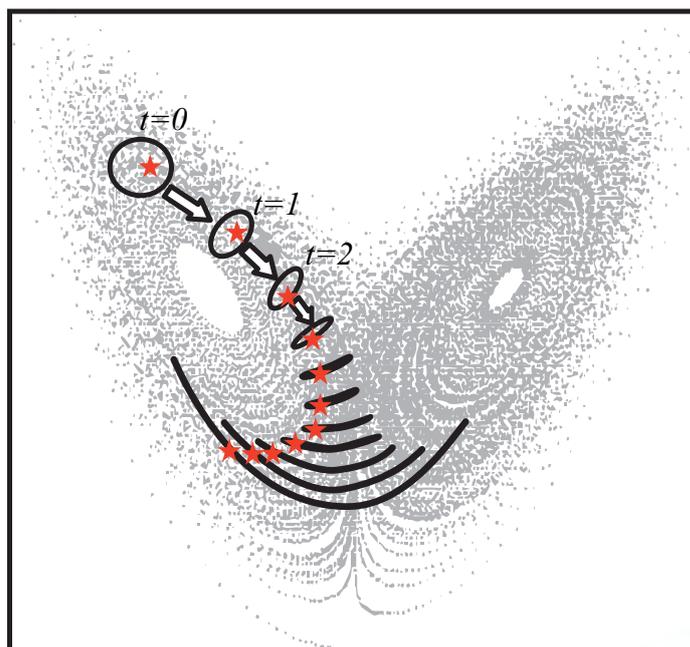
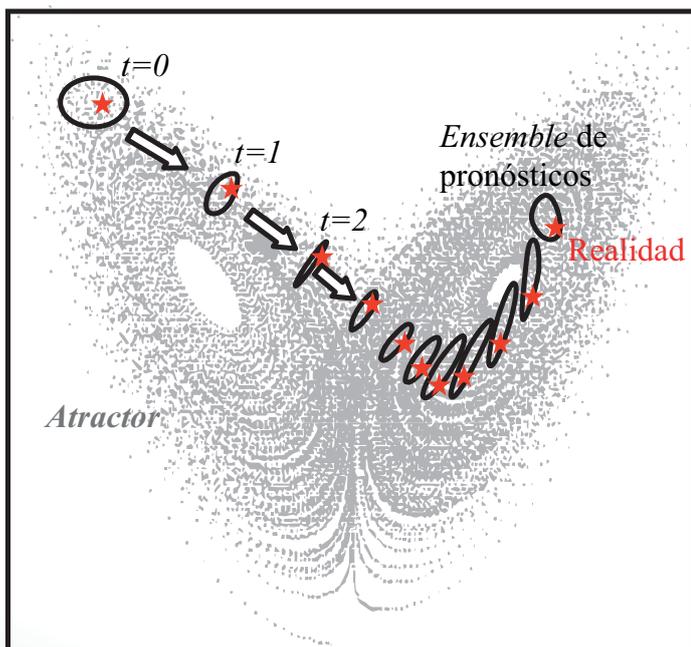


Programa Presupuestal por Resultados N° 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres" Producto: "Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño"

# "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"

## Boletín Técnico

### La ciencia de la predicción



Ejemplos de pronósticos en *ensembles* en un sistema caótico.  $t=0$  es la condición inicial real y las elipses indican el *ensemble* de pronósticos.

# Artículo de Divulgación Científica

## La ciencia de la predicción

Constantemente realizamos predicciones, desde las más sencillas, como que el sol saldrá cada mañana, hasta las más sofisticadas, como decidir si conviene tomar un préstamo bancario. Independientemente de cómo se hagan estas predicciones, se pueden distinguir entre sí por nuestro grado de certeza, que depende de nuestros conocimientos y experiencia previos. Claramente, la complejidad del fenómeno a predecirse tiene un rol dominante en la confiabilidad de los pronósticos.

## Leyes de Newton y determinismo

Las leyes de Newton (1687) produjeron una revolución en nuestra capacidad de predicción de los fenómenos físicos, permitiendo calcular con bastante precisión las órbitas de los cuerpos celestes partiendo de leyes universales y mediciones cuidadosas. Tal fue el éxito de la aplicación de este método a muchos fenómenos naturales que Laplace (1814) afirmó que para *“una inteligencia que, en un instante dado, pueda comprender todas las fuerzas que animan la naturaleza y la posición respectiva de los entes que la componen, (...) nada sería incierto, y el futuro, como el pasado, estarían abiertos a sus ojos.”* Es decir, la predicción perfecta sería cuestión de calcular la evolución del Universo utilizando las leyes de la física partiendo de un conocimiento preciso de su estado actual.

## Caos y límites a la predictabilidad

Lamentablemente, existe una limitación fundamental con lo planteado por Laplace. Si bien las leyes y métodos de Newton permiten en forma directa el cálculo del comportamiento futuro de muchos fenómenos, existen muchos casos donde las soluciones matemáticas presentan alta sensibilidad a pequeños errores en las condiciones iniciales de sus variables, como en el modelo atmosférico simple de Lorenz (1963) que lo llevó a concluir que la *“predicción del futuro suficientemente distante es imposible por cualquier método, a menos de que las condiciones presentes se conozcan exactamente. En vista de la inexactitud e incompletitud de las observaciones atmosféricas, el pronóstico preciso de muy largo plazo parecería inexistente”*. Para ilustrar este fenómeno, Lorenz planteó la pregunta hipotética: *“¿puede el aleteo de una mariposa en Brasil generar un tornado en Texas?”* (Lorenz, 1972). Esta alta sensibilidad a las condiciones iniciales, se conoce matemáticamente como “caos”.



**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.*

## Fuentes de incertidumbre para el pronóstico

Entre las principales fuentes de incertidumbre en los pronósticos del tiempo o clima (Palmer, 2006) tenemos la incertidumbre en las “observaciones” (datos medidos) usadas para definir las condiciones iniciales y la incertidumbre en los modelos para asimilar las observaciones y hacer el pronóstico (por ej. un modelo climático global). Además tenemos factores externos al sistema climático (ej. erupciones volcánicas) que no son considerados predecibles.

La incertidumbre en la condición inicial es inevitable. Si bien existen técnicas matemáticas sofisticadas para la “asimilación de datos” (ej. Kalnay, 2003), que utilizan las relativamente pocas observaciones existentes de las variables como temperatura, velocidad del viento, humedad, etc., para reconstruir los valores de estas sobre todo punto de la atmósfera y el océano del planeta, no es posible esperar un resultado perfecto. Dada la naturaleza caótica de la dinámica atmosférica, los errores crecerán y eventualmente inutilizarán el pronóstico, por lo que no podemos aspirar a un pronóstico indefinidamente preciso.

Sin embargo, dada nuestra estimación de la condición inicial y su incertidumbre, sí podemos estimar el *rango* de posibles valores futuros. Para este fin, se utiliza el método de los *ensembles*, el cual consiste en realizar un conjunto de pronósticos con condiciones iniciales ligeramente diferentes. Por ejemplo, en la

Figura 1 mostramos para el modelo de Lorenz (1963) una vista de su espacio de fase tridimensional (las coordenadas son las variables), en el cual los valores típicamente se encuentran sobre el “atractor” del modelo (aproximadamente indicado por los puntos grises). Si la condición inicial real (estrella roja) no se conoce con exactitud pero sabemos que está en el rango indicado por la elipse en  $t=0$ , podemos generar pronósticos de este conjunto de condiciones iniciales y esperamos que, al evolucionar este *ensemble*, el estado real continuará dentro de este conjunto. La distribución de los miembros del *ensemble* nos da una idea probabilística de cuál será la realidad.

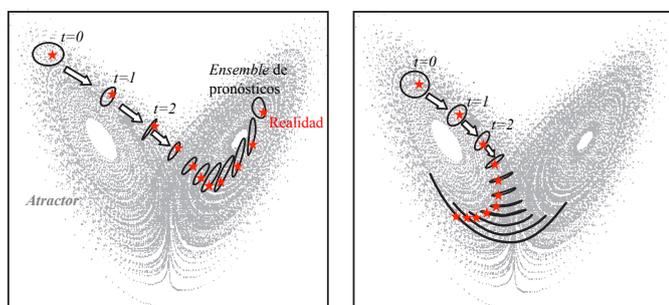


Figura 1. Sensibilidad a las condiciones iniciales en el modelo de Lorenz (1963; adaptado de Palmer, 2006). Las coordenadas en este “espacio de fase” tridimensional indican los valores de las tres variables del modelo. Los puntos en gris indican estados típicos de este modelo. La estrella roja indica la condición inicial real y las elipses indican el “ensemble” que la engloban y su evolución.

La otra gran fuente de incertidumbre, también conocida como *incertidumbre estructural*, es en la formulación de los modelos mismos, (IPCC, 2010). En general, nosotros no conocemos las ecuaciones exactas que gobiernan el fenómeno que queremos pronosticar, sino que tenemos modelos aproximados. Por ejemplo, si las ecuaciones del sistema real se parecen pero no son las del modelo de Lorenz (1963) y nosotros empleamos estas últimas para nuestro pronóstico, podemos llegar a un punto donde la evolución de la realidad escape al *ensemble*, ya que obedece a un atractor distinto y que no conocemos (Figura 2). El ejemplo de la Figura es particularmente extremo ya que la realidad se queda en el lóbulo izquierdo de su atractor, mientras que el modelo predice una transición al lóbulo derecho. Es decir, el pronóstico es lo opuesto a la realidad.

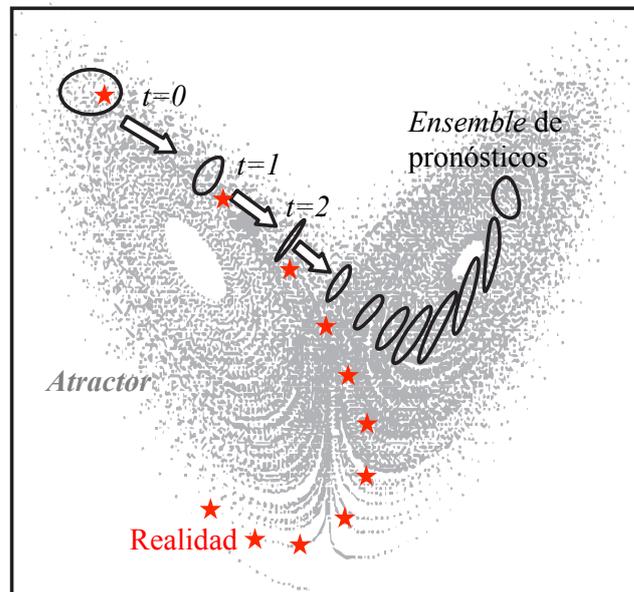


Figura 2. Incertidumbre estructural ilustrada con el modelo de Lorenz (1963; adaptado de Palmer, 2006). Las estrellas rojas indican la evolución del estado del sistema real que se quiere pronosticar.

## Incertidumbre estructural en el pronóstico de El Niño

La incertidumbre estructural es particularmente relevante para el pronóstico climático en la región del Pacífico Oriental. En la Figura 3 vemos la temperatura superficial del mar observada en la región Niño 1+2 y los *ensembles* de pronósticos realizados con el modelo climático CFS v2 de la NOAA, los cuales reproducen relativamente bien la transición del invierno al verano, aunque en general con temperaturas más cálidas que las observadas. Esta diferencia promedio indica que el atractor del modelo es distinto al del sistema climático real y se traduce en errores sistemáticos del modelo, los cuales tienden a crecer conforme el pronóstico avanza (ej. Takahashi, 2015; Zhang et al., 2015). Por otro lado, el modelo iniciado en agosto no pronostica muy bien las diferencias de año en año en el verano (Reupo y Takahashi, 2014). Si bien El Niño extraordinario de 1997-1998 parece haber sido bien pronosticado, el modelo pronosticó temperaturas incluso mayores para el verano de 2009-2010, el cual no correspondió a El Niño costero (ENFEN, 2012). Similarmente, el pronóstico de El Niño costero moderado 1991-1992 fue más cálido que el pronóstico para el extraordinario 1982-1983. Además los *ensembles* no presentan mayor dispersión, por lo que es posible que la incertidumbre en las condiciones iniciales no sea tan importante como la incertidumbre estructural.

La forma común de lidiar con los errores sistemáticos crecientes, o “deriva”, es el restar el error promedio correspondiente a los diferentes meses iniciales y tiempo de pronóstico (“*bias correction*” en inglés; ej. Reupo y Takahashi, 2014). En general, se pueden usar métodos estadísticos más complejos para corregir los pronósticos, como el uso de técnicas bayesianas (Coelho et al., 2004). Además, se puede aprovechar que existe una diversidad de modelos climáticos disponibles cuyos pronósticos se pueden combinar con la esperanza de que sus errores se cancelarán mutuamente (Coelho et al., 2004; Rodrigues et al., 2014). Sin embargo, esto depende de que los modelos sean independientes y sabemos que estos modelos no lo son (Knutti et al., 2013), presentando los mismos errores sistemáticos y, en general, teniendo peor performance para el Pacífico Oriental que para el Central (Reupo y Takahashi, 2014). El problema es particularmente serio con respecto a los eventos El Niño extraordinario ya que aparentemente pertenecen a un régimen dinámico distinto a los demás años (Takahashi y Dewitte, 2015ab), por lo que los dos eventos observados son muy pocos para poder implementar una corrección empírica a los modelos. Más aún, la existencia de variabilidad climática en escala de décadas (ej. Montecinos, 2015) parece tener un efecto sustancial en el comportamiento de El Niño (Takahashi y Dewitte, 2015c), por lo que los datos de la fase cálida de los años 80 y 90 podrían no ser representativos de El Niño ahora. Similarmente, el calentamiento global traería cambios (lentos) en El Niño, particularmente en los eventos extremos (Cai et al., 2015).

## Evaluación experta

*“Hay cosas que sabemos que sabemos (...). También sabemos que hay cosas que sabemos que no sabemos (...). Pero también hay cosas que no sabemos que no sabemos. Y si uno mira a lo largo de la historia de nuestro país y otros, es la última categoría que tiende a ser la difícil.”*  
(Rumsfeld, 2002)

Si bien Rumsfeld, entonces Secretario de Estado de los EE.UU., respondía a la pregunta de si había evidencia de que Irak proporcionaba armas de destrucción masiva a terroristas, el tipo de análisis de inteligencia para evaluar la probabilidad de algún escenario tiene bastante afinidad con el pronóstico climático realizado en centros operacionales. En ambos casos, se debe analizar información diversa y a veces contradictoria. A pesar de que en el caso climático contamos con modelos numéricos, hemos visto que no es posible depender solo de estos y más bien sus resultados pasan a ser una pieza más de información para el análisis, el cual debe sopesar todas las interpretaciones consistentes con los datos y evaluar sus probabilidades.

En la evaluación experta de probabilidades, es esencial ser cuantitativo. La ambigüedad del lenguaje hace que expresiones de significado aparentemente claro puedan significar distintas cosas a diferentes personas. Por ejemplo, cuando los EE.UU. planeaban la invasión de Bahía de Cochinos en Cuba, se le informó al Presidente Kennedy que se estimaba que el plan tenía una “buena oportunidad” (“*fair chance*”) de éxito. Sin embargo, si Kennedy hubiera sabido que, para el analista, “buena oportunidad” significaba solo 25% de éxito, probablemente su decisión no hubiera sido tan desastrosa (Neustadt & May, 1988). Un ejemplo de cómo hacer esto es el Panel de Expertos de Cambio Climático de las Naciones Unidas, quien ha adoptado un lenguaje con una equivalencia numérica explícita en su evaluación del estado de conocimiento del cambio climático (Tabla 1; IPCC 2010).

Un desafío clave para la evaluación experta es que los humanos tenemos sesgos con los cuales debemos lidiar explícitamente. Varios sesgos son comunes a todas las personas y, por lo mismo, son predecibles, llevando a la creación de disciplinas como la economía conductual. A grandes rasgos, tenemos dos modos de pensamiento, el primero es rápido e instintivo y el segundo lento y racional (Kahnemann, 2011). El instinto, o “modo uno”, actúa usando reglas muy simples, rápidas y efectivas (heurísticas)

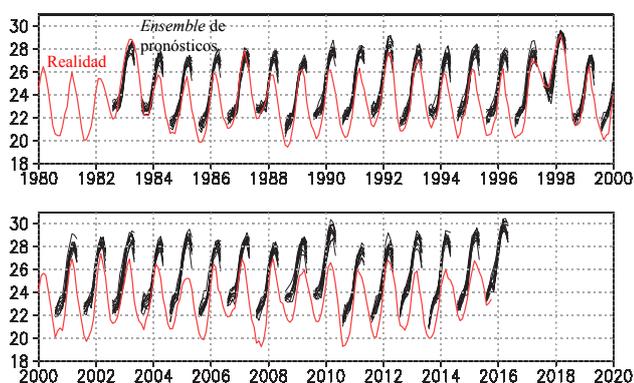


Figura 3. Incertidumbre estructural ilustrada con el modelo climático NOAA CFS v2. La temperatura superficial del mar (°C) en la región Niño 1+2 cerca de la costa peruana para el periodo 1980-2015 (rojo), así como la climatología o “atractor” (gris). En negro se muestran los ensembles de pronósticos realizados con el modelo cada agosto.

Término	Probabilidad estimada
Virtualmente cierto	99-100%
Muy probable	90-100%
Probable	66-100%
Tan probable como que no	33-66%
Improbable	0-33%
Muy improbable	0-10%
Excepcionalmente improbable	0-1%

Tabla 1. Escala de probabilidades adoptada por el Panel de Expertos de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC, 2010).

desarrolladas evolutivamente para mantenernos con vida ante amenazas en la naturaleza. Sin embargo, en el mundo actual, puede llevar a sesgos (Plous, 1993; Kahnemann, 2011). Como ejemplo, intente responder rápidamente la siguiente pregunta:

*Si el precio de un bate y una pelota juntos es de 11 soles y el bate cuesta 10 soles más que la pelota, ¿cuánto cuesta la pelota?*

La respuesta de un sol viene muy rápidamente a la mente y es una *aproximación* bastante buena, pero como se puede verificar haciendo el cálculo con más cuidado, no es la correcta (Kahnemann, 2011). Estas respuestas intuitivas (“modo uno”) son útiles cuando llevan a decisiones de vida o muerte que deben ser tomadas rápidamente, pero son riesgosas porque pueden llevar a grandes errores. Por eso es que el pensamiento crítico asociado al “modo dos”, explícitamente activado mediante el método científico, es esencial para una evaluación confiable. Sin embargo, los científicos son también humanos y son también susceptibles a estos sesgos si no se mantienen constantemente alertas (Nuzzo, 2015). Por eso la máxima del Nobel en física R. P. Feynman (1985): *“el principio más importante es no engañarse a uno mismo – y uno mismo es la persona más fácil engañar”*.

En un estudio multianual, evaluando pronosticadores en una diversidad de temas de interés internacional, se encontró que la mayoría no tenían mayor habilidad que *“monos lanzando dardos”*: ocasionalmente alguno le atina al blanco (Tetlock & Gardner, 2015).

Sin embargo, se encontró que un pequeño grupo de “superpronosticadores” sí tienen habilidad demostrada. En este estudio se identificó la forma de pensar y trabajar como la principal característica de estos superpronosticadores, no tanto el conocimiento que puedan tener. Estos no se basan en una sola idea, teoría o ideología para el pronóstico, sino que acopian toda la información disponible y evalúan cómo cada pieza de información puede afectar el pronóstico, manteniéndose abiertos a diferentes interpretaciones de los mismos datos.

El pronóstico es siempre probabilístico e incierto. Si un pronosticador está 100% seguro de algo, le falta imaginación o está incurriendo en sesgos. Por ejemplo, en la película *“Zero Dark Thirty”* una analista de la CIA insistió en un 100% de probabilidad de haber ubicado a Bin Laden, pero si bien Bin Laden efectivamente estaba en esa casa, esa evaluación fue irracional (“modo uno”), ya que habían otras posibilidades (Tetlock & Gardner, 2015).

En ese sentido, un importante desafío es pronosticar algo “fuera de muestra” (“*out of sample*”), es decir el imaginar la posibilidad de que ocurra algo que no ha ocurrido antes. Esta limitación parece haber sido una de las razones por las cuales muy pocos previeron la crisis financiera de los EE.UU. a fines de los años 2000 (Silver, 2012). Por esto, la experiencia por sí sola no es suficiente para realizar buenos pronósticos. En general, el juicio intuitivo de un experto es confiable solo si esta persona ha experimentado muchas situaciones similares anteriormente y además ha recibido siempre retroalimentación sobre qué tan buenos han sido estos juicios (Kahnemann, 2011).

Para mejorar hay que aprender de nuestros errores, por lo que es necesario una evaluación cuantitativa, lo cual requiere un sistema de puntuación a los pronósticos, como el índice de Brier que es bastante utilizado en pronóstico climático probabilístico. Sin embargo, es esencial también que los pronósticos sean sobre preguntas suficientemente precisas que se puedan responder sin ambigüedad (Tetlock & Gardner, 2015). Por ejemplo, decir “en los próximos días aumentará la temperatura” nunca se puede demostrar si es falso, ya que no dice ni cuándo ni dónde. Por otro lado, decir “la temperatura máxima medida en la estación meteorológica de SENAMHI en Campo de Marte dentro de los siguientes siete días será superior a la mayor medida en los siete días recientes” sí se puede verificar o falsificar.

Por otro lado, el pronóstico tiende a ser mejor cuando se trabaja en equipo, incluso entre

“superpronosticadores”, ya que cada pronosticador puede compartir información y perspectiva con los demás que mejora el pronóstico de cada uno (Tetlock & Gardner, 2015). Eso sí, hay que tener cuidado de no desarrollar pensamiento de grupo (“groupthink”), donde el individuo pierde su pensamiento crítico independiente (ej. Plous, 1993).

## Comentarios finales

Para el pronóstico de El Niño contamos con varios modelos climáticos (aunque no son tan independientes como quisiéramos), así como una variedad de teorías, pero también un registro histórico demasiado corto y una gran diversidad entre eventos El Niño, además de la variabilidad decadal y el cambio climático. El desarrollo de un sistema de pronóstico automatizado bien calibrado y “objetivo” (aunque siempre habrán decisiones subjetivas sobre cómo calibrar el sistema) de El Niño en el Pacífico Oriental es un desafío que requiere aún mucha investigación científica de alto nivel. Para esto necesitamos bastante más capacidad científica en nuestro país, así como una estrecha colaboración con la comunidad científica internacional.

La diversidad de El Niño plantea un serio problema, por lo cual métodos puramente empíricos están limitados para el pronóstico “fuera de muestra”. Por lo pronto, la mejor estrategia para mejorar el pronóstico es contar con un sólido equipo de científicos que entiendan los mecanismos físicos e interpreten toda la información disponible, aportando perspectivas e información distintas y complementarias. Además, tomando en cuenta los hallazgos recientes de la psicología, se debe buscar optimizar la forma como estos pronósticos son realizados, así como la manera de presentarlos a los usuarios.

## Referencias

Cai, W., A. Santoso, G. Wang, S.-W. Yeh, S.-I. An, K. Cobb, M. Collins, E. Guilyardi, F.-F. Jin, J.-S. Kug, M. Lengaigne, M. J. McPhaden, K. Takahashi, A. Timmermann, G. Vecchi, M. Watanabe, and L. Wu, 2015: ENSO and greenhouse warming, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate2743.

Coelho, C. A. S., S. Pezzulli, M. Balmaseda, F. J. Doblas-Reyes, 2004: Forecast calibration and combination: A simple Bayesian approach for ENSO, *Journal of Climate*, 17, 1504-1516.

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

Feynman, R. P., 1985: “Surely You’re Joking, Mr. Feynman!” *Adventures of a Curious Character*, Norton.

Kahnemann, D., 2011: *Thinking Fast and Slow*, Farrar, Strauß and Giroux.

Kalnay, E., 2003: *Atmospheric modeling, data assimilation and*

*predictability*, Cambridge University Press.

Knutti, R., D. Masson, A. Gettelman, 2013: *Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there*, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/grl.50256.

IPCC, 2010: *Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Addressing Uncertainties*.

Laplace, P. S., 1812: *Essai philosophique sur les probabilités*.

Lorenz, E. N., 1963: *Deterministic nonperiodic flow*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.

Lorenz, E. N., 1972: *Predictability: Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?*, Talk at the 139th Meeting of the American Association for the Advancement of Sciences, Washington DC.

Montecinos, A., 2015: *Variabilidad climática interdecadal en el Pacífico*, Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Vol. 2, N°1, Enero, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.

Neustadt, R. E., and May, E. R., 1988: *Thinking in Time: The Uses of History for Decision-Makers*, The Free Press.

Newton, I., 1687: *Principios matemáticos de la filosofía natural*.

Nuzzo, R., 2015: *How scientists fool themselves – and how they can stop*, *Nature*, 526, 182–185, doi:10.1038/526182a.

Palmer, T. N., 2006: *Predictability of weather and climate: from theory to practice*, *Predictability of Weather and Climate*, Palmer, T. N., & Hagedorn, R., Eds. Cambridge University Press.

Silver, N., 2012: *The Signal and the Noise. The Art and Science of Prediction*, Penguin Press.

Reupo, J., y Takahashi, K., 2014: *Validación de pronósticos con modelos globales: Correlaciones de TSM (1982-2010)*, Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Vol. 1, N°1, Enero, 8-9, Instituto Geofísico del Perú.

Rumsfeld, D., 2002: DoD News Briefing - Secretary Rumsfeld and Gen. Myer, <http://archive.defense.gov/Transcripts/Transcript.aspx?TranscriptID=2636>.

Takahashi, K., 2015: *Modelos climáticos y sus errores promedio en el Pacífico*, Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Vol. 2, N°6, Junio, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.

Takahashi, K., & Dewitte, B., 2015a: *Strong and moderate nonlinear El Niño regimes*, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-015-2665-3.

Takahashi, K. y Dewitte, B., 2015b: *Física de El Niño extraordinario*, Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Vol. 2, N°4, Abril, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.

Takahashi, K. y Dewitte, B., 2015c: *Influencia de la variabilidad decadal en El Niño-Oscilación Sur*, Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, Vol. 2, N°5, Mayo, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.

Rodrigues, L., F. Doblas-Reyes, C. Coelho, 2014: *Multi-model calibration and combination of tropical seasonal sea surface temperature forecasts*, *Climate Dynamics*, 42, 3-4, 597-616.

Tetlock, P. E., & Gardner, D., 2015: *Superforecasting. The Art and Science of Prediction*, Crown Publishers.

Zhang, X., H. Liu, and M. Zhang, 2015: *Double ITCZ in coupled ocean-atmosphere models: From CMIP3 to CMIP5*, *Geophysical Research Letters*, 42, 8651–8659, doi:10.1002/2015GL065973.