



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



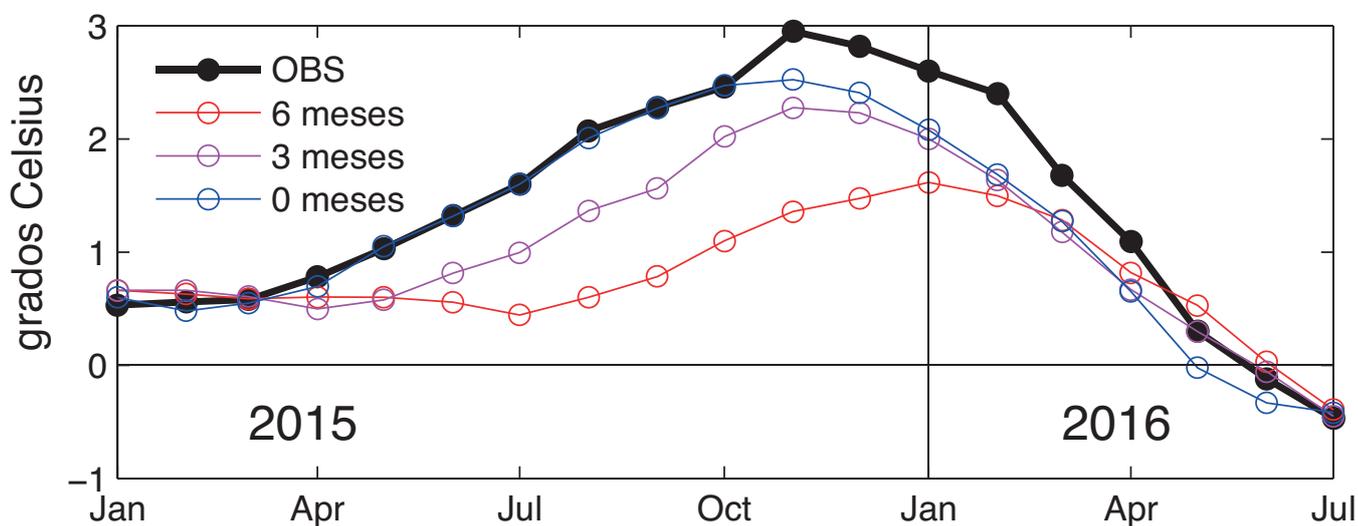
Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

Predictibilidad de El Niño-Oscilación del Sur

Anom. TSM Niño 3.4: observado y pronosticado con diferentes tiempos de anticipación



Modelado teórico-matemático de El Niño extraordinario

Ken Takahashi, Ph.D.¹
¹Instituto Geofísico del Perú

Introducción

Uno de los enfoques metodológicos más provechosos en la ciencia es el llamado “reduccionismo”, mediante el cual se intenta aislar el fenómeno que se estudia lo más posible de factores “externos” para poder establecer las reglas de su comportamiento en forma general. Esto nos ha llevado a grandes avances hacia establecer las leyes básicas de la física, desde las escalas más pequeñas (partículas elementales) hasta las más grandes (cosmología). Sin embargo, la aplicación de este enfoque en las ciencias del clima está limitada por una serie de consideraciones. Primero, se sabe *a priori* que las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento de fluidos como el aire y el agua son “no-lineales”, por lo que existe interacción entre las diferentes escalas espacio-temporales, como la que hay entre la turbulencia cerca del suelo y el cambio climático global, así que no es posible aislar en forma absoluta un fenómeno como El Niño de las otras variaciones en el clima. Segundo, los impactos de El Niño dependen de detalles geográficos y temporales, por lo que una teoría simplificada que los ignore tendrá menor utilidad práctica.

Sin embargo, las teorías simplificadas de fenómenos climáticos son esenciales, ya que proporcionan marcos conceptuales o paradigmas que guían a los científicos tanto en la evaluación de nuevas observaciones como en el avance de nuevas teorías. En el caso de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), el modelo teórico-matemático más sencillo es el llamado “modelo de oscilación carga-descarga” (Jin, 1997a; Burgers et al., 2005; ver Dewitte et al., 2014), que considera solo dos variables: un índice T de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial Oriental-Central (por ej. región Niño 3) y un índice h del contenido de calor oceánico en toda la banda ecuatorial en el Pacífico. Si bien este modelo se puede deducir de un modelo más complejo mediante simplificaciones (Jin, 1997b), evidencia observacional de su validez es la relación desfasada que se observa entre T y h (Figura 1a), de manera que valores positivos/negativos de h tienden a preceder en unos meses a valores positivos/negativos de T , lo cual ha llevado a proponer que h puede ser usado para predecir T (Meinen y McPhaden, 2000).

El modelo teórico carga-descarga es matemáticamente similar al de un péndulo con disipación (donde T sería el ángulo y h la velocidad angular) y se puede expresar como:

$$\frac{dT}{dt} = aT + bh + F$$

$$\frac{dh}{dt} = cT + dh + G$$

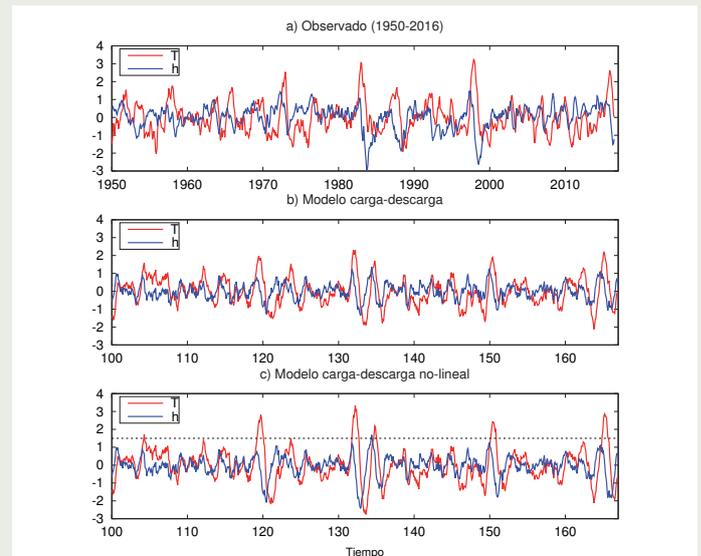


Figura 1. Series del índice de temperatura superficial del mar (T ; °C; rojo) y de contenido de calor (h ; dam; azul) según a) datos observacionales (periodo 1950-2016) y simulaciones con b) el modelo carga-descarga y c) la versión no-lineal de este. Para el modelo, se muestra el periodo de los años 100 a 167 de la simulación usando el mismo forzante estocástico, el cual presenta algunas similitudes con el observado pero que no pretende ser igual a este. En c), la línea punteada indica la temperatura crítica T_c .

donde los coeficientes a , b , c , y d son constante reales y t es el tiempo. Los coeficientes se pueden estimar haciendo aproximaciones partiendo de modelos más complejos (Jin, 1997b) o ajustándolos empíricamente usando observaciones de T y h (Burgers et al., 2005). Los coeficientes a y d representan los procesos de disipación y son suficientes para que el sistema tienda hacia el estado de equilibrio $T=0$ y $h=0$, es decir que no habría variabilidad asociada a ENOS. Por esto, se añaden los términos F y G , que son forzantes externos (factores exógenos) que normalmente son considerados impredecibles por estar asociados a fenómenos independientes de ENOS (por ej. sistemas meteorológicos de latitudes medias, oscilaciones Madden-Julian en los trópicos) y son incluidos como series de números aleatorios (forzantes estocásticos). Si bien este forzante incluye todas las frecuencias (interestacional hasta multidecadal), el modelo responde preferencialmente con periodos de oscilación de poco más de tres años (Burgers et al., 2005), lo cual corresponde a la frecuencia angular ω dada por $\omega^2 = (ad-bc) - (a+d)^2/4$. Como ejemplo, este modelo forzado por ruido blanco (igual amplitud en todas las frecuencias) muestra una variabilidad bastante similar a la observada (Figura 1b), incluyendo la irregularidad registrada en la variabilidad, que en el modelo es generada por el “ruido” en el forzante.

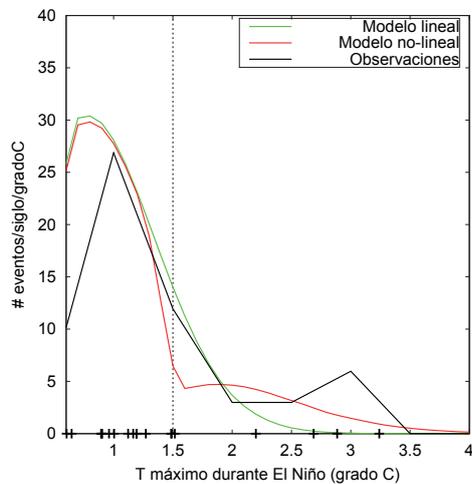


Figura 2. Histogramas de los valores máximos alcanzados por T durante El Niño (con la restricción de que $T > 0.5^\circ\text{C}$) basados en simulaciones de dos millones de años con el modelo carga-descarga (azul) y la versión no-lineal (rojo), así como de las observaciones para el periodo 1950-2016 (negro, las observaciones individuales se muestran con cruces).

Algo que el modelo carga-descarga no se espera que pueda representar es la separación del grupo de los eventos El Niño extremos del conjunto de los demás El Niño, tal como se propuso basado en datos observacionales y un modelo climático (Takahashi et al., 2011; Takahashi y Dewitte, 2015). Con el nuevo dato correspondiente a El Niño 2015-2016, se tiene un evento adicional del tipo extremo debido a su intenso calentamiento en la región Niño 3, aun cuando el calentamiento esperado en la costa sudamericana (por ej. región Niño 1+2) fuera bastante inferior al de los anteriores (L'Heureux et al., 2016). Esto se muestra en la Figura 2 (línea negra), que presenta histogramas de los valores máximos de T durante El Niño y verifica la distribución bimodal (con dos picos) en los datos observacionales, donde el segundo pico corresponde a los años 1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016, con valores sobre 2.6°C , mientras que la mayoría de los demás eventos El Niño tienen valores por debajo de 1.5°C . La excepción es El Niño 1972-1973, que presentó un valor intermedio de 2.2°C . En la misma figura se muestra el histograma basado en el modelo carga-descarga (línea azul), el cual claramente es unimodal, es decir, que no muestra una separación clara entre El Niño extremo y los demás.

Una posible explicación para la existencia de un régimen aparte para El Niño extremo es que cuando la temperatura superficial en el Pacífico Ecuatorial Oriental es suficientemente alta, se puede activar la convección profunda, con fuertes precipitaciones y vientos del oeste más intensos, lo cual implica una amplificación del proceso de retroalimentación positiva de Bjerknes que permite un crecimiento acelerado de El Niño (Takahashi y Dewitte, 2015). En un trabajo en desarrollo (Takahashi et al., 2016) se explora cómo este mecanismo puede generar los dos regímenes de El Niño en el modelo carga-descarga. Para esto, modificamos ligeramente el modelo de manera que

el coeficiente a tome un valor levemente mayor si T está por encima de una temperatura crítica, que tomamos como $T_c = 1.5^\circ\text{C}$, la cual corresponde al valor necesario para llegar desde la temperatura promedio en la región Niño 3 hasta el valor umbral de 27.5°C para la activación de la convección (Takahashi y Dewitte, 2015).

De esta manera, los eventos El Niño que sobrepasaban $T = 1.5^\circ\text{C}$ en el modelo original (Figura 1b), en la versión no-lineal alcanzan mayores temperaturas (Figura 1c). Además, se encuentra que, si bien el contenido de calor h antes de estos eventos es el mismo en ambos modelos, no ocurre así después de El Niño. Esto porque con un mayor calentamiento superficial se registra una mayor descarga de calor (Figura 1b, c), como en las observaciones (Figura 1a; Vecchi y Takahashi, 2016), que, en el modelo, luego genera un fuerte enfriamiento superficial, o sea La Niña, aunque esto último no es tan evidente en las observaciones.

El modelo no-lineal, además, es capaz de reproducir una distribución bimodal de los valores de T máximos durante El Niño (línea roja en la Figura 2), aunque con el pico correspondiente a El Niño extremo centrado en T menores que lo observado. Sin embargo, el análisis sugiere que esto puede ser explicado por lo corto del registro observacional, ya que es relativamente fácil encontrar periodos de 67 años dentro de la simulación de dos millones de años, con una distribución similar a la mostrada para las observaciones.

Este modelo carga-descarga no-lineal es muy sencillo, introduciendo solo dos parámetros adicionales al modelo original, por lo que es susceptible a ser analizado y entendido a gran profundidad, proporcionándonos una mejora en nuestro paradigma que nos permitirá interpretar mejor los datos observacionales y resultados de modelos climáticos más complejos.

Referencias

- Burgers, G., F.-F. Jin, G. J. van Oldenborgh, 2005: The simplest ENSO recharge oscillator, *Geophysical Research Letters*, 32, L13706.
- Dewitte, B., K. Takahashi, K. Mosquera, 2014: Teorías simples de El Niño-Oscilación Sur: Más allá del Oscilador Carga- Descarga, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 1, 8, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- Jin, F.-F, 1997a: An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model, *Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 811-829.
- Jin, F.-F, 1997b: An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model, *Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 830-847.
- L'Heureux, M., K. Takahashi, A. B. Watkins, A. G. Barnston, E. J. Becker, T. E. Di Liberto, F. Gamble, J. Gottschalck, M. S. Halpert, B. Huang, K. Mosquera-Vásquez, A. T. Wittenberg, 2016: Observing and predicting the 2015-16 El Niño, en revisión en el *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Meinen, C. S., M. J. McPhaden, 2000: Observations of warm water volume changes in the equatorial Pacific and their relationship to El Niño and La Niña, *Journal of Climate*, 13, 3551-3559.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, B. Dewitte, 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical ENSO and El Niño Modoki, *Geophysical Research Letters*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.
- Takahashi, K., C. Karamperidou, B. Dewitte, 2016: A simple theoretical model of strong and moderate El Niño regimes, en preparación para *Climate Dynamics*.
- Takahashi, K., y B. Dewitte, 2015: Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-015-2665-3.