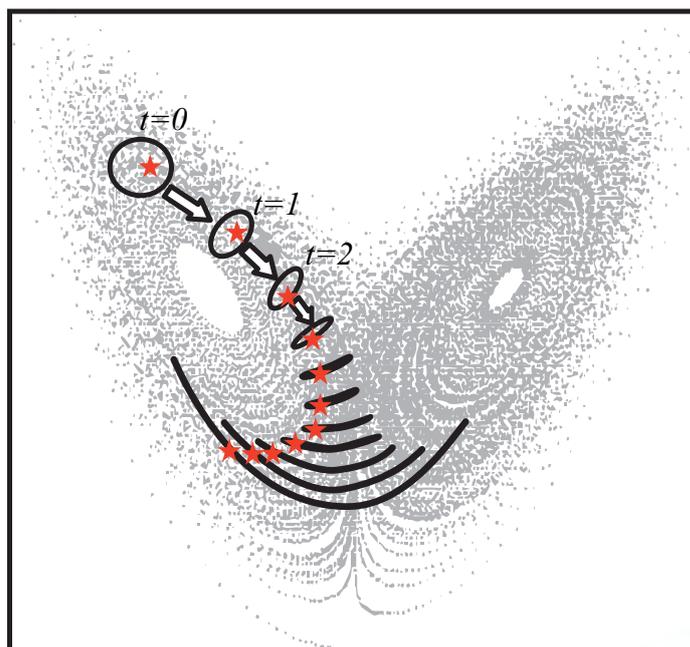
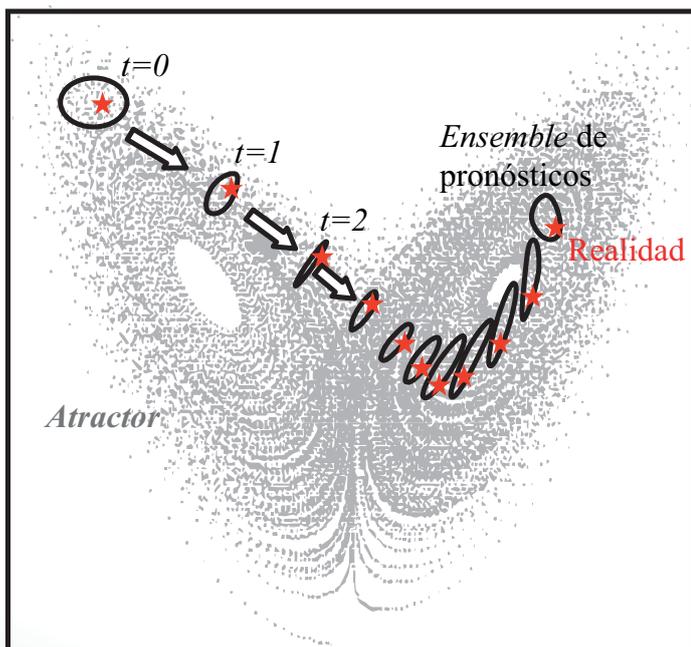


Programa Presupuestal por Resultados N° 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres" Producto: "Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño"

"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.

Contenido

2 - 3 **Introducción**

4 - 8 **Artículo de Divulgación Científica**

9 - 10 **Avances Científicos**

11 - 13 **Resumen Informe Técnico**

14 - 15 **Comunicado Oficial ENFEN**

Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”.

Producto: Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño.

Actividad: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño.

Manuel Pulgar Vidal
Ministro del Ambiente

Ronald Woodman
Presidente Ejecutivo IGP

José Macharé
Director Científico IGP

Ken Takahashi
Responsable Producto El Niño - IGP

Equipo científico: Ken Takahashi, Kobi Mosquera, Jorge Reupo, Berlín Segura

Edición: Cristiana Leucci
Diseño y Diagramación: Dante Guerra

Carátula: Adaptado de Palmer, 2006.

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
IV Etapa - Ate
Teléfono (511) 3402200

Impreso por Empresa: Imprenta Editora Gráfica Real SAC.
Jr. Independencia 953 - Trujillo - La Libertad
Teléfono (44) 25-3324

Lima, Diciembre del 2015

Hecho el Depósito Legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-17912

Introducción

El Programa Presupuestal por Resultados (PPR) es una estrategia de gestión pública que vincula la asignación de recursos a productos y resultados medibles a favor de la población. Dichos resultados se vienen implementando progresivamente a través de los programas presupuestales, las acciones de seguimiento del desempeño sobre la base de indicadores, las evaluaciones y los incentivos a la gestión, entre otros instrumentos que determina el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) a través de la Dirección General de Presupuesto Público, en colaboración con las demás entidades del Estado.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) viene participando en el Programa Presupuestal por Resultados 068: “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. A partir del año 2014, algunas de las instituciones integrantes del Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) participan en este PPR con el producto denominado “Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño”, que consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural océano-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permitan la toma de decisiones a autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, la cual incluye la síntesis y evaluación de los pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos de pronóstico, así como el desarrollo de estudios científicos que fortalecerá en forma continua la capacidad para este fin.

El presente Boletín tiene como objetivo difundir conocimientos científicos, avances científicos y noticias relacionadas a este tema, con la finalidad de mantener informados a los usuarios y proporcionarles las herramientas para un uso óptimo de la información presentada. Además, comparte una versión resumida del Informe Técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068. Dicho Informe contiene información actualizada operativamente y proporcionada por el IGP como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será diseminada a los usuarios. Se advierte que, en caso de discrepancias, el Informe Técnico del ENFEN prevalecerá.

Los resultados de esta actividad están disponibles en:
www.igp.gob.pe/sysppr.



IGP



ENFEN

El Instituto Geofísico del Perú es una institución pública al servicio del país, adscrito al Ministerio del Ambiente, que genera, utiliza y transfiere conocimientos e información científica y tecnológica en el campo de la geofísica y ciencias afines, forma parte de la comunidad científica internacional y contribuye a la gestión del ambiente geofísico con énfasis en la prevención y mitigación de desastres naturales y de origen antrópico. En el marco del Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), el IGP rutinariamente aporta información experta sobre modelos y pronósticos relacionados con El Niño y fenómenos asociados.

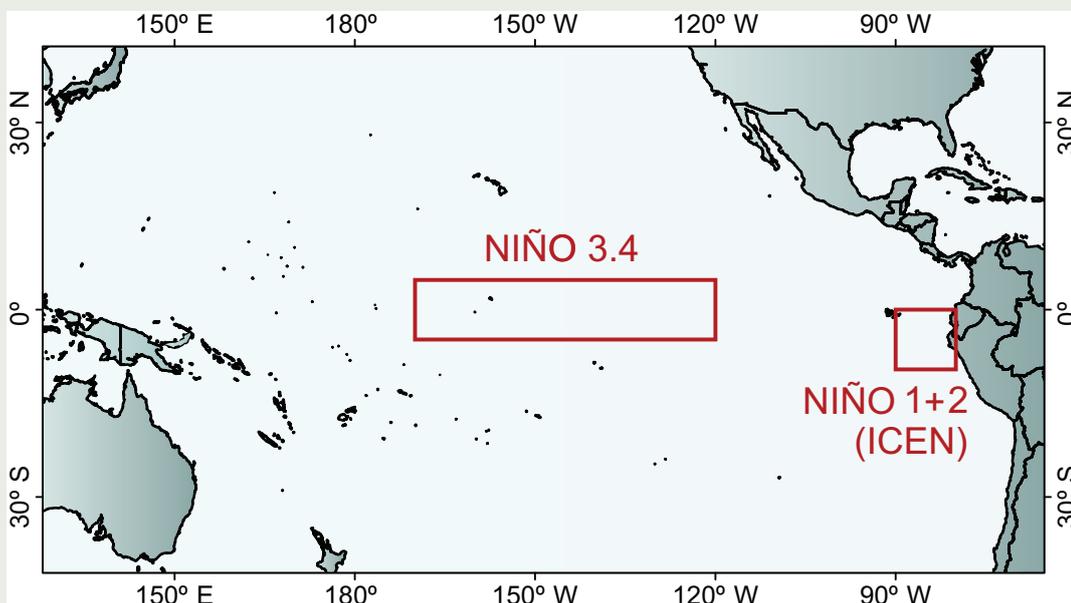
El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), conformado por representantes de IMARPE, DHN, IGP, SENAMHI, ANA e Indeci, es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.

Según Resolución Ministerial 761-97-PE, el ENFEN tiene entre sus funciones el “mantener informado sobre la posible ocurrencia del Fenómeno El Niño, para que con ello se permita adoptar decisiones para adecuar y proteger la infraestructura existente en los distintos sectores, en prevención a los posibles daños que pudiera causar este fenómeno a la economía nacional y la población peruana”, así como “orientar a los diversos sectores medidas pragmáticas de previsión que permitan reducir daños y/o aprovechar beneficios”.

Para este fin, el ENFEN realiza el pronóstico, monitoreo y estudio continuo de las anomalías del océano y la atmósfera del mar peruano y a nivel global, a través de la elaboración de estudios y análisis científicos basados en la información proveniente de diversas redes de observación y modelos de variables oceanográficas, meteorológicas, hidrológicas y biológico-pesqueras. También, al menos mensualmente, emite pronunciamientos que son “preparados colegiadamente, acopiando la mejor información científica disponible y de competencia de cada institución respecto de su sector y genera la información técnica en forma colegiada para su difusión a los usuarios”.

Además, un objetivo central del ENFEN es “estudiar el Fenómeno El Niño, con el fin de lograr una mejor comprensión del mismo, poder predecirlo y determinar sus probables consecuencias”, lo cual se desarrolla mediante la investigación científica.

El ENFEN es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.



El mapa muestra las dos regiones que definen los principales índices de temperatura superficial del mar utilizadas para monitorizar El Niño y La Niña. La región Niño 1+2 (90°-80°W, 10°S-0°), en la que se basa el Índice Costero El Niño (ICEN), se relaciona con impactos en la costa peruana, mientras que la región Niño 3.4 (5°S-5°N, 170°W-120°W) se asocia a impactos remotos en todo el mundo, incluyendo los Andes y Amazonia peruana.

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.

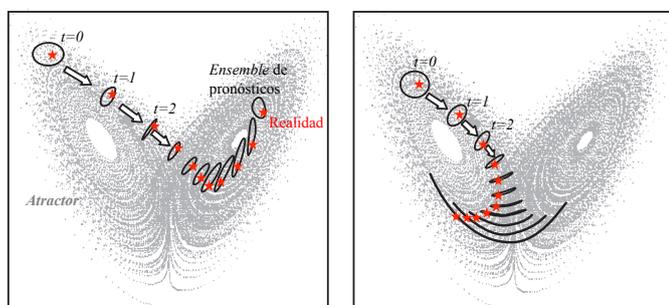


Figura 1. Sensibilidad a las condiciones iniciales en el modelo de Lorenz (1963; adaptado de Palmer, 2006). Las coordenadas en este “espacio de fase” tridimensional indican los valores de las tres variables del modelo. Los puntos en gris indican estados típicos de este modelo. La estrella roja indica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

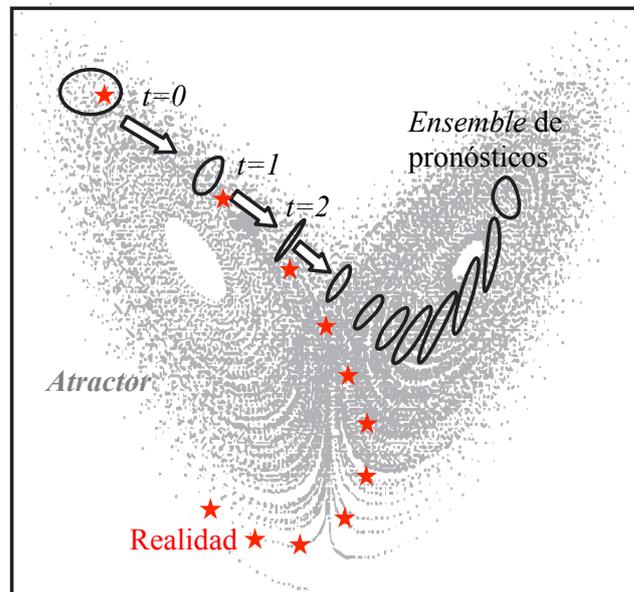


Figura 2. Incertidumbre estructural ilustrada con el modelo de Lorenz (1963; adaptado de Palmer, 2006). Las estrellas rojas indican la evolución del estado del sistema real que se quiere pronosticar.

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)

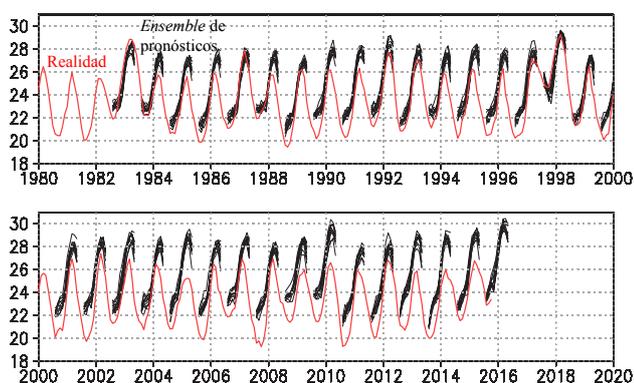


Figura 3. Incertidumbre estructural ilustrada con el modelo climático NOAA CFS v2. La temperatura superficial del mar (°C) en la región Niño 1+2 cerca de la costa peruana para el periodo 1980-2015 (rojo), así como la climatología o “atractor” (gris). En negro se muestran los ensembles de pronósticos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

Modelo numérico tridimensional de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial

Jeancarlo Fajardo, Lic.1; Kobi Mosquera, Dr.1; Ken Takahashi, Ph.D.1
1Instituto Geofísico del Perú

Introducción

El estudio de la onda Kelvin ha tomado importancia a nivel nacional en los últimos años debido a los efectos que esta produce al impactar en las costas peruanas (Mosquera et al., 2013). Si bien existen dos tipos de onda Kelvin que siempre viajan hacia el este en el Pacífico Ecuatorial, es la onda Kelvin de hundimiento, la que se propaga a lo largo de la costa peruana y que en ocasiones produce calentamiento anómalo que conlleva a precipitaciones extremas, daños materiales con cuantiosas pérdidas económicas, e impactos negativos en el recurso pesquero (Bertrand et al., 2008; Mosquera, 2014). Comprender los procesos físicos que afectan este tipo de ondas a lo largo de su trayectoria en la región ecuatorial, es fundamental para contar con un mejor pronóstico de su impacto en la costa peruana. Esto ha motivado a la realización de la presente investigación, en la cual se va a estudiar, mediante un modelo numérico tridimensional, la evolución de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial.

Para tal propósito se ha empleado el modelo numérico POM (*Princeton Ocean Model*; Mellor, 2004), el cual es un modelo oceánico y de libre acceso, que se emplea frecuentemente para simular y predecir corrientes oceánicas, así como la temperatura, salinidad y densidad del agua. Dentro de sus principales características podemos citar:

- Es un modelo en coordenadas sigma (σ), en el cual la coordenada vertical varía desde 0 (en la superficie) hasta -1 (en el fondo). Esto disminuye considerablemente el número de niveles a emplear por el modelo, a diferencia de aquellos basados en coordenadas "z".
- En el plano horizontal se emplea un sistema coordenado curvilíneo ortogonal a partir del cual, como caso particular, se obtiene el sistema de coordenadas rectangulares.
- El modelo emplea un grillado tipo Arakawa C, tanto en el plano horizontal como en el eje vertical.
- El modelo está basado en la técnica de diferencias finitas, donde se emplea el esquema de *leap-frog* para la integración numérica y un filtro Asselin (Asselin, 1972) para remover el modo computacional numérico asociado al mismo.

Asimismo, la integración temporal es explícita en el plano horizontal e implícita en el eje vertical. Esto último permite emplear intervalos de tiempo mayores y una resolución más fina en la superficie y el fondo.

- El modelo es de superficie libre y de paso de tiempo distinto. El modo externo es bidimensional y emplea un intervalo de tiempo computacional más pequeño limitado por la condición de estabilidad CFL (Courant-Friedrichs-Lewy; Durrant, 1999). El modo interno es tridimensional y utiliza un intervalo de tiempo mayor basado en la condición CFL y la velocidad de propagación para ondas internas.
- El modelo POM contiene un submodelo turbulento de cerradura que permite calcular los coeficientes verticales de mezcla.

Resultados Preliminares

Como primer paso para entender la evolución de la onda Kelvin a lo largo del Pacífico Ecuatorial, se ha corrido el modelo oceánico POM, con los parámetros que emplea este por defecto. El dominio de simulación se muestra en la Figura 1a, donde se estableció una línea de costa recta en los extremos este y oeste y fronteras abiertas en los extremos norte y sur. Como condición inicial se asumió flujo en reposo y una densidad que presenta pycnoclina en los primeros metros (Figura 1b). Se utilizó como único forzante un pulso de viento del oeste (Figura 1a), el cual estuvo activo tan solo durante los primeros quince días de simulación. Por otro lado, se asumió en todo el dominio profundidad constante de 3 km (con 31 niveles verticales), y se escogió un espaciamiento horizontal (temporal) de 0.5° (1 h).

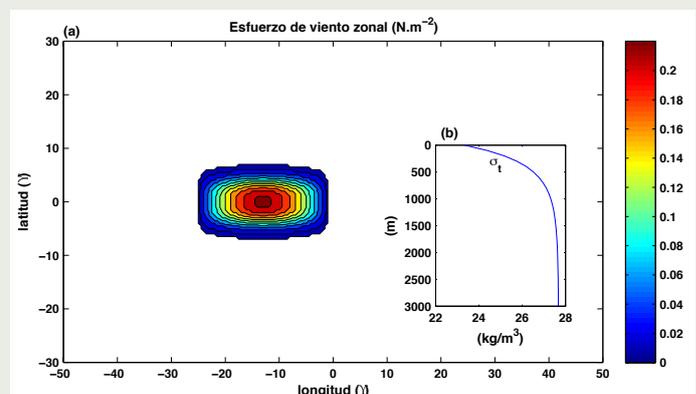


Figura 1. (a) Distribución espacial del esfuerzo de viento zonal (Nm^{-2}) en el dominio de simulación; (b) diagrama densidad potencial en función de la profundidad.

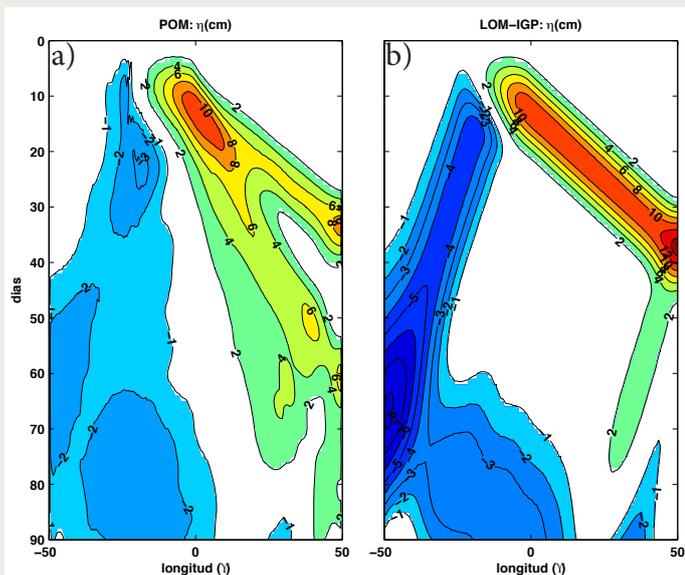


Figura 2. Diagrama longitud-tiempo del nivel del mar a lo largo de la línea ecuatorial, filtrado para periodos menores a 10 días. (a) Modelo oceánico POM y (b) modelo basado en las ecuaciones del LOM-IGP para termoclina constante.

Al nivel del mar simulado con el modelo POM se le aplicó un filtro pasa bajo, con la finalidad de eliminar señales de alta frecuencia que presenten periodos menores a 10 días. Los resultados muestran la presencia de dos ondas Kelvin de hundimiento con velocidades de propagación típicas del primer y segundo modo baroclínico, mientras que la señal de la onda Rossby es difusa ya que aparentemente presenta señales mezcladas de su primer modo baroclínico (Figura 2a). Estos resultados son comparables a una simulación corrida con el modelo de un modo baroclínico y de termoclina constante desarrollado por Mosquera (2009), el cual se emplea como insumo en los informes técnicos del comité multisectorial ENFEN (Figura 2b). No obstante, el modelo POM permite representar procesos de dispersión modal de ondas y la propagación de energía en la dirección vertical. Esto último se puede observar en la Figura 3, en la cual se ha representado la velocidad zonal en función de la profundidad a lo largo de la línea ecuatorial. Para el día 14 la onda se encuentra confinada entre los -25° y $+25^\circ$ de longitud y por encima de los 500 m de profundidad, con una estructura que presenta en general velocidades zonales positivas superiores a los 100 cm/s por encima de los 100 m de profundidad y con un núcleo de hasta 170 cm/s en los primeros metros, mientras que por debajo de estas capas las velocidades son negativas y de hasta -10 cm/s. Asimismo, se observa en esta figura que parte del núcleo positivo se desprende y se profundiza hasta los 250 m con velocidad del orden de +10 cm/s. A medida que pasan los días esta estructura vertical se propaga hacia el este (oeste) y hacia el fondo, lo cual es característico de la onda Kelvin (Rossby) tridimensional (McCreary, 1984; Rothstein et al., 1985). Al comparar estos resultados con la propagación del nivel del mar (Figura 2), se observa que la primera (segunda) onda Kelvin que arriba al extremo oriental alrededor del día 30 (60), transporta menor (mayor) energía en subsuperficie. Esto implica que, según el modelo, la señal más intensa de la onda a nivel sub-superficial está retrasada con respecto a la llegada de la primera onda Kelvin en superficie. En consecuencia, esta

onda es más lenta y parece propagarse con velocidad típica del segundo modo baroclínico.

Cabe señalar que aún se continúa implementando un modelo lineal 3D, el cual permitirá explicar en forma más sencilla los procesos físicos dominantes en este tipo de fenómenos.

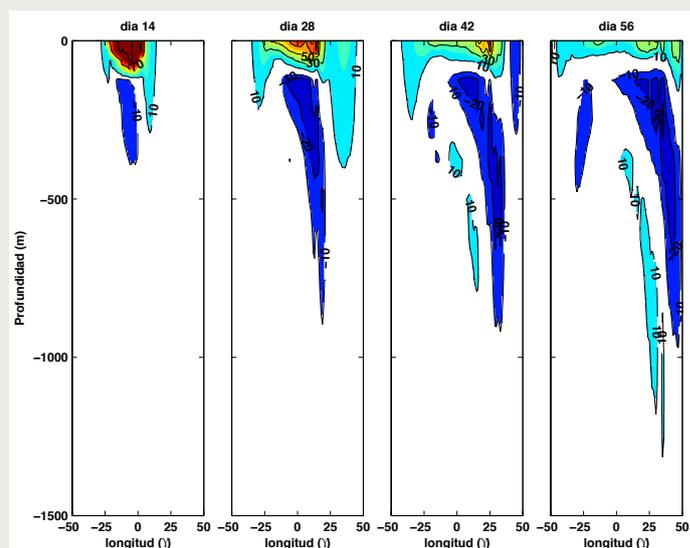


Figura 3. Diagrama longitud-profundidad para la velocidad zonal (cm/s) a largo de la línea ecuatorial para los días 14, 28, 42 y 56 de iniciada la corrida del modelo POM

Referencias

- Asselin, R., 1972: Frequency filter for time integration, *Monthly Weather Review*, 100(6), 487-490.
- Bertrand, S., B. Dewitte, J. Tam, A. Bertrand, and E. Diaz, 2008: Impact of Kelvin wave forcing in the Peru Humboldt Current system: Scenarios of spatial reorganization from physics to fishers, *Progress in Oceanography*, 79, 278-289.
- Durrant, D. R., 1999: *Numerical Methods for Fluid Dynamics with Applications to Geophysics*. (2a ed.), Nueva York: Springer.
- McCreary, J., 1984: Equatorial beams, *Journal of Marine Research*, Vol. 42.
- Mellor, G. L., 2004: *User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi, and G. Garric, 2013: The 2002-03 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 346-357, doi:10.1029/2012JC008551
- Mosquera, K., 2014: Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Vol. 1, N°1, Enero, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Rothstein, L. M., D. W. Moore, and J. McCreary, 1985: Interior Reflections of a Periodically Forced Equatorial Kelvin Wave, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 15.

Resumen del Informe Técnico PPR/El Niño - IGP/ 2015-10

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para el Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). El pronunciamiento colegiado del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

Resumen

Según el Índice Costero El Niño (ICEN) para el mes de setiembre, las condiciones climáticas de la costa peruana fueron cálidas fuertes (2.07°C), manteniéndose la presencia de El Niño Costero de magnitud fuerte. El valor preliminar del ICEN para el mes de octubre y noviembre también indica condición cálida fuerte. El pronóstico de la temperatura superficial del mar de los modelos numéricos internacionales para la región del Pacífico Oriental, con condiciones iniciales del mes de octubre, indica en promedio que los estados climáticos se ubicarían en el rango de fuertes para los meses de diciembre y enero. Estos mismos resultados numéricos predicen que para el Pacífico Central las condiciones serían cálidas muy fuertes para esos meses.

La onda Kelvin que se formó en la segunda quincena de setiembre, se ha fortalecido en su evolución hacia el extremo oriental, esta onda contribuiría a mantener, e incluso incrementar, si continúa fortaleciéndose por los vientos del oeste, el actual calentamiento en la costa peruana a partir de la segunda quincena de noviembre

Índice Costero El Niño

Utilizando los datos de Temperatura Superficial del Mar (TSM) promediados sobre la región Niño1+2, actualizados hasta el mes de octubre de 2015 del producto ERSST v3b generados por el *Climate Prediction Center* (CPC) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, EE.UU.), se ha calculado el Índice Costero El Niño (ICEN; ENFEN 2012) hasta el mes de setiembre de 2015. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN (°C)	Condiciones costeras del mes
2015	Junio	1.96	Cálida Fuerte
2015	Julio	2.15	Cálida Fuerte
2015	Agosto	2.15	Cálida Fuerte
2015	Setiembre	2.07	Cálida Fuerte

Tabla 1. Valores recientes del ICEN.
(Descarga: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>)

Según los valores del ICEN, **se confirma que la condición climática para setiembre de 2015 es de CÁLIDA FUERTE**. Se recuerda que, de manera operacional, para declarar El Niño o La Niña en la costa las condiciones costeras deben ser cálidas o frías por al menos tres meses consecutivos (ENFEN, 2012).

Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

El Pacífico Ecuatorial muestra un claro desarrollo del fenómeno El Niño. En el mes de octubre, el Pacífico Central Ecuatorial continúa mostrando un acoplamiento del océano y atmósfera de gran escala pero con menor intensidad. Las ATSM en Niño 3.4 son similares, incluso superiores, a las de 1997. En la región Niño 1+2, la ATSM está bastante por debajo de 1997, pero sobre 1972 y 1982. El sensor infrarrojo, desde la segunda quincena del mes de octubre, mostró erróneamente que la ATSM había disminuido en la región Niño 1+2, llegando incluso a valores de 1°C de anomalía. Estos valores calculados se debieron a que la región Niño 1+2 estuvo mayormente cubierta por nubes en ese periodo. Como era de esperarse, esta tendencia no se apreció en la ATSM obtenida de la señal de microondas. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico Central (160°E-160°W; 5°S-5°N) continúan por encima del año 82 pero por debajo del 97. El incremento en intensidad de los vientos del oeste en el mes de octubre se debe principalmente a tres pulsos de viento del oeste que se dieron en dicha región. Finalmente, la convección en el Pacífico Central-Oriental sigue activa y se encuentra oscilante desde mediados de agosto. Sus valores actuales se encuentran por debajo del observado en el año 1997 y 1982. La termoclina en el Pacífico Oriental (110°W, 95°W), a pesar de estar más profunda de lo normal como consecuencia de la presente inclinación de la termoclina ecuatorial, no se asemeja a la observada en los años 1982 y 1997. Posiblemente esto esté relacionado a que la anomalía de vientos del sudeste (SE) ha estado, desde abril a setiembre, más fuerte que en 1982 y 1997 (probablemente por la fase decadal fría en esta región), aunque en octubre está similar a 1997 (aún mayor que en 1982).

Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

Actualmente el IGP cuenta con datos observacionales alternativos para el monitoreo de las ondas ecuatoriales, estos son adicionales a los datos de TAO (Takahashi et al., 2014). En particular, se han producido diagramas longitud-tiempo (Hovmöller) de las anomalías de nivel del mar calculadas de JASON-2 (Mosquera et al., 2014), de la profundidad de la isoterma de 20°C calculada de Argo (Aparco et al., 2014) y esfuerzo de viento zonal. Asimismo, el IGP cuenta con un modelo oceánico lineal (Mosquera, 2009; 2014 y Mosquera et al., 2011) que permite el monitoreo y predicción de la onda Kelvin. Este modelo usa tanto una profundidad referencial de la termoclina uniforme (LOM1) como variable (LOM2). Ambas configuraciones fueron forzadas usando anomalías de vientos superficiales obtenidas de ASCAT hasta el 31 de octubre de 2015. Este modelo es luego corrido en modo de pronóstico con las anomalías de viento i) igualadas a cero (LOM1a y LOM2a), e ii) iguales al promedio de los últimos 30 días (LOM1b y LOM2b).

Resumen del Informe Técnico PPR/EI Niño - IGP/ 2015-10

En el presente mes, los productos de ARGO (Figura 1c), JASON-2 (Figura 1d) y del modelo lineal (Figura 1e) muestran que la onda Kelvin cálida que se formó debido a los pulsos de vientos del oeste en la segunda quincena de setiembre, se ha fortalecido en su evolución hacia el extremo oriental. Esto como consecuencia de tres pulsos de vientos hacia el oeste que se dieron en la primera quincena de octubre y de un viento de baja intensidad, también hacia el oeste, que se dio en la segunda quincena de octubre entre 160°E-160°W. Según lo observado de los vientos calculados del satélite ASCAT, esta onda no se vería disminuida en su trayecto hacia el este debido que, a la fecha, no se observan anomalías de viento del este. Esta onda, arribaría a la costa a partir de la segunda quincena de noviembre, lo cual contribuirá a mantener, e incluso a incrementar, si es fortalecida por anomalías de vientos del oeste, el actual calentamiento en la costa peruana.

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para el mes de diciembre, los pronósticos de la anomalía de la TSM en el Pacífico Oriental (Niño 1+2, ICEN) indican condiciones, principalmente, cálidas fuertes (6 de 8 modelos) y condiciones moderadas (2 de 8 modelos). Para el verano 2015-2016, 2 de 8 modelos indican condiciones fuertes y 6 de 8 modelos condiciones moderadas (ver Figura 2). Para el caso particular del modelo de ECMWF, este presenta un mayor rango que los otros modelos, indicando condiciones desde extraordinarias hasta frías. Por otro lado, en el Pacífico Central (Niño 3.4) los modelos indican que las condiciones estarán en el rango de cálidas muy fuertes para los meses de diciembre y enero; las condiciones para los trimestres Noviembre-Diciembre-Enero y Febrero-Marzo-Abril 2016 serían muy fuertes y fuertes respectivamente.

Modelo	Inicio	Extremo	Final	Magnitud
CFS2	abr-15	oct-15	No disponible	Moderado
CMC1	abr-15	oct-15	No disponible	Moderado
CMC2	abr-15	abr-16	No disponible	Fuerte
GFDL	abr-15	dic-15	No disponible	Fuerte
NASA	abr-15	ene-16	No disponible	Fuerte
GFDL_FLOR	abr-15	nov-15	No disponible	Fuerte
NCAR_CCSM4	abr-15	oct-15	No disponible	Fuerte
NMME(prom)	abr-15	dic-15	No disponible	Fuerte
ECMWF	abr-15	dic-15	-	Moderado
OBSERVADO	abr-15	jul-15	-	Fuerte

Tabla 2. Pronósticos de evento El Niño en la costa según modelos climáticos con condiciones iniciales de octubre de 2015.

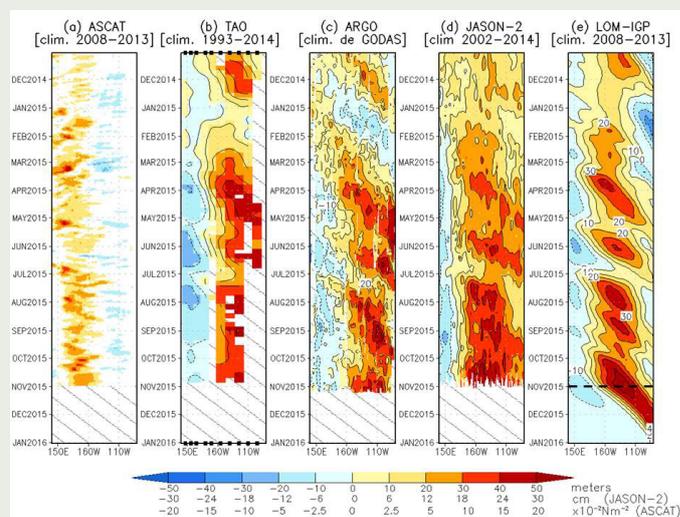
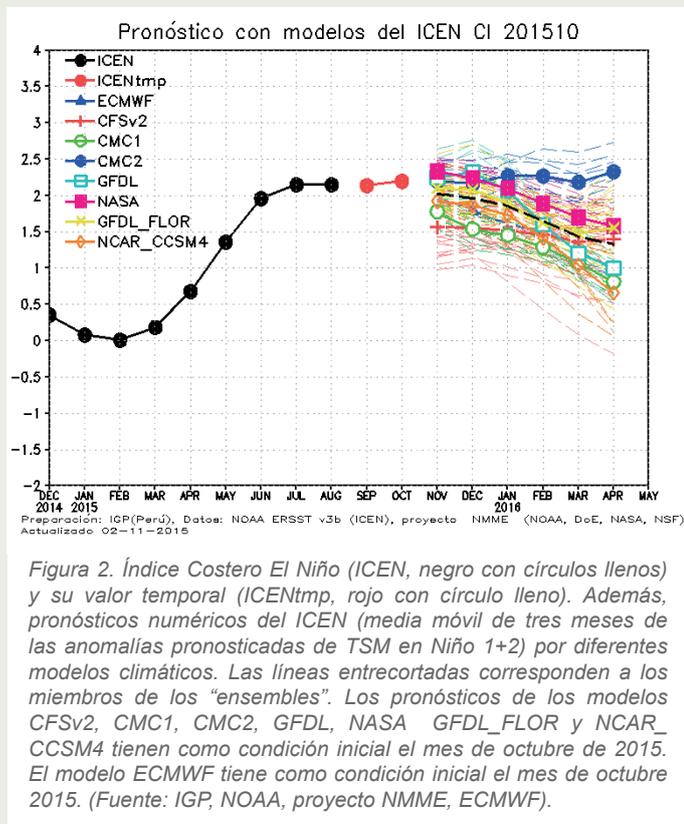


Figura 1. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escatorómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Finalmente en (e) se muestra la anomalía de la profundidad de la termoclina calculada con el modelo LOM-IGP (forzado por ASCAT, y $\tau_{xx}=0$ para el pronóstico). Las líneas diagonales representan una propagación hacia el este con velocidad de 2.6 m/s. (Elaboración: IGP).

Conclusiones:

1. El ICEN para setiembre de 2015 fue de 2.07 °C (cálida fuerte), manteniéndose la presencia de El Niño Costero de magnitud fuerte que se inició en el mes de abril.
2. La onda Kelvin cálida, que se formó debido a pulsos de vientos del oeste en la segunda quincena de setiembre, se ha fortalecido en su evolución hacia el extremo oriental. Esto como consecuencia de tres pulsos de viento hacia el oeste que se dieron en la primera quincena de octubre y de un viento de baja intensidad, también hacia el oeste, que se dio en la segunda quincena de octubre entre 160°E-160°W. Según lo observado de los vientos calculados del satélite ASCAT, esta onda no se vería disminuida en su trayecto hacia el este debido a que no se observan anomalías de viento del este. Esta onda, que próximamente debe mostrar su señal en el extremo oriental, contribuiría en mantener e incluso incrementar, si es fortalecida por los vientos del oeste, el actual calentamiento en la costa peruana.
3. Para el Pacífico Oriental (Niño 1+2), la mayoría de modelos (5 de 7) inicializados en octubre indican que El Niño costero en marcha mantendría una magnitud fuerte (2 de 7 indica moderado) para los siguientes dos meses. Según los datos observados, el pico habría sido en julio. Para el verano 2015-2016, todos los modelos predicen menores anomalías de TSM (condiciones moderadas 6 de 8 modelos y condición fuerte 2 de 8 modelos). Sin embargo, se conoce que los modelos han subestimado las anomalías positivas en esta región durante los eventos El Niño extraordinario. El modelo de ECMWF presenta un mayor rango que los otros modelos, indicando condiciones desde extraordinarias hasta frías.
4. Para el Pacífico Central (Niño 3.4), todos los modelos que han sido considerados, y que fueron inicializados en octubre, indican

Resumen del Informe Técnico PPR/El Niño - IGP/ 2015-10



que El Niño alcanzaría una magnitud muy fuerte hasta fines de 2015 para luego decaer a lo largo de los primeros meses de 2016.

5. Las ATSM en Niño 3.4 son similares a las de 1997 e incluso superiores en los datos de microondas. En Niño 1+2, la ATSM se encuentra a más de un grado centígrado por debajo de la de 1997, por encima de 1972 y similar a 1982.

6. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico Central (160°E-160°W; 5°S-5°N) continúan por encima del año 82 pero por debajo del 97. En el Pacífico Oriental (160°W-120°W; 5°S-5°N), este año están sustancialmente por debajo del 82 y 97.

7. La convección en el Pacífico Central-Oriental sigue activa sin una tendencia clara a aumentar o disminuir, pero sus valores ya se encuentran por debajo del observado en 1982 y 1997.

8. La termoclina en el Pacífico Oriental (125W, 110W, 95W) continúa anómalamente profunda, pero no es comparable con la que ocurrió en este periodo en 1982 o 1997. Además, la inclinación de la termoclina hacia el este es sustancialmente menor que en 1997 (no hay dato para 1982).

9. El índice PDO continúa con valores positivos, reflejando el persistente calentamiento del Pacífico NE.

10. Los vientos alisios del SE entre abril y setiembre han estado más fuertes que en 1982 y 1997 (probablemente por la fase decadal fría en esta región), aunque en octubre están similares a 1997 (aún mayores que en 1982).

Referencias

Aparco, J., K. Mosquera y K. Takahashi, 2014: Flotadores Argo para el cálculo de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aplicación Operacional), Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°5, Mayo, Instituto Geofísico del Perú.

Barnston, A., M. Tippett, M. L'Heureux, S. Li, D. DeWitt, 2012: Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002-11: Is Our Capability Increasing? Bulletin American Meteorological Society, 93, 5, 631-351.

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

Lagos, P., Y. Silva, E. Nickl, K. Mosquera, 2008: El Niño - related precipitation variability in Perú, Advances in Geosciences, 14, 231-237.

Lavado, W. y J. C. Espinoza, 2014: Entendiendo los impactos de diferentes tipos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°3, Marzo, Instituto Geofísico del Perú.

Machuca, R., 2014: Cálculo de daños económicos potenciales en viviendas por inundaciones durante la ocurrencia del fenómeno El Niño: caso norte peruano, Tesis para optar el título profesional de Economía, Universidad Nacional del Callao.

Machuca, R., K. Takahashi, y A. G. Martínez, 2014: Impactos económicos de El Niño costero en el sector vivienda a causa de inundaciones en la costa norte del Perú, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°12, Diciembre, Instituto Geofísico del Perú.

McPhaden, M. J., 2012: A 21st Century Shift in the Relationship between ENSO SST and Warm Water Volume Anomalies, Geophysical Research Letters, 39, L09706, doi:10.1029/2012GL051826.

Mosquera, K., 2009: Variabilidad Intraestacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados, Tesis para optar el grado de Magister en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Mosquera, K., 2014: Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°1, Enero, Instituto Geofísico del Perú.

Mosquera, K., B. Dewitte y P. Lagos, 2011: Variabilidad Intra-estacional de la onda de Kelvin ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): simulación numérica y datos observados. Magistri et Doctores, Revista de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 5, 9, p. 55.

Mosquera, K., D. Pareja y K. Takahashi, 2014: Altimetría Satelital para el monitoreo de la onda Kelvin ecuatorial en el Océano Pacífico, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°4, Abril, Instituto Geofísico del Perú.

Reupo, J., 2011: Evaluación y desarrollo de metodologías para el pronóstico estacional de anomalías de la temperatura en el mar peruano asociadas al Fenómeno El Niño y otros, Compendio de trabajos de investigación realizado por estudiantes, Vol. 12. Instituto Geofísico del Perú.

Reupo, J. y K. Takahashi, 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, Instituto Geofísico del Perú.

Takahashi, K., 2014: Variedades de El Niño, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°2, Febrero, Instituto Geofísico del Perú.

Takahashi, K., K. Mosquera, D. Pareja, J. Reupo y J. Aparco, 2014: Monitoreo del Pacífico ecuatorial, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, N°3, Marzo, Instituto Geofísico del Perú.

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

Comunicado Oficial ENFEN

COMITÉ MULTISECTORIAL ENCARGADO DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO EL NIÑO (ENFEN)



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 18 - 2015 Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño Costero¹**

El Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) mantiene el estado de Alerta, debido al evento El Niño de magnitud fuerte que se viene desarrollando en la costa peruana, con temperaturas por encima de lo normal, sin embargo, no se esperan lluvias intensas durante noviembre en la costa por su estacionalidad, con excepción de Tumbes en donde se podrían presentar esporádicamente en la segunda quincena de noviembre. La probabilidad estimada de que el evento El Niño Costero sea fuerte o extraordinario en el verano 2015-2016 es 55%².

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas de la primera quincena de octubre.

Continúa la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. En la primera quincena de octubre, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la región del Pacífico central ecuatorial (Niño 3.4)³ continuó mostrando una evolución similar a la del año 1997, aunque las precipitaciones en la región central y oriental⁴ -un indicador clave del acoplamiento océano-atmósfera- mostró valores por debajo de las de ese año. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico central ecuatorial, las cuales generan las ondas Kelvin cálidas ecuatoriales, se han fortalecido, asociado a nuevos pulsos del oeste, pero continúan por debajo de las del año 1997.

Se observa en los datos de profundidad de la termoclina y nivel medio del mar (NMM) en la región del Pacífico ecuatorial central la presencia de la onda Kelvin cálida forzada por anomalía de vientos del oeste en la segunda quincena de setiembre y fortalecida por anomalías de viento del oeste en la primera quincena de octubre.

En la zona costera del Perú, el promedio de las anomalías de la TSM fue +3°C en la costa norte y centro. En la misma región, las temperaturas extremas del aire continuaron por encima de lo normal, con anomalías promedio de +2°C para la temperatura mínima y de +2,2°C para la temperatura máxima.

El NMM en el litoral norte disminuyó a un promedio de +13 cm por encima de lo normal, mientras que en el litoral centro y sur, las anomalías fueron, en promedio, +9 cm. Asimismo, en la estación fija Paita, localizada a siete millas náuticas de la costa, las anomalías disminuyeron a +3°C en los primeros 30 metros de profundidad asociados a una termoclina menos profunda.

El Índice Costero El Niño (ICEN) para el mes de agosto fue +2,15, manteniendo la categoría Cálida Fuerte, al igual que en los meses de junio y julio.

Al inicio del año hidrológico 2015-2016, las lluvias y caudales en la costa del país se presentaron dentro de lo normal para este periodo. Los reservorios en la costa norte y sur cuentan, en promedio, con almacenamiento al 60% y 50% de su capacidad máxima, respectivamente. Esta disminución refleja el inicio de las campañas agrícolas.

La anchoveta se distribuyó, de manera dispersa, entre Punta La Negra (6°S) y Pisco, ligeramente profundizada. El comportamiento de los índices reproductivos mostraron valores dentro de lo normal. Por otro lado, frente a Chimbote, continúa la presencia de especies oceánicas propias de aguas cálidas como samasa y caballa.

PERSPECTIVAS

En los siguientes meses, a lo largo de la costa peruana, se espera que continúen las anomalías positivas de la TSM, del NMM y de la profundidad de la termoclina como consecuencia del evento El Niño que se viene desarrollando.

¹Definición de "Alerta de El Niño costero": Según las condiciones recientes, usando criterio experto en forma colegiada, el Comité ENFEN considera que el evento El Niño costero ha iniciado y/o el valor del ICEN_{tmp} indica condiciones cálidas, y se espera que se consolide El Niño costero (Nota Técnica ENFEN 01-2015).

²Comunicado Oficial ENFEN N°17-2015.

³Región Niño 3.4: 5°S - 5°N, 170°W - 120°W.

⁴Región central y oriental: 5°S - 5°N y 170°W - 100°W.

Se espera que la duración de la onda Kelvin cálida formada en la segunda quincena de setiembre, se prolongue como consecuencia de los pulsos de viento del oeste observados en la primera quincena de octubre en el Pacífico ecuatorial central. Esta onda Kelvin estaría llegando a la costa peruana a partir del mes de noviembre, lo cual contribuiría a mantener el calentamiento actual e incluso podría incrementarlo, pero no hasta el nivel registrado en noviembre de 1997.

Conforme avancemos en la temporada de lluvias, El Niño Costero, según su magnitud, intensificará las lluvias en la vertiente del Pacífico. Si bien El Niño tendrá mayor influencia sobre las lluvias en la costa norte, existe fuerte heterogeneidad de su impacto en cada región. Sin embargo, no se esperan en la costa lluvias intensas en el mes de noviembre, con excepción de Tumbes donde podrían presentarse, esporádicamente, en la segunda quincena de noviembre.

Para el Pacífico ecuatorial central (región Niño 3.4), los modelos globales continúan pronosticando la intensificación de las condiciones El Niño hacia fin de año con anomalías de la TSM que podrían exceder +2°C. El Comité ENFEN mantiene la probabilidad de 75% que El Niño en el Pacífico central alcance una magnitud fuerte o muy fuerte en el verano (Tabla 2).

Para las precipitaciones en los Andes la Amaloma, El Niño en el Pacífico central implica la posibilidad de la reducción de las lluvias -sin ser determinante- en el verano, especialmente en el sur.

De acuerdo a la Tabla 1 del Comunicado Oficial ENFEN N°17-2015, se mantiene la probabilidad de 95% que El Niño Costero continúe hacia el verano y el 55% de probabilidad que El Niño Costero alcance la magnitud de fuerte o extraordinario en la misma estación. Estas probabilidades se actualizarán en el próximo comunicado.

El Comité Multisectorial ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones observadas y continuará actualizando mensualmente la estimación de las probabilidades de las magnitudes en el Pacífico oriental (El Niño Costero) y en el Pacífico central para el verano del hemisferio sur.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao-Perú, 23 de octubre de 2015

Tabla 1. Probabilidades de las magnitudes de El Niño Costero en el verano (diciembre 2015 – marzo 2016)

Magnitud del evento durante diciembre 2015 - marzo 2016	Probabilidad de ocurrencia
Normal o La Niña costera	5%
El Niño Costero débil	5%
El Niño Costero moderado	35%
El Niño Costero fuerte	40%
El Niño Costero extraordinario	15%

Tabla 2. Probabilidades de las magnitudes de El Niño en el Pacífico central en el verano 2015-2016 (diciembre 2015-marzo2016)

Magnitud del evento durante diciembre 2015 – marzo 2016	Probabilidad de ocurrencia
Normal o La Niña en el Pacífico central	5%
El Niño débil en el Pacífico central	5%
El Niño moderado en el Pacífico central	15%
El Niño fuerte en el Pacífico central	40%
El Niño muy fuerte en el Pacífico central	35%



COMITÉ MULTISECTORIAL ENCARGADO DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO EL NIÑO (ENFEN)



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 19 - 2015 Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño Costero¹**

El Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) mantiene el estado de Alerta, debido al evento El Niño de magnitud fuerte que se viene desarrollando en la costa peruana con temperaturas por encima de lo normal. Sin embargo, en la costa no se esperan lluvias intensas durante noviembre y diciembre, con excepción de Tumbes y el norte de Piura, donde podrían presentarse, esporádicamente, a partir de la segunda quincena de noviembre. Por otro lado, no se descarta que ocurran algunas lluvias de menor intensidad esporádicas en la parte baja de Piura en el mes de diciembre. La probabilidad estimada de que el evento El Niño Costero sea fuerte o extraordinario en el verano 2015-2016 es 50%.

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas del mes de octubre.

Continúa la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. Durante el mes de octubre, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la región del Pacífico central ecuatorial (Niño 3.4)² continuó mostrando una evolución similar a la del año 1997, aunque las precipitaciones en la región central y oriental³ -un indicador clave del acoplamiento océano-atmósfera- mostró valores por debajo de las de ese año. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico central ecuatorial, las cuales generan las ondas Kelvin cálidas ecuatoriales, se han fortalecido, asociado a nuevos pulsos del oeste, pero continúan por debajo de las del año 1997.

Se observa en los datos de profundidad de la termoclina y nivel medio del mar (NMM) en la región del Pacífico ecuatorial central la presencia de la onda Kelvin cálida forzada por las anomalías de vientos del oeste en la segunda quincena de setiembre y durante el mes de octubre.

El NMM en el litoral norte fue de 13 cm por encima de lo normal, mientras que en el litoral centro y sur, las anomalías fueron, en promedio, como el mes anterior, +9 cm.

En la zona costera del Perú, el promedio de las anomalías de la TSM fue +3°C en la costa norte y +2°C en el centro. En la misma región, las temperaturas extremas del aire continuaron por encima de lo normal, con anomalías promedio de +1.9°C para la temperatura mínima y de +2,1°C para la temperatura máxima.

En la estación fija Paita, localizada a siete millas náuticas de la costa, se registraron anomalías de +3°C en los primeros 30 metros de profundidad.

El Índice Costero El Niño (ICEN) para el mes de setiembre fue +2,07 ° C, manteniendo la categoría Cálida Fuerte, al igual que en los meses de junio, julio y agosto.

Las lluvias y caudales en la costa del país en el mes de octubre se presentaron dentro de lo normal. Los reservorios en la costa norte y sur cuentan, en promedio, con almacenamiento al 52% y 49% de su capacidad máxima, respectivamente. Esta disminución respecto al mes anterior, refleja su utilización en las campañas agrícolas.

La anchoveta mantuvo su distribución dispersa, entre Punta La Negra (6°S) y San Juan de Marcona. El comportamiento de los índices reproductivos mostraron valores dentro de lo normal que indican la tendencia a finalizar el periodo de desove. Por otro lado, en la zona norte, continúa la presencia de especies propias de aguas cálidas como jurel fino y samasa.

PERSPECTIVAS

En los siguientes meses, a lo largo de la costa peruana, se espera que continúen las anomalías positivas de la TSM, del NMM y de la profundidad de la termoclina como consecuencia del evento El Niño que se viene desarrollando.

Se espera que la onda Kelvin cálida, formada entre la segunda quincena de setiembre y el mes de octubre, continúe su propagación hacia el Pacífico ecuatorial oriental y que llegue a la costa peruana a partir de la segunda quincena de noviembre, lo cual contribuiría a mantener el calentamiento anómalo actual e incluso podría incrementarlo, con posibilidad de alcanzar las temperaturas observadas en diciembre de 1982.

¹Definición de "Alerta de El Niño costero": Según las condiciones recientes, usando criterio experto en forma colegiada, el Comité ENFEN considera que el evento El Niño costero ha iniciado y/o el valor del ICENtmp indica condiciones cálidas, y se espera que se consolide El Niño costero (Nota Técnica ENFEN 01-2015).

²Región Niño 3.4: 5°S - 5°N, 170°W - 120°W.

³Región central y oriental: 5°S - 5°N y 170°W - 100°W.

⁴Lluvia diaria por encima de 20 mm. Se define como lluvia extraordinaria (percentil 99)

⁵Lluvia diaria por debajo de 10 mm. Se define como lluvia moderada a débil

Por lo anterior, no se esperan en la costa lluvias intensas⁴ en los meses de noviembre y diciembre, con excepción de Tumbes y el norte de Piura donde podrían presentarse, esporádicamente, a partir de la segunda quincena de noviembre. Por otro lado, no se descarta que ocurran algunas lluvias de menor intensidad⁵ esporádicas en la parte baja de Piura en el mes de diciembre.

Para el Pacífico ecuatorial central (región Niño 3.4), los modelos globales continúan pronosticando la intensificación de las condiciones El Niño hacia fin de año con anomalías de la TSM que podrían exceder 2°C.

Para las precipitaciones en los Andes y la Amazonía, El Niño en el Pacífico central, -en el verano, implica la posibilidad de la reducción de las lluvias -sin ser determinante, especialmente en la sierra sur.

Con respecto al pronóstico probabilístico de El Niño costero en el próximo verano (diciembre 2015-marzo 2016; Tabla 1), debido a que las anomalías térmicas en el Pacífico oriental se han presentado sustancialmente por debajo de lo observado en el año 1997, el Comité ENFEN ha decidido reducir las probabilidades de que este verano sea como el de El Niño 1997-1998 (extraordinario). Sin embargo, debido a que los valores actuales son similares a los de año 1982 y a que se espera que continúen los vientos ecuatoriales del oeste y que estos continúen generando ondas Kelvin cálidas, se decidió incrementar la probabilidad de que el verano sea como el de El Niño 1982-1983 (fuerte). Sin embargo, debido a que el acoplamiento océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial se ha presentado menos intenso que lo esperado, se ha incrementado ligeramente la probabilidad de que El Niño sea de magnitud moderada este verano.

En cuanto al pronóstico de El Niño en el Pacífico central (Tabla 2), debido al posible efecto que el Pacífico oriental puede tener sobre el desarrollo del evento en esa región, se decidió reducir la probabilidad de que en este verano se alcance la magnitud de muy fuerte a favor de fuerte.

El Comité Multisectorial ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones observadas y continuará actualizando mensualmente la estimación de las probabilidades de las magnitudes en el Pacífico oriental (El Niño Costero) y en el Pacífico central para el verano del hemisferio sur.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao-Perú, 4 de noviembre de 2015

Tabla 1. Probabilidades de las magnitudes de El Niño Costero en el verano (diciembre 2015 - marzo 2016)

Magnitud del evento durante diciembre 2015-marzo2016	Probabilidad de ocurrencia
Normal o La Niña costera	5%
El Niño costero débil	5%
El Niño costero moderado	40%
El Niño costero fuerte (como en 1982-1983)	45%
El Niño costero extraordinario (como en 1997-1998)	5%

Tabla 2. Probabilidades de las magnitudes de El Niño en el Pacífico Central en el verano 2015-2016 (diciembre 2015-marzo2016)

Magnitud del evento durante diciembre 2015-marzo2016	Probabilidad de ocurrencia
Normal o La Niña en el Pacífico Central	5%
El Niño débil en el Pacífico Central	5%
El Niño moderado en el Pacífico Central	15%
El Niño fuerte en el Pacífico Central	45%
El Niño muy fuerte en el Pacífico Central	30%





© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú
Central Telefónica: (511) 317 2300
<http://www.igp.gob.pe>
 <http://www.facebook.com/igp.peru>
 http://twitter.com/igp_peru

En el marco del:

