y si este podría convertirse en un evento multi-anual es fundamental para predecir la duración de la sequía asociada en regiones tales como el sur de los EE.UU., sudeste de Sudamérica y África ecuatorial oriental. Aquí se discuten dos retos críticos para predecir el inicio y duración de La Niña.

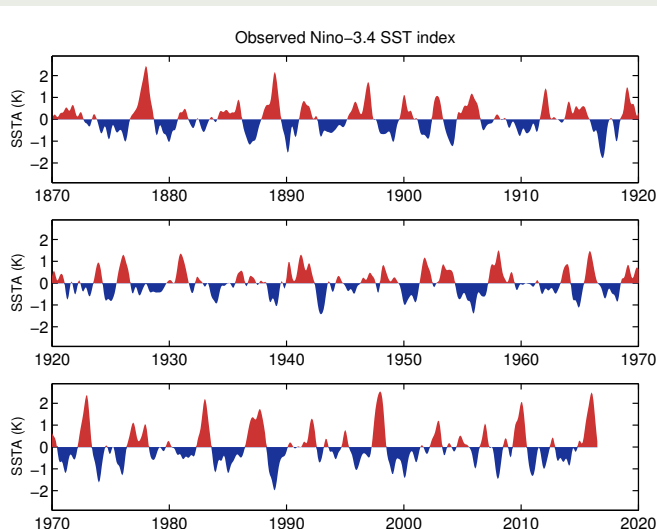


Figura 1 – Anomalía de la temperatura superficial del mar (°C) en la región Niño 3.4 (170°W-120°W, 5°S-5°N).



Ph. D. Pedro DiNezio
Investigador, Instituto de Geofísica,
The University of Texas at Austin

Ph.D. en Meteorología y Oceanografía Física de la University of Miami, EE.UU. e Ingeniero Mecánico del Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina. Actualmente es investigador científico del Institute for Geophysics, en la Jackson School of Geosciences de la Universidad de Texas (EE.UU.). Recientemente su investigación está enfocada en entender los impactos del cambio climático sobre el Pacífico Tropical, con especial interés en predecir los cambios en los eventos El Niño y La Niña.

Prediciendo el inicio de La Niña

Se pensaba que el inicio de La Niña es altamente predecible, ya que es impulsado por las ondas oceánicas lentas producidas por El Niño. Sin embargo, La Niña no ha surgido este año consistentemente, a pesar de encontrarnos en la secuela de uno de los eventos El Niño más fuertes registrados en el Pacífico central, donde la temperatura superficial del mar (TSM) observada todavía se ciente en torno a valores neutros. La anomalía de TSM en la región Niño 3.4 de agosto de 2016 (el último valor mensual disponible del producto ERSST4) apenas ha pasado bajo el umbral de -0.5°C que puede ser usado para definir las condiciones de La Niña (Fig. 2a, curva verde). Durante el otoño de 1998 - después del El Niño extraordinario - la TSM en el Pacífico ecuatorial central fue en promedio -1°C más frío de lo normal (Fig. 2a, curva roja).

La falta de enfriamiento consistente en el 2016 ha generado sospecha de un posible estancamiento de la aparición de La Niña, particularmente porque, hasta principios de setiembre, había poca evidencia del fortalecimiento de los vientos alisios y de la retroalimentación de Bjerknes que sería responsable del crecimiento de La Niña. Sin embargo, la posibilidad que La Niña aparezca y alcance su máximo a finales de 2016 no debería ser descartada por las dos razones siguientes. En primer lugar, otros eventos El Niño fuertes tardaron más tiempo en decaer, como el de 1982-1983 (Fig. 2a, la curva de color verde fijo) que llevó a condiciones La Niña débiles durante el verano 1983-1984, las cuales regresaron por un segundo año (Fig. 1).

En segundo lugar y más importante, la tendencia de calentamiento de largo plazo en el Pacífico tropical podría estar ocultando el enfriamiento asociado a La Niña este año. Asumiendo una tendencia al calentamiento lineal, las observaciones más recientes tienden a ser más caliente que el promedio sobre el periodo de 30 años, en este caso 1981-2010, usado para computar la climatología y las anomalías. Este

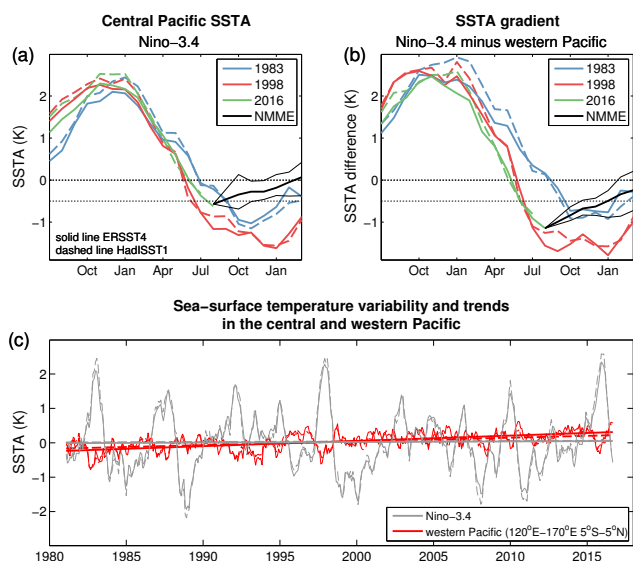


Figura 2 – Evolución temporal de (a) anomalía de TSM en Niño 3.4 y (b) gradiente zonal de TSM durante los tres eventos El Niño más fuertes registrados. El gradiente zonal se define como la anomalía de TSM en la región Niño 3.4 menos la promediada en una región en el Pacífico occidental (120°E-170°E 5°S-5°N). Los datos usados son ERSST4 (sólido) y HadISST1 (rayas), así como el pronóstico promedio de modelos NMME (negro). (c) Las series completas de estos índices y sus tendencias lineales con la técnica del mínimo cuadrado.

error puede llegar a ser unas pocas décimas de grado y podría dar lugar a una subestimación no despreciable de la anomalía de TSM en la región Niño 3.4, lo que podría afectar la identificación y definición de eventos La Niña con la intensidad moderada.

Los eventos de La Niña se caracterizan por un gradiente de TSM zonal (oeste-este) ecuatorial más fuerte que lo normal, por lo tanto un índice de este gradiente podría ser utilizado para monitorear estos eventos. Ya que este índice se basa en diferencias entre dos regiones del Pacífico, no es tan sensible a tendencias de calentamiento promedio a largo plazo y además está más íntimamente relacionado con la fuerza de los vientos alisios ecuatoriales (por ej. Cai et al., 2015), por lo que puede ser más apropiado para representar la retroalimentación de Bjerknes. Por lo tanto, para cuantificar a La Niña, definimos el gradiente como la diferencia de anomalía de TSM entre la región Niño 3.4 y la región en el extremo occidental del Pacífico ecuatorial (120°E-170°E, 5°S-5°N). Esta definición, que hace hincapié en la mitad occidental de la cuenca, es más adecuado para capturar el gradiente asociado a La Niña, dado que las anomalías de los vientos del este correspondientes tienden a ocurrir en esta región del Pacífico ecuatorial.

Los datos de ERSST4 y HadISST1 muestran que en el 2016, el gradiente de TSM está evolucionando similarmente al año 1998 (Fig. 2b, rojo frente a curvas de color verde). Recientemente, en setiembre 2016, los datos de las boyas TAO indican que los vientos alisios se están intensificando (Fig. 3a), con magnitudes

comparables a los meses de setiembre de 1998 (Fig. 3b), consistente con la evolución similar del gradiente zonal de TSM en ambos eventos (Figs. 2 y 3). Dada esta similitud, es razonable esperar que los vientos continuarán fortaleciendo debido a la retroalimentación Bjerknes alimentando el crecimiento de La Niña.

Los modelos climáticos que participan en el North American Multi-Model Ensemble (NMME; Kirtman et al., 2014) predicen valores neutrales en Niño 3.4 para enero de 2017 (Fig. 2a, curva de negro). Sin embargo, cuando calculamos sus predicciones para el gradiente de TSM zonal, estos modelos predicen un fuerte gradiente de TSM, aunque más débil que durante enero de 1999, y más acorde con la magnitud del gradiente en el pico de La Niña de 1983-1984 (Fig. 2b, curva de negro). En concordancia con su predicción de un gradiente de TSM fortalecido, los modelos NMME también predicen anomalías de precipitación para la próxima temporada diciembre-enero-febrero (DEF) caracterizadas por patrones a gran escala con condiciones más secas sobre el Pacífico central y oriental, y más húmedas sobre la región alrededor de Indonesia (Fig. 4a). Estas anomalías son robustas en todo el conjunto de 9 modelos y, lo más importante, son sorprendentemente similares al promedio de las anomalías de precipitación de 12 eventos La Niña observados (Fig. 4b). Esto refuerza la idea de que los gradientes de TSM en el Pacífico ecuatorial pueden ser más adecuados para el seguimiento y la predicción de La Niña y sus impactos asociados.

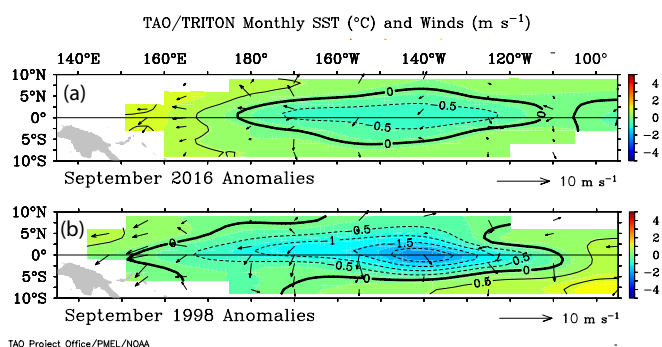
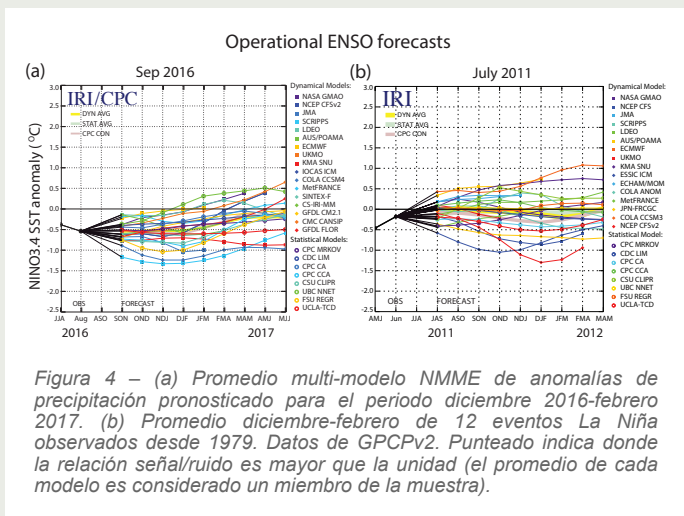
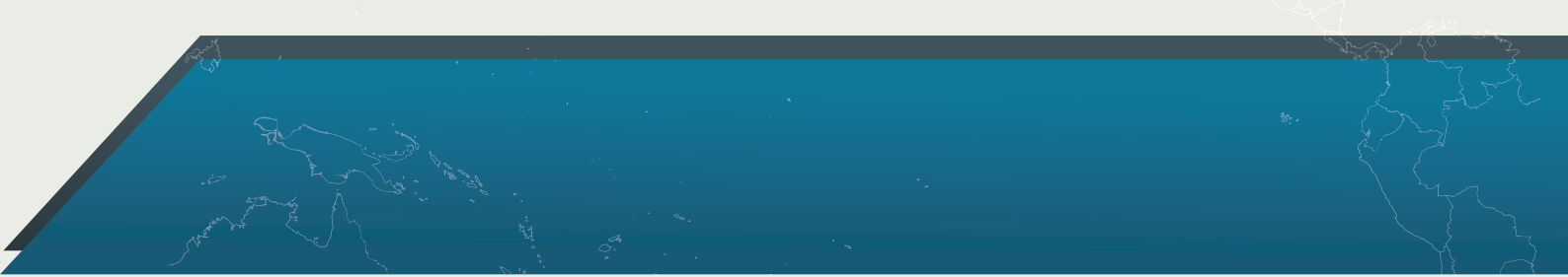


Figura 3 – Anomalías de TSM y viento superficial en setiembre de 2016 y 1998. Datos del arreglo TAO/TRITON.

Predicción de la duración de La Niña

El consenso de los sistemas de predicción dinámicos y estadísticos inicializados en setiembre del 2016 predice condiciones débiles de La Niña para el próximo verano (Fig. 5a). No sólo estas previsiones podrían estar subestimando la magnitud de La Niña, como se discute en la sección anterior, sino que no proporcionan información sobre la duración del posible evento, ya que solo se extienden con tiempos de anticipación



“leads”) de hasta 8 meses. La ocurrencia de estos eventos largos sólo se ha reconocido recientemente (Okumura and Deser 2010), y poco se sabe acerca de si su duración puede ser prevista.

La predicción de ENOS se ha centrado tradicionalmente en leads menores a un año. Sin embargo, incluso para leads más cortos, las predicciones operativas pueden ser poco fiables. El último evento La Niña, por ejemplo, fue de 2 años, que alcanzó su punto máximo durante los veranos de 2010-2011 y 2011-2012, causando sequías devastadoras sobre el sureste de los EE.UU. y Texas. En junio de 2011, después del primer año de La Niña, la TSM en la región Niño 3.4 fue casi neutra (Fig. 5b, curva negra). Diferentes previsiones operativas inicializadas en ese momento predijeron valores positivos y negativos para el invierno siguiente (Fig. 5b, las curvas de color en DEF 2011-2012), que proporciona una imagen poco fiable de la evolución de La Niña, que en última instancia resurgió por segundo año alcanzando un máximo en DEF de 2011-2012.

Dinámica de 2 años de La Niña

Antes de explorar la posibilidad de predicciones a largo plazo, necesitamos entender la dinámica de eventos La Niña de 2 años. El inicio y el decaimiento de El Niño y La Niña que se rigen por los cambios en la profundidad de la termoclina ecuatorial, el límite que separa las aguas cálidas de la superficie de las aguas profundas y más frías (Cane et al., 1985, Neelin et al., 1998). Según la teoría más básica de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), los vientos alisios debilitados durante El Niño causan que la termoclina del Pacífico ecuatorial ascienda una o dos temporadas más tarde. Esta respuesta retardada de la termoclina es clave para iniciar la desaparición de El Niño y se caracteriza por una reducción en el contenido de calor del océano ecuatorial superior, típicamente referido como “descarga”. Más importante aún, la termoclina menos profunda facilita el incremento el afloramiento de aguas frías subsuperficiales, el cual

causa el enfriamiento de la superficie del océano, finalizando El Niño e iniciando La Niña. Por el contrario, los vientos alisios fortalecidos durante La Niña producen una profundización retardada de la termoclina, lo que disminuye el efecto de enfriamiento del afloramiento, que finaliza La Niña y da inicio a un posterior evento El Niño. La dinámica lineal descrita debe dar lugar a eventos El Niño y La Niña de la misma duración.

Eventos La Niña de 2 años observados y simulados por el modelo climático CESM1 muestran anomalías negativas de las TSM en el Pacífico ecuatorial central máximas en los dos veranos consecutivos después del pico de El Niño (Fig. 6). Las variaciones en la profundidad de la termoclina (Z_{tc}) juegan un papel clave en la iniciación y terminación de La Niña de 2 años. Observaciones y CESM1 muestran que La Niña está precedida por un ascenso de la termoclina ecuatorial, mostrada por las anomalías negativas de Z_{tc} en todo el Pacífico ecuatorial asociada a la “descarga” de calor durante El Niño (Fig. 6, los contornos negativos en el tiempo = Jul¹⁸). La termoclina se mantiene en promedio somera durante La Niña, aunque con una fuerte inclinación este-oeste como respuesta a los vientos alisios fortalecidos. Las observaciones (Fig. 6ab) y el modelo CESM1 (Fig. 6c) muestran que La Niña de 2 años termina cuando la termoclina inicia su fase de “recarga”, que se caracteriza por anomalías positivas de Z_{tc} en el Pacífico ecuatorial (Fig. 6, los contornos positivos después de Ene⁰).

Se han propuesto varios mecanismos para explicar la terminación retrasada de La Niña, los cuales hacen hincapié en diferentes aspectos no-lineales del acoplamiento entre la TSM, el viento y la profundidad de la termoclina. En primer lugar, eventos El Niño fuertes tienen anomalías en los vientos mucho mayores que los eventos de La Niña, los cuales producen una descarga de calor también mucho mayor (Frauen y Dommenget, 2010, Choi et al., 2013). La recarga, en

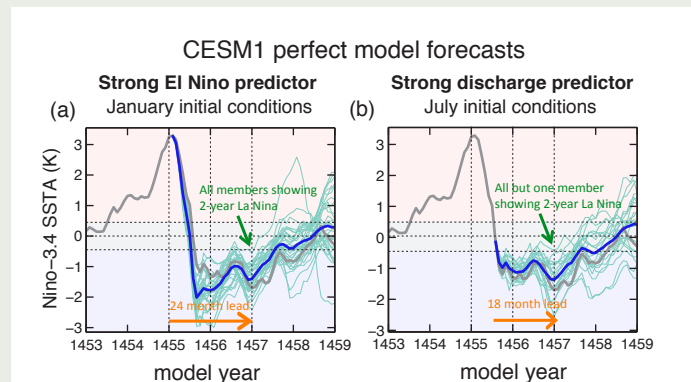


Figure 5 – Predicciones de anomalía de TSM en la región Niño 3.4 (IRI/CPC) con modelos dinámicos y estadísticos inicializados en (a) setiembre 2016, los cuales indican valores negativos (La Niña) para el verano (diciembre-febrero) próximo, y en (b) julio 2011, los cuales no presentaron acuerdo sobre el signo de las anomalías en el verano siguiente, las cuales fueron negativas haciendo que La Niña iniciada en 2010 fuera multi-annual.

cambio, es impulsada por la magnitud de las anomalías de viento de La Niña, que son proporcionalmente más débiles. El segundo proceso implica el acoplamiento entre la profundidad de la termoclina y TSM. DiNezio y Deser (2014) propusieron que las anomalías positivas de Z_{tc} durante la fase de recarga desacoplan las aguas de la termoclina de la capa de mezcla superficial del océano. Este efecto es más pronunciado para los grandes desplazamientos de la termoclina, haciendo que la recarga sea menos eficaz para producir la terminación de La Niña. Como resultado, episodios de La Niña fuertes persisten por un año adicional, hasta que la recarga relativamente débil pueda regresar la TSM a condiciones neutras.

Hacia predicciones multi-anales de La Niña

La limitada habilidad de las previsiones operacionales podría estar asociada al hecho de que pocos modelos climáticos pueden simular la dinámica de La Niña de 2 años en forma realista (Ohba et al., 2010), como el modelo climático CESM1, desarrollado en el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) y los modelos desarrollados en el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) de la NOAA, que son capaces de simular de forma realista esta y otras características clave de ENOS (Choi et al., 2014, Deser et al., 2012, DiNezio y Deser 2014, DiNezio et al., sometido). El realismo de estas simulaciones ENOS ha permitido recientemente el estudio de la dinámica y la previsibilidad de La Niña de 2 años en mayor detalle.

Por ejemplo, hemos realizado una serie de predicciones idealizadas que exploran la habilidad de CESM1 para predecir la duración de La Niña (DiNezio et al., sometido). Para esto, se tomó una simulación libre ("control") del CESM1 de 1800 años de duración como

si fuera la realidad y se usó el modelo para pronosticar la evolución de eventos dentro de esta simulación, pero partiendo de condiciones iniciales imperfectas a las que se añadió pequeñas perturbaciones a las condiciones atmosféricas. Los "ensembles" de 30 pronósticos por evento se inicializaron en enero y julio, coincidiendo con los picos de El Niño y su descarga asociada, respectivamente. Se consideraron tres casos con diferentes magnitudes de los dos predictores: amplitud pico de TSM durante El Niño y el bajo contenido de calor posterior. Aquí se presentan los resultados del caso "fuerte", inicializado a partir de uno de los eventos El Niño más fuertes de la simulación control.

Las previsiones muestran que todos los 30 miembros inicializados en el pico de El Niño predijeron condiciones La Niña de 2 años. Se encontraron resultados similares cuando CESM1 se inicializó en el pico de descarga. Estos resultados sugieren que en un caso ideal, la duración de La Niña podría predecirse con hasta 24 y 18 meses de antelación para casos en que El Niño y la descarga precedentes son fuertes. Este es un caso ideal ya que el CESM1 es usado para predecir su propio clima ("modelo perfecto"), así que las previsiones no se ven afectadas por fuerte incertidumbre en las condiciones iniciales, los "shocks" de inicialización, o la deriva climática del modelo, que sí ocurre en situaciones reales. Sin embargo, la alta habilidad demostrada por CESM1 sugiere que las predicciones operativas útiles de la duración de La Niña en la naturaleza podrían ser factibles.

¿Duraría el potencial evento La Niña por 2 años?

Los pronósticos operacionales de ENOS se limitan generalmente a 8 meses (Barnston et al., 2012), así que no incluyen predicciones de La Niña de 2 años. Sin embargo, las investigaciones recientes sobre las predicciones multi-anales de La Niña indican que la amplitud pico de El Niño y/o la magnitud de la descarga de calor asociada podrían guiar en la predicción de la duración de La Niña. Si bien son "idealizados", los experimentos indican que las condiciones oceánicas tras El Niño 2015-2016 pueden ser propicias para predicciones confiables de si el potencial evento La Niña tendrá una duración de un año adicional o no.

Las observaciones muestran esta relación, ya que los eventos El Niño más fuertes de la historia, 1982-1983 y 1997-1998, fueron seguidos por varios años de La Niña (Fig. 1). Teniendo en cuenta que el presente año El Niño ha sido tan fuerte en el Pacífico central como esos eventos, se esperaría una mayor probabilidad de que el próximo La Niña persiste por un año adicional. El efecto de El Niño sobre la duración de La Niña siguiente está determinado por la magnitud de la descarga asociada, que normalmente alcanza su máximo durante el otoño e invierno siguiente el pico de El Niño. El evento de

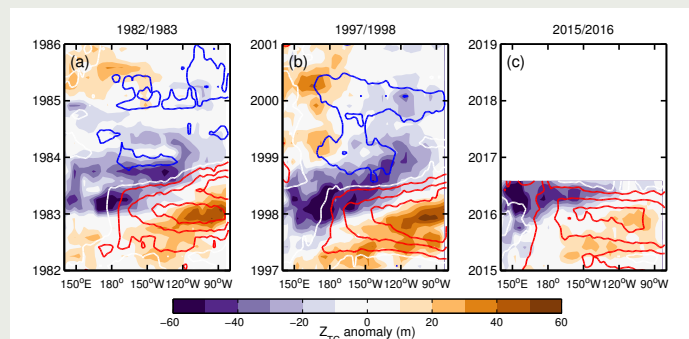


Figura 6 – Evolución espacio-temporal promedio de La Niña de 2 años en anomalías de la temperatura superficial del mar (sombreado) y la profundidad de la termoclina Z_{tc} (contornos naranjas positivos, morados negativos, con intervalos de 5 m) ecuatorial ($5^{\circ}S-5^{\circ}N$) en (a,b) observaciones y (c) la simulación control del modelo CESM1. Los datos observacionales de TSM son de HadISST1.1 (Rayner et al., 2003) y los de Z_{tc} son de los análisis oceánicos (a) GODAS (1980-presente; Behringer et al., 1998) y (b) ORAS4 (1958-2013; Balmaseda et al., 2013). El tiempo avanza hacia arriba y los superíndices indican el retraso en meses relativo a enero correspondiente al segundo año de La Niña. Los promedios observacionales se basan en solo (a) 4 y (b) 7 eventos La Niña de 2 años según la disponibilidad de los datos subsuperficiales.

este año muestra una descarga, que se caracteriza por anomalías Z_{tc} negativas en el Pacífico ecuatorial, que hasta ahora, no parecen ser muy diferentes en extensión espacial, magnitud y temporalidad que la descarga observada en 1998 y 1983.

¿Evolucionará el Pacífico tropical igual que en los años siguientes a El Niño de 1997-1998? Según el análisis GODAS, la descarga de este año, medida como el promedio zonal de la profundidad de la termoclina ecuatorial (140°E-80°W, 5°S-5°N), alcanzó un máximo (negativo) de -33m en mayo. Este ascenso anómalo tiene aproximadamente la misma magnitud y el momento de que los eventos fuertes anteriores, que mostraban descarga de -32 m en mayo de 1998 y -32 de septiembre de 1983. La magnitud de la descarga de este año y su similitud con las condiciones del océano en eventos multi-anales previos sugieren que una predicción fiable de la duración de La Niña tal vez sea posible. La fuerte descarga sugiere indica que las probabilidades de un evento multi-anales son mayores que el 50% de probabilidad dada por las observaciones históricas. Nótese, sin embargo, que estos eventos multi-anales se hicieron más comunes en la última parte del siglo 20 (Fig. 1) y por lo tanto podrían estar relacionados con las variaciones multidecenales en la actividad ENOS. Estas variaciones parecen ser muy impredecibles (Wittenberg et al., 2014), y por lo tanto también es posible que estemos entrando en un período de menor frecuencia de eventos La Niña multi-anales.

Resumen

El Niño de 2015-2016 ha permitido a nuestra comunidad mostrar el progreso extraordinario logrado en la observación, comprensión y predicción de ENOS. Un probable evento La Niña el próximo verano renueva el desafío de tratar de predecir su aparición y duración. Anteriores eventos El Niño fuertes, como los de 1982-1983 y 1997-1998, fueron seguidos por La Niña. Observaciones del gradiente de TSM zonal indican que La Niña estaría en marcha y se observa un efecto sobre los vientos alisios. Los pronósticos de los modelos climáticos indican que el gradiente de TSM zonal seguirá siendo fuerte a principios de 2017. En contraste, el índice de TSM para la región Niño 3.4 en el Pacífico central presentaría condiciones cercanas a neutras. ¿Será que la reanudación del calentamiento global después del paréntesis de los años 2000 (Kosaka y Xie 2014) está influyendo en nuestra definición de La Niña? Detectar el evento La Niña en este año podría ser nuestro primer reto en el monitoreo de ENOS en un clima más cálido.

La predicción de la duración de La Niña es tanto más difícil y crítico. Predecir si la próxima La Niña persistirá en el invierno boreal de 2017-2018 podría proporcionar pronósticos más confiables de sequía de largo plazo en regiones como el sur de Estados Unidos, el sureste de América del Sur, y África ecuatorial, lo que podría

reducir en gran medida la gravedad de su daño social y económico. Relaciones estadísticas con la magnitud de la descarga asociada con El Niño y simulaciones idealizadas indican que sería posible, aunque estos resultados son recientes y llevará tiempo para que sean operacionalizados.

Referencias

- Balmaseda, M. A., K. Mogensen, and A. T. Weaver (2013), Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(674), 1132–1161, doi:10.1002/qj.2063.
- Barnston, A. G., M. K. Tippett, M. L. L'Heureux, S. Li, and D. G. DeWitt (2012), Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 631–651.
- Barnston, A. G., S. Li, S. J. Mason, D. G. DeWitt, L. Goddard, and X. Gong (2009), Verification of the First 11 Years of IRI's Seasonal Climate Forecasts, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(3), 493–520, doi:10.1175/2009JAMC2325.1.
- Behringer, D.W., M. Ji, and A. Leetmaa (1998), An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1013–1021.
- Cai W, Wang G, Santoso A, McPhaden MJ, Wu L, Jin FF, Timmermann A, Collins M, Vecchi G, Lengaigne M, England M, Dommenges D, Takahashi K, Gouliyardi E, 2015, Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5 (2), 132–137, doi:10.1038/nclimate2492.
- Cane, M. A., and S. E. Zebiak (1985), A Theory for El Niño and the Southern Oscillation, *Science*, 228(4703), 1085–1087, doi:10.1126/science.228.4703.1085.
- Choi, K.-Y., G. A. Vecchi, and A. T. Wittenberg (2013), ENSO Transition, Duration and Amplitude asymmetries: Role of the nonlinear wind stress coupling in a conceptual model, *J. Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-13-00045.1.
- Deser, C., A. S. Phillips, R. A. Tomas, Y. M. Okumura, M. A. Alexander, A. Capotondi, J. D. Scott, Y.-O. Kwon, and M. Ohba (2012), ENSO and Pacific Decadal Variability in the Community Climate System Model Version 4, *Journal of Climate*, 25(8), 2622–2651, doi:10.1175/JCLI-D-11-00301.1.
- DiNezio, P. N., and C. Deser (2014), Nonlinear Controls on the Persistence of La Niña, *Journal of Climate*, 27(19), 7335–7355.
- DiNezio, P. N., C. Deser, Y. Okumura, and A. R. Karspeck (submitted), Mechanisms controlling the predictability of 2-year La Niña, submitted to *Climate Dynamics*, available at http://utig.ig.utexas.edu/outgoing/pdn/pubs/submitted/DiNezio_LN2predictability.pdf.
- Frauen, C., and D. Dommenges (2010), El Niño and La Niña amplitude asymmetry caused by atmospheric feedbacks, *Geophys. Res. Lett.*, 37(18), doi:10.1029/2010GL044444.
- Hu, Z.-Z., A. Kumar, Y. Xue, and B. Jha (2013), Why were some La Niñas followed by another La Niña?, *Clim. Dyn.*, pp. 1–14.
- Kessler, W. S. (2002), Is ENSO a cycle or a series of events?, *Geophysical Research Letters*, 29(23), 40–1–40–4, doi:10.1029/2002GL015924.
- Kirtman, B., J. Shukla, M. Balmaseda, N. Graham, C. Penland, Y. Xue, and S. Zebiak (2001), Current status of ENSO forecast skill, *Tech. Rep. 56, CLIVAR Working Group on Seasonal to Interannual Prediction*.
- Kirtman, P., and Coauthors (2014), The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 Seasonal-to-Interannual Prediction; Phase-2 toward Developing Intraseasonal Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 585–601.
- Latif, M., D. Anderson, T. Barnett, M. Cane, R. Kleeman, A. Leetmaa, J. O'Brien, A. Rosati, and E. Schneider (1998), A review of the predictability and prediction of ENSO, *J. Geophys. Res. Oceans*, 103(C7), 14,375–14,393, doi:10.1029/97JC03413.
- Neelin, J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.-F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, and S. E. Zebiak (1998), ENSO theory, *J. Geophys. Res.*, 103(C7), 14261–14290, doi:10.1029/97JC03424.
- Ohba, M., and H. Ueda (2009), Role of Nonlinear Atmospheric Response to SST on the Asymmetric Transition Process of ENSO, *J. Climate*, 22(1), 177–192, doi:10.1175/2008JCLI2334.1.
- Ohba, M., D. Nohara, and H. Ueda (2010), Simulation of Asymmetric ENSO Transition in WCRP CMIP3 Multimodel Experiments, *Journal of Climate*, 23(22), 6051–6067, doi:10.1175/2010JCLI3608.1.
- Okumura, Y. M., and C. Deser (2010), Asymmetry in the Duration of El Niño and La Niña, *Journal of Climate*, 23(21), 5826–5843, doi:10.1175/2010JCLI3592.1.
- Okumura, Y. M., M. Ohba, C. Deser, and H. Ueda (2011), A Proposed Mechanism for the Asymmetric Duration of El Niño and La Niña, *Journal of Climate*, 24(15), 3822–3829, doi:10.1175/2011JCLI3999.1.
- McPhaden, M. J., and X. Zhang (2009), Asymmetry in zonal phase propagation of ENSO sea surface temperature anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13703, doi:10.1029/2009GL038774.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan (2003), Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14), doi:10.1029/2002JD002670.
- Wittenberg A. T., A. Rosati, T. L. Delworth, G. A. Vecchi, and F. Zeng (2014), ENSO Modulation: Is It Decadally Predictable?, *J. Climate*, 27, 2667–2687, doi:10.1175/JCLI-D-13-00577.1.