

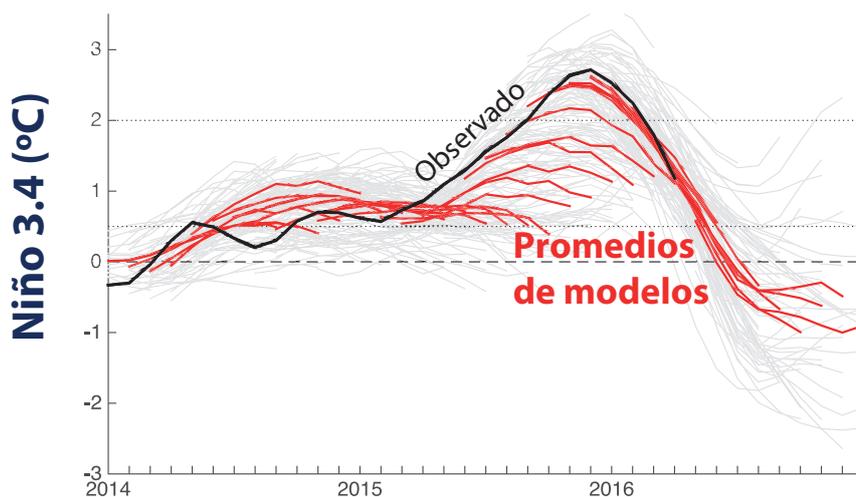
Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

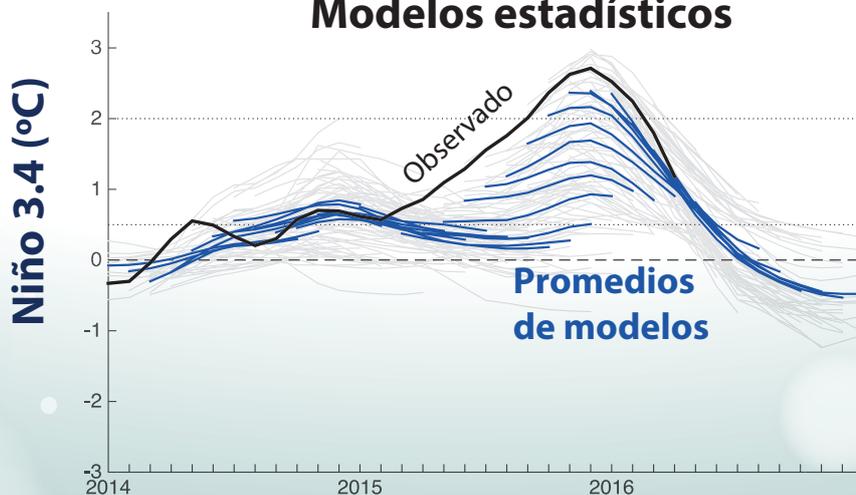
Boletín Técnico

Pronóstico numérico de El Niño 2015-2016

Modelos dinámicos



Modelos estadísticos



Predicciones numéricas de El Niño 2015-2016

Introducción

El Niño en 2015-16 fue probablemente el evento de El Niño-Oscilación Sur (ENOS) más esperado tanto por la comunidad científica como la sociedad a nivel mundial y fue precedido por casi cuatro décadas de avances en los sistemas de observación y predicción. A mediados de 2015, los centros de pronósticos operacionales de todo el mundo eran casi unánimes: con una probabilidad que El Niño sería fuerte y con potencial de competir con los grandes eventos El Niño de 1982-83 y 1997-98.

Sin embargo, el ENOS es un fenómeno climático multifacético que afecta a cada país de una manera diferente y las agencias nacionales utilizan diferentes índices, umbrales, y criterios. Por ejemplo, el Perú emite pronósticos para “El Niño costero” (ENFEN 2012), porque el clima en la costa es muy sensible al aumento local de la temperatura superficial del mar (TSM), y particularmente la posibilidad de lluvias muy intensas (ej. Takahashi 2004). Por otro lado, quizás el índice de ENOS más comúnmente monitoreado por las agencias internacionales es la anomalía de la TSM en la región denominada Niño 3.4 (ver mapa en la pág. 3), en el Océano Pacífico ecuatorial central, ya que la temperatura en esta región afecta fuertemente a los patrones de circulación atmosférica a nivel planetario (Barnston et al., 1997). Como consecuencia, si bien la mayoría de modelos de pronóstico generan resultados a nivel global, la mayoría de la información de las diferentes agencias disponibles libremente se limita al índice de Niño 3.4.

El presente artículo está basado en una traducción selectiva de L’Heureux et al. (2016) y discute los pronósticos realizados por modelos numéricos para El Niño 2015-16, enfocado principalmente en la región Niño 3.4.

Pronósticos multi-modelos

Los centros de pronóstico operacional consideran sus propios modelos climáticos internos y una serie de “plumas” de modelos, que son gráficas que muestran miembros de *ensembles* de corridas y/o los promedios de dichos “*ensembles*” para un conjunto de modelos diferentes.

La pluma multi-modelo IRI/CPC¹ para el pronóstico del índice de temperatura superficial del mar (TSM)



Michelle L’Heureux, M. Sc.
Investigadora del Centro Nacional de Administración de la Atmósfera y los Océanos (NOAA)

Meteoróloga y científica del clima en el Centro de Predicción Climática de la NOAA de los EE.UU., en el cual lidera el grupo de predicción de El Niño-Oscilación Sur. Obtuvo su maestría en ciencias atmosféricas en la Colorado State University. Tiene más de 20 publicaciones con revisión por pares en los temas de variabilidad y predictibilidad climática, así como de cambio climático.

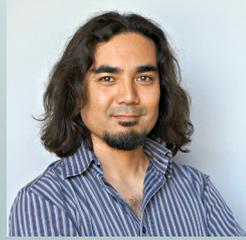
y la región Niño 3.4 (170°O-120°O, 5°S-5°N) en el Pacífico central, es quizás la recopilación operacional más larga de varios modelos, que incluye modelos tanto dinámicos como estadísticos. Mensualmente, varias agencias a nivel mundial proporcionan el pronóstico promedio estacional de Niño 3.4 de sus modelos con hasta 9 meses de anticipación. En las actualizaciones más recientes de la pluma IRI/CPC se muestra un *ensemble* de múltiples modelos (MME en inglés), con poco más de 15 modelos “dinámicos” (que resuelven las ecuaciones matemáticas de la física) y casi 10 “estadísticos” (que utilizan relaciones empíricas basadas en datos observacionales pasados). Sin embargo, dentro de la categoría dinámica se encuentran un conjunto de menos de 5 modelos del tipo llamado “modelos de complejidad intermedia” (ICMs en inglés), que son híbridos, no tan completos como los modelos dinámicos de última generación y que dependen fuertemente de métodos estadísticos. En los últimos dos años, en general, la bondad de los pronósticos dinámicos es mejor cuando se excluyen los ICMs, mientras que el promedio de ICMs no es mejor que el promedio de los modelos estadísticos.

Existen otras plumas de modelos, como el *Ensemble* de Modelos Norteamericanos (NMME; Kirtman et al., 2014) y EUROSIP (Palmer et al., 2004), de los que cada vez más pronosticadores de ENOS dependen. La ventaja de estas plumas es que muestran los miembros individuales del *ensemble* de cada modelo, cuya dispersión representa el “ruido” o la incertidumbre asociada a la sensibilidad de las previsiones climáticas a las condiciones iniciales

¹Los umbrales para establecer la categoría de condiciones cálidas o frías débiles, moderadas, fuertes, y muy fuertes usando el ONI son ± 0.50 , ± 1.00 , ± 1.50 , y ± 2.00 , respectivamente (Nota Técnica ENFEN, 02-2015).

Ken Takahashi Guevara, Ph.D.

Investigador científico del
Instituto Geofísico del Perú



Ph.D. en Ciencias Atmosféricas de la University of Washington, Seattle, EE.UU. y Físico de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú, donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera, y representa al IGP en el Comité Técnico del ENFEN. Recientemente su investigación está enfocada en entender las condiciones que favorecen la ocurrencia de eventos El Niño extremos, los procesos de interacción entre el océano y atmósfera, identificar la variabilidad a escala decadal en el Pacífico sureste.

debido a la naturaleza caótica del sistema (ver Takahashi, 2015).

La Figura 1 ilustra, con líneas grises el pronóstico de cada modelo individual de la pluma IRI/CPC desde el trimestre diciembre 2013-febrero 2014 hasta febrero-abril 2016 para el caso de los modelos dinámicos (panel superior), incluyendo los ICMs, y los modelos estadísticos (panel inferior). Las líneas azules y rojas representan el promedio del MME, por lo que se ubican dentro del rango de las líneas grises correspondientes a modelos individuales. En general, el promedio MME tiende a ser más hábil que cualquier modelo individual porque, al promediar, los errores de los modelos individuales tienden a anularse entre sí (Palmer et al., 2004; Kirtman et al., 2014). Sin embargo, la realidad será el resultado de una señal predecible (por ejemplo, debido a la dinámica ENOS) y procesos impredecibles que se consideran ruido, mientras que el promedio MME está diseñado para suprimir el ruido impredecible con el fin de identificar la señal predecible. Los eventos de ENOS son oportunidades para la predicción cuando el rol de la señal predecible es mayor que el nivel típico de ruido (por ejemplo, Vecchi et al., 2006; Kumar y Hu 2014). Las predicciones 2015-16 del índice Niño 3.4 SST fueron exitosas, especialmente cuando se yuxtaponen con la baja predictibilidad de ENOS en la década anterior (Barnston et al., 2012) y las predicciones fallidas de El Niño en 2014-15, el cual no creció como esperado (McPhaden 2015). Para los períodos objetivo en 2014, el pronóstico promedio de los modelos estadísticos (líneas azules) fue más cercano a lo observado (línea negra), mientras que el promedio dinámico (líneas rojas) sobrepasó en gran medida el calentamiento observado en Niño 3.4. Pero después de mediados de 2014, los pronósticos

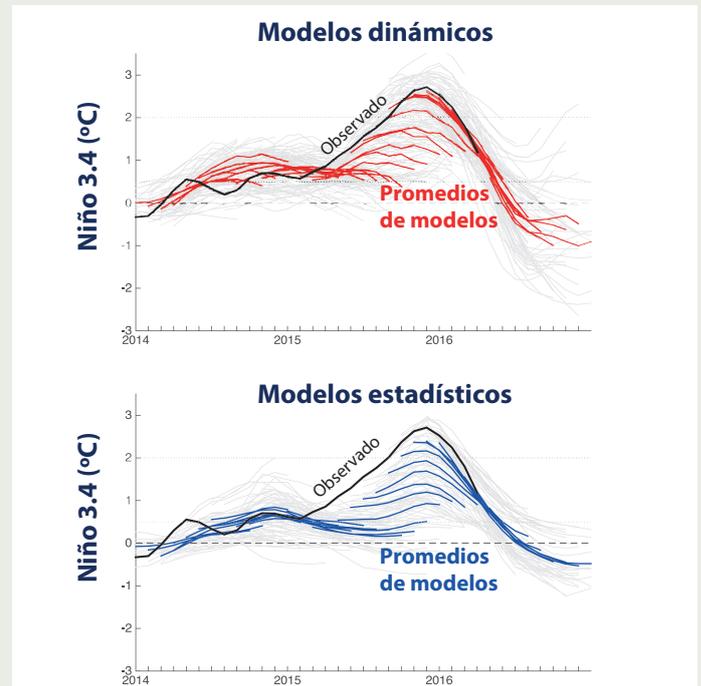


Figura 1. Pluma IRI/CPC de pronósticos multi-modelos de la anomalía de temperatura superficial del mar trimestral en la región Niño 3.4 (2014-2016) separada en modelos dinámicos (arriba) y estadísticos (abajo) para todas las condiciones iniciales y leads. Lo observado se muestra en negro, el promedio multi-modelo en rojo y azul, y el promedio de ensemble de cada modelo en gris.

mejoraron y, en general, se acercaron al modesto calentamiento (anomalía de TSM en Niño 3.4 cerca de $+0,5^{\circ}\text{C}$) observado durante varias temporadas en 2014-15.

Al salir del verano 2014-15, una serie de modelos dinámicos y estadísticos predijeron una disminución en el índice Niño 3.4. Una vez que los datos observacionales mostraron un calentamiento a principios de 2015, muchos modelos dinámicos y estadísticos comenzaron a pronosticar un El Niño más significativo. Sin embargo, ambos promedios de MME subestimaron la fuerza del pico del episodio, sin prever la posibilidad de un evento con $+2^{\circ}\text{C}$ de calentamiento hasta mediados de julio de 2015 en el caso de los dinámicos y mediados de agosto de 2015 para los estadísticos.

Para agosto de 2015, las perspectivas oficiales de ENOS fueron más asertivas considerando el potencial de un evento históricamente fuerte. En este momento, las comunicaciones públicas favorecieron explícitamente un evento que rivalizaba con los mayores eventos El Niño observados. En mayo de 2015, el *Bureau of Meteorology* (BoM) de Australia señaló que los promedios del modelo dinámico del Centro Mundial de Producción de Pronósticos a Largo Plazo de la OMM (un subconjunto de modelos

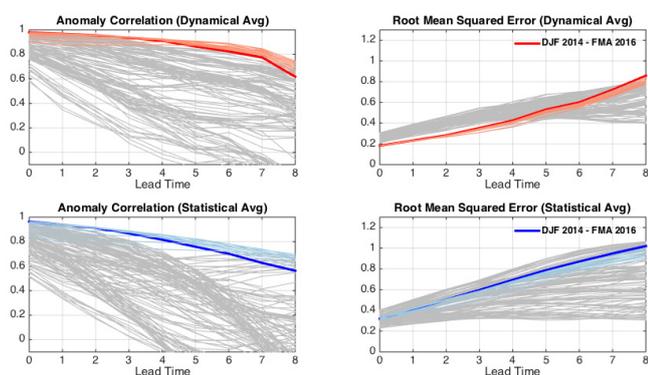


Figura 2. La correlación de anomalía (AC; izquierda) y error cuadrático medio (RMSE; derecha) para diferentes leads entre las observaciones y los promedios multi-modelo de las predicciones dinámicas (fila superior) y estadísticas (fila inferior) del índice Niño 3.4. Las gruesas líneas azules y rojas corresponden al periodo DEF 2013/14-FMA 2016. Las líneas grises corresponden a 26 periodos pasados con traslape, desfasadas en una temporada. Las líneas finas azules y rojas indican superposición con el periodo DEF 2013/14-FMA 2016.

en la pluma IRI / CPC) superaban los $+2^{\circ}\text{C}$ para las próximas temporadas de primavera/verano. Asimismo, ENFEN en el Perú también señaló que los pronósticos para la región Niño 1+2 en el Pacífico oriental según los modelos del NMME se acercaron a los pronósticos realizados en 1997-98.

En 2015, los modelos estadísticos presentaron un retraso en la tasa de crecimiento del evento con relación a los modelos dinámicos y nunca previeron la amplitud pico del evento como los dinámicos. Esta disparidad es consistente con los pronósticos previos de ENOS; en general, los modelos estadísticos a menudo están retrasados relativo a los modelos dinámicos porque no están configurados para aprovechar los cambios más recientes en la evolución observada (Barnston et al., 2012). Muchos modelos estadísticos están entrenados con datos promediados mensual o estacionalmente, por lo que no pueden resolver las variaciones de corto plazo (por ejemplo, pulsos de viento del oeste) con que los modelos dinámicos se inicializan. Así, el “éxito” de los modelos estadísticos durante 2014, puede deberse a que no estaban preparados para reaccionar a condiciones que los modelos dinámicos consideraban como precursores o amplificadores importantes del crecimiento de El Niño.

Evaluando la bondad del pronóstico utilizando la correlación entre las series temporales de las anomalías de TSM (“anomaly correlation” o AC) sobre ventanas móviles de 2 años, las predicciones promedio de los modelos dinámicos y estadísticos para el evento 2015-16 presentaron los valores más altos desde que se creó la pluma IRI/CPC en 2002. La Figura 2 (columna izquierda) muestra que los pronósticos para DEF 2014-FMA 2016 (líneas

rojas y azules gruesas) tuvieron la AC más grande en relación con otros periodos de tiempo de longitud equivalentes que se remontan a 2002 (las líneas grises corresponden a ventanas de 26 temporadas pasadas consecutivas superpuestas, deslizándose entre sí por una temporada). Las líneas rojas y azules más delgadas corresponden a rangos que están fuertemente asociados con el período reciente (por ejemplo, NDE 2013 - EFM 2016). Los ACs excedieron 0.6 hasta *lead* (tiempo de anticipación) de 8 meses para ambos tipos de modelos, con los modelos dinámicos demostrando ligeramente más habilidad para *lead-0* a *lead-7*. El promedio de modelos dinámicos tuvo un AC mayor que 0.9 hasta *lead*, mientras que el promedio de los estadísticos sólo lo hizo hasta *lead-2*. La métrica de AC premia un buen ajuste entre las series de tiempo de pronóstico y de observación durante un evento más grande (en relación con un buen ajuste durante un evento más pequeño) y, por lo tanto, la mayor AC fue parcialmente debido al hecho de que este evento fue el más grande en el registro de los modelos (2002-2016) y que fue bien pronosticado.

En comparación con la AC, el error cuadrático medio (RMSE en inglés) entre las series de anomalías de TSM de Niño 3.4 en general no indica tanta bondad de pronóstico en relación con los pronósticos anteriores en la pluma IRI/CPC (Figura 2, columna derecha). Para el promedio de modelos estadísticos, el RMSE fue de aproximadamente entre $0,8^{\circ}\text{C}$ y $1,0^{\circ}\text{C}$ pasado el *lead-4*, pero fue de $0,5^{\circ}\text{C}$ a $0,8^{\circ}\text{C}$ para el promedio de los dinámicos. Para los más largos, los modelos estadísticos y dinámicos tuvieron uno de los mayores errores desde 2002. A la inversa, para los tiempos de ejecución más cortos (*lead-0* a *lead-4*), el promedio dinámico MME tuvo uno de los errores más pequeños en el IRI / CPC historia de la pluma.

Más allá del *lead-1*, el RMSE para el promedio de los estadísticos se mantuvo aproximadamente en el cuartil superior de la dispersión del error histórico, mejorando al punto medio del spread para los *leads* más cortos.

La Figura 3 indica que todos los promedios multi-modelos tienden a subestimar los valores observados cuanto más fuerte es el evento y mayor es el *lead* (tanto para El Niño como para La Niña). Este resultado puede no ser sorprendente para un evento de gran amplitud, pero los bajos errores ($0,2^{\circ}\text{C}$ a $0,3^{\circ}\text{C}$) en los modelos dinámicos a *leads* cortos fueron bastante excepcionales.

También es necesario aplicar métricas probabilísticas de verificación para evaluar si las observaciones

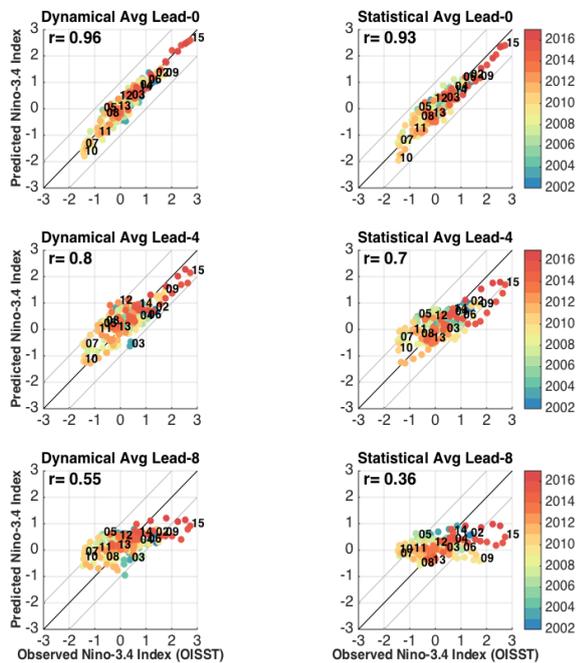


Figura 3. Gráficos de dispersión de los valores observados en el índice Niño-3.4 (trazados en abscisas) frente a los pronosticados a lead-0 (fila superior), lead-4 (fila media) y lead-8 (fila inferior) para el promedio de los modelos dinámicos (columna izquierda) y estadísticos (columna derecha) para todos los trimestres desde el inicio de la pluma IRI/CPC en febrero de 2002. El color indica el año pronosticado, mientras que los números indican el año correspondiente a los trimestres NDE. Se indica también el coeficiente de correlación lineal r .

Discusión

En algunos aspectos, los pronósticos operativos con modelos numéricos para el índice Niño 3.4 fueron los mejores desde al menos el año 2002. Sin embargo, esto no debe sugerir complacencia, ya que se vio que en el año 2014 los modelos dinámicos sobreestimaron el calentamiento, sugiriendo un evento El Niño sustancial en el Pacífico central, que finalmente quedó marginalmente entre neutral y El Niño en el verano 2014-15. Las predicciones más largas en los modelos dinámicos, intermedios y estadísticos contienen errores relativamente grandes (mayores a 0.5°C más allá del *lead-4*), lo que hace que las predicciones de la intensidad de los eventos ENOS sean un desafío continuo. Además, el promedio de los *ensembles* multi-modelos pronosticó con retraso el calentamiento inicial en la región Niño 3.4 observado a inicios de 2015, especialmente en el caso de los modelos estadísticos, y subestimaron la intensidad para *leads* mayores. Los modelos estadísticos parecen estar limitados por su incapacidad para responder a los factores de corta escala temporal que presagian el crecimiento del ENOS, aunque esto podría haber sido paradójicamente su ventaja durante 2014. Si bien se deberían buscar mejoras en las predicciones, un reto importante es comunicar que parte de la incertidumbre de los pronósticos es irreductible: siempre habrá error en las condiciones iniciales, condiciones de frontera y debido al uso de modelos imperfectos.

estuvieron dentro de la dispersión de los pronósticos. Por ello vale la pena comprobar si la dispersión de los pronósticos del modelo refleja la incertidumbre en el mundo real, ya que generalmente se piensa que la mayoría de los modelos son poco dispersivos o tienden a ser demasiado confiados (por ejemplo, Shi et al., 2015).

No sólo hay incertidumbre asociada con los modelos, sino que hay incertidumbre entre los datos observacionales utilizados para la verificación (por ejemplo, Goddard et al., 2009). En general, la tendencia predominante es hacia el desarrollo de productos de mayor resolución, por lo que para este estudio se seleccionó la fuente de datos de TSM denominada OISST diaria como base para la verificación del modelo. Pero, sin duda, los modelos estadísticos, con sus entradas y salidas generalmente en escalas más gruesas, están en una desventaja inherente cuando se comparan con un conjunto de datos de observación de alta resolución. Debido a que los modelos estadísticos a menudo son construidos y entrenados con datos de reconstrucciones estadísticas (debido a los registros más largos disponibles), puede ser útil desarrollar nuevas estrategias para aumentar la resolución de estos conjuntos de datos.

El Niño 2015-16 tuvo una magnitud histórica, comparable con los eventos de 1982-83 y 1997-98, en la región Niño 3.4 (Figura 4, panel superior izquierdo). Desde una perspectiva operativa, sin embargo, hay un par de temas que vale la pena examinar más. Un desafío fundamental es comprender mejor la influencia de las tendencias de largo plazo. La OMM recomienda que se utilice el período base de 30 años más reciente para definir las anomalías (actualmente, 1981-2010, Arguez 2012), pero es probable que parte de las anomalías en los índices ENOS no se relacione únicamente con la dinámica del ENOS, sino con las tendencias de calentamiento asociadas al cambio climático o variabilidad natural. Entonces, ¿Cómo cuantificamos mejor la parte de las anomalías relacionadas con el ENOS versus la parte relacionada con la variabilidad decadal, multidecadal o secular? ¿Y qué tan importante es diagnosticar el papel de las tendencias cuando se trata de monitoreo y predicción de El Niño sobre una base mensual o estacional? Por ejemplo, ¿Cuáles son las consecuencias de un valor de índice estacional de Niño 3.4 de $+2.3^{\circ}\text{C}$ que cambia a $+2.1^{\circ}\text{C}$ después

de eliminar las tendencias? En general, ¿Qué tan importante es el efecto de la variabilidad a largo plazo sobre las características estacionales de ENOS, la dinámica y la predictibilidad?

Otro desafío está relacionado con la diversidad de ENOS (Capotondi et al., 2015). Si bien El Niño 2015-16 fue similar a los de 1982-83 y 1997-98 en Niño 3.4, en el Pacífico oriental (Niño 1+2) el calentamiento fue solo la mitad que en esos años (Figura 4, panel inferior derecho). Los pronósticos con modelos numéricos generalmente no son tan buenos para la región Niño 1+2 como para la región Niño 3.4 (ej. Reupo y Takahashi, 2014) y, si bien hay avances (Takahashi y Dewitte, 2015), los mecanismos físicos propios de esta región no han sido suficientemente estudiados. En general, la diversidad de ENOS es un tema relativamente nuevo y difícil, pero de importancia práctica, por lo que se debe evaluar los modelos en ese sentido también para poder mejorar los pronósticos.

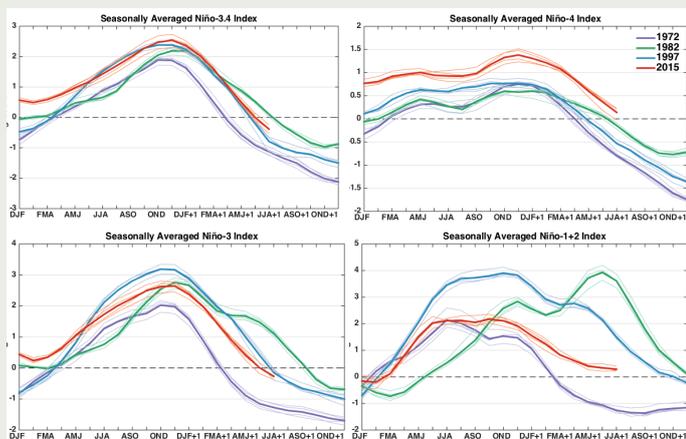


Figura 4. Evolución de los valores trimestrales de las anomalías de temperatura superficial del mar en las regiones Niño 3.4 (panel superior izquierdo), Niño 4 (panel superior derecho), Niño 3 (panel inferior izquierdo) y Niño 1+2 (panel inferior derecho) durante 2015-16 (rojo), 1997-98 (azul), 1982-83 (verde) y 1972-73 (púrpura). Las líneas finas corresponden a los conjuntos de datos ERSSTv3b, ERSSTv4, COBE y HadISST, y las líneas más gruesas son el promedio de todos los conjuntos de datos. Las anomalías se calculan con respecto a la climatología de 1981-2010.

Referencias

Arguez, A., I. Durre, S. Applequist, R. S. Vose, M. F. Squires, X. Yin, R. R. H. Jr., and T. W. Owen, 2012: NOAA's 1981-2010 U.S. climate normals: An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (11), 1687–1697, doi:10.1175/BAMS-D-11-00197.1.

Barnston, A. G., M. Chelliah, and S. B. Goldenberg, 1997: Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note. *Atmos.-Ocean*, 35 (3), 367–383, doi:10.1080/07055900.1997.9649597.

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 (5), 631–651, doi:10.1175/BAMS-D-11-00111.1.

Capotondi, A., and Coauthors, 2015: Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (6), 921–938, doi:10.1175/BAMS-D-13-00117.1.

ENFEN, 2012: Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú, Nota Técnica ENFEN.

Goddard, L., D. G. DeWitt, and R. W. Reynolds, 2009: Practical implications of uncertainty in observed SSTs. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (9), n/a–n/a, doi:10.1029/2009GL037703, 109710.

Kirtman, B. 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 (4), 585–601, doi:10.1175/BAMS-D-12-00050.1.

Kumar, A., and Z.-Z. Hu, 2014: How variable is the uncertainty in ENSO sea surface temperature prediction? *J. Climate*, 27 (7), 2779–2788, doi:10.1175/JCLI-D-13-00576.1.

L'Heureux, M. L., Takahashi, K., Watkins, A. B., Barnston, A., Becker, E. J., Di Liberto, T. E., Gamble, F., Gottschalck, J., Halpert, M. S., Huang, B., Mosquera-Vásquez, K., Wittenberg, A. 2016: Observing and predicting the 2015-16 El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* doi: 10.1175/BAMS-D-16-0009.1

McPhaden, M. J., 2015: Playing hide and seek with El Niño. *Nature Clim. Change*, 5 (9), 791–795, doi:10.1038/nclimate2775.

Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (6), 853–872, doi:10.1175/BAMS-85-6-853.

Reupo, J. y K. Takahashi, 2014: Validación de pronósticos con modelos globales: Correlaciones de TSM (1982-2010), *Bol. El Niño IGP*, 1, 1, 8-9.

Shi, W., N. Schaller, D. MacLeod, T. N. Palmer, and A. Weisheimer, 2015: Impact of hindcast length on estimates of seasonal climate predictability. *Geophys. Res. Lett.*, 42 (5), 1554–1559, doi:10.1002/2014GL062829, 2014GL062829.

Takahashi, K., 2004: The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997–1998 and 2002 El Niño events. *Ann. Geophys.*, 22 (11), 3917–3926.

Takahashi, K., 2015: La ciencia de la predicción. *Bol. El Niño IGP*, 2, 10, 4-8.

Takahashi, K., and B. Dewitte, 2016: Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dyn.*, 46 (5), 1627–1645, doi:10.1007/s00382-015-2665-3.

Vecchi, G. A., A. T. Wittenberg, and A. Rosati, 2006: Reassessing the role of stochastic forcing in the 1997–1998 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2005GL024738, 101706.