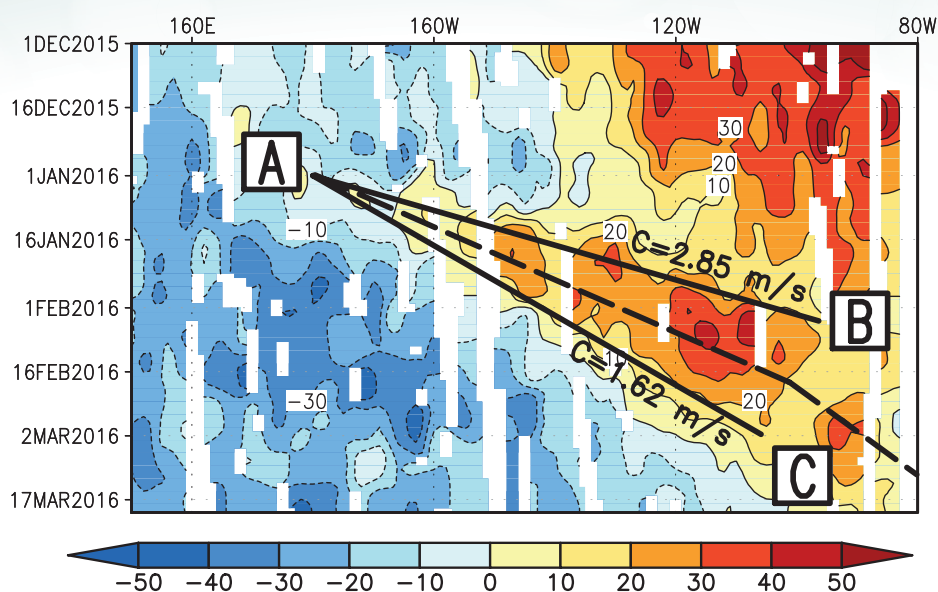


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

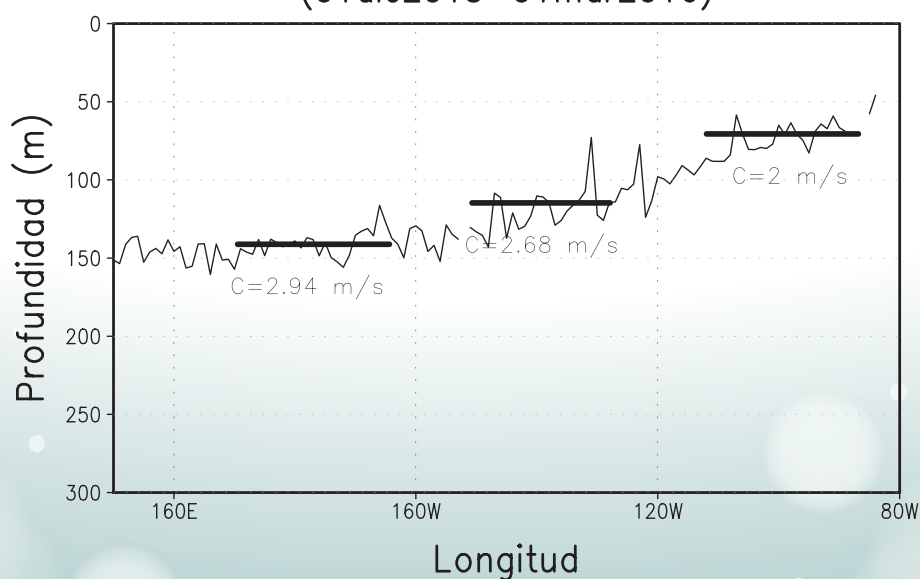
“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

Anomalía de la profundidad
de la termoclina (metros)



Profundidad promedio de la termoclina
(01 dic2015–01 mar2016)



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: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”.

Actividad: “Generación de información y monitoreo 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: Mosquera et al., 2016.

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
IV Etapa - Ate
Teléfono (511) 3172300

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

Lima, Mayo del 2016

Hecho el Depósito Legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-05225

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 “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”, 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 información y monitoreo 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.

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.

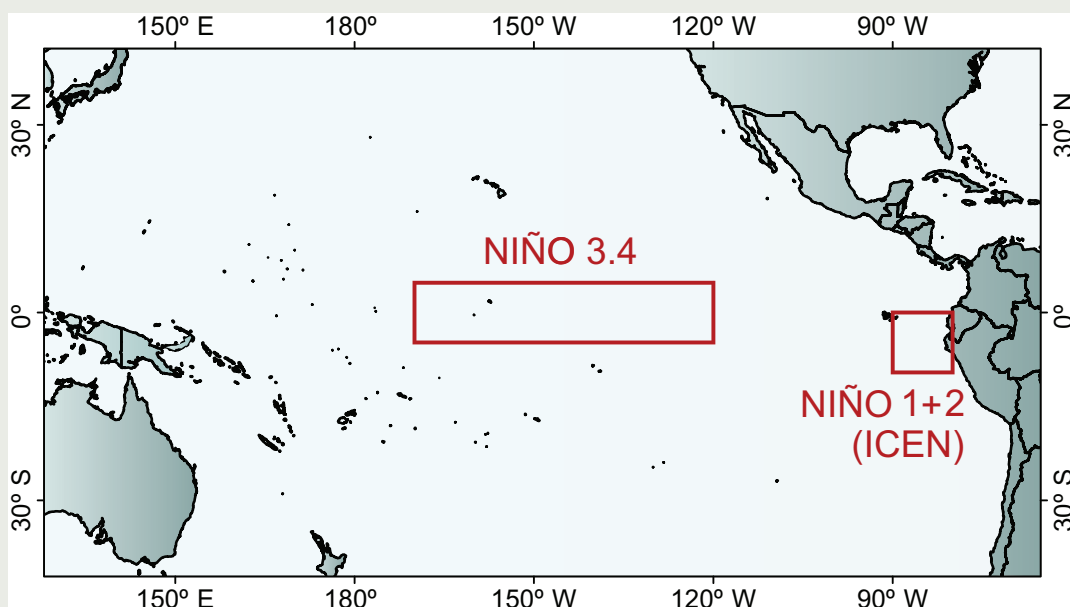
El ENFEN es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.

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 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 Amazonía peruana.

Artículo de Divulgación Científica

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Los años 2015 y 2016 han sido muy interesantes para la comunidad científica internacional dedicada al estudio del Fenómeno El Niño, ya que luego de 18 años se dio un evento cálido con una magnitud comparable a la que se alcanzó en 1997/1998 y 1982/1983. Hay que indicar que en el Pacífico Central el evento, basado en la Temperatura Superficial del Mar (TSM), fue superior en su pico máximo (noviembre - diciembre) a los eventos de aquellos años. Sin embargo, frente al Perú, según la anomalía de la TSM en la región Niño 1+2 y basado en la definición del ICEN (ENFEN, 2012), el evento alcanzó la magnitud fuerte en invierno mas no extraordinaria, tal como sucedió en 1997/1998 y 1982/1983. Uno de los posibles factores habría sido el menor impacto de las ondas Kelvin oceánicas sobre la TSM a lo largo de la costa peruana. Estas ondas, al parecer, se debilitaron poco antes de alcanzar el extremo oriental, tal como se puede apreciar en la Figura 1, donde se muestran los diagramas longitud - tiempo a lo largo de la franja ecuatorial del evento El Niño 2015/2016 de distintas variables, como el esfuerzo de



Kobi Mosquera-Vásquez, Dr.
Investigador Científico del
Instituto Geofísico del Perú

Doctor en Oceanografía Física de la Universidad Paul Sabatier de Francia, Magíster en Física – Mención Geofísica y Físico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente es investigador científico superior de la Sudirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y es representante alterno del IGP en el Comité Técnico para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). En la actualidad se dedica al estudio de las ondas Kelvin oceánicas y su impacto en la dinámica y termodinámica del Pacífico Ecuatorial. Para esto utiliza información in situ, satelital y modelos numéricos simples.

viento zonal, la profundidad de la termoclina y el nivel del mar. Se observa que la anomalía del esfuerzo de viento zonal presentó seis pulsos de viento del oeste intensos y recurrentes (ver cuadros verdes en la Figura 1a) durante el año 2015, los cuales produjeron la formación de seis ondas Kelvin cálidas (ver Figura 1bcd) que se esperaba habrían incrementado la temperatura del mar en el Pacífico Ecuatorial por medio de procesos advectivos tanto horizontales como

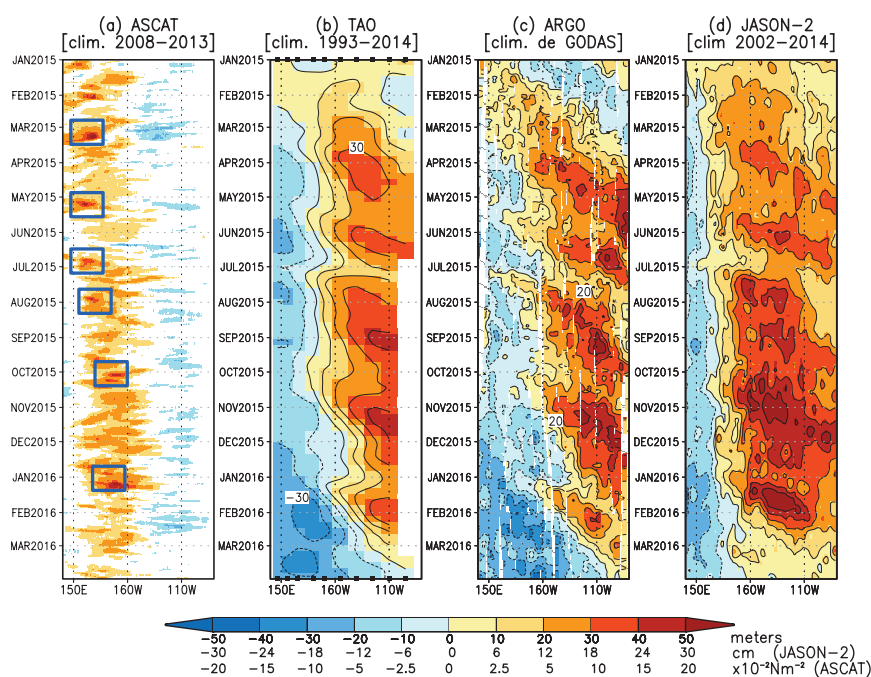


Figura 1. Diagramas longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basados en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Los cuadros azules de (a) indican pulsos de viento.

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Mosquera K. y Dewitte B.

Boris Dewitte, Dr.

Investigador Científico del
Laboratoire d'Etudes en Géophysique
et Océanographie Spatiales



Doctor en Oceanografía Física de la Université Paul Sabatier, Toulouse, Francia, e Ingeniero en mecánica de fluido de la Escuela Nacional de Aeronáutica y Espacio (Supaero). Desde el año 1999 es investigador científico del Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), donde se desempeña como especialista en oceanografía física y dinámica tropical. Forma parte de varios comités científicos internacionales, incluyendo el Scientific Steering Group del programa Climate Variability (CLIVAR). Recientemente su investigación está enfocada en la interacción océano-atmósfera en el Pacífico sur-este y cómo el cambio climático afecta la circulación oceánica y el ciclo hidrológico en la costa.

verticales (ENFEN, 2015a-f; Mosquera, 2014). Estas ondas impactaron la profundidad de la termoclina, tal como se aprecia en la Figura 1bc, y también el nivel del mar (Figura 1d). Todo esto se desarrolló de la manera que se espera cuando se produce un evento El Niño. Estas ondas ecuatoriales, en general, contribuyen en el incremento de la TSM que luego produce más anomalías de viento del oeste a través del proceso de acoplamiento océano-atmósfera (*Bjerknes feedback*; Bjerknes, 1969) que lleva al crecimiento de un evento El Niño. Entre julio y diciembre, según la información de la profundidad de la termoclina de TAO (Figura 1b) y nivel del mar satelital de JASON (Figura 1c), estuvieron presentes las ondas más intensas en el Pacífico Ecuatorial Central. Lo interesante es que las ondas Kelvin, luego del mes de julio, provocaron menor calentamiento frente a la costa peruana que lo esperado. Las ondas no mantuvieron su magnitud original en el extremo oriental e, incluso, parecieron desaparecer poco antes de su llegada esperada a la costa sudamericana (agosto-setiembre 2015 y febrero-marzo 2016; Figura 2cd) ¿Qué puede haber pasado?

La onda Kelvin ecuatorial, desde el punto de vista lineal, es una onda de gravedad no-dispersiva, la cual viaja hacia el este restringida a la banda ecuatorial debido a la rotación de la Tierra (Wang, 2003). Teóricamente, la onda Kelvin puede ser representada en la aproximación del modelo de "gravedad reducida" (Philander, 1991), la cual representa, en forma simplificada, la estructura térmica del océano como

si este último solo tuviera dos capas de agua: una cálida (superior) de profundidad H y densidad ρ_1 , y otra fría (inferior) de profundidad infinita y densidad ρ_2 ($>\rho_1$). El parámetro H representa la profundidad de la termoclina. Bajo esta aproximación, las ondas Kelvin tendrían una velocidad de propagación $C=(g'H)^{1/2}$, donde g' es conocida como gravedad reducida y es igual a $g \cdot (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$, y g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2). Según este modelo, si la profundidad y estratificación de la termoclina fueran homogéneas en el Pacífico Ecuatorial, se esperaría que las ondas Kelvin forzadas por el viento se desplacen libremente hacia el este, sin ningún cambio en sus características de propagación (velocidad de fase, amplitud, estructura vertical), excepto por la pérdida o disipación de energía asociada a la propagación vertical, lo cual puede reducir su amplitud. No obstante, este tipo de disipación no puede explicar la magnitud de la tasa de decaimiento de la amplitud de la onda de Kelvin intraestacional (Mosquera et al., 2014).

Por otro lado, si una onda Kelvin cálida atravesara una región donde hay anomalías de viento del este/oeste, su amplitud podría verse reducida/aumentada. Como se puede apreciar en la Figura 2, vientos anómalos del este estuvieron presentes en el Pacífico Oriental durante casi todo el 2015 y debieron contribuir a la formación de ondas Kelvin frías que pudieron interferir

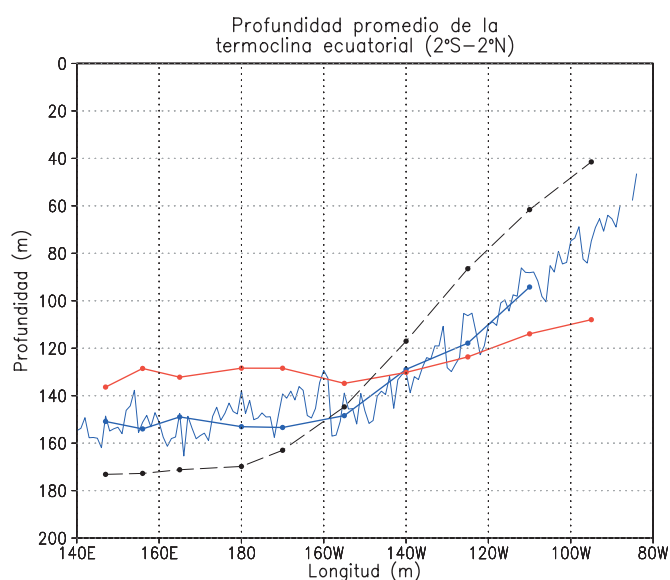


Figura 2. Profundidad promedio (octubre - febrero) de la termoclina en el Pacífico Ecuatorial ($2^{\circ}\text{S}-2^{\circ}\text{N}$) obtenida para el periodo octubre 2015 - febrero 2016 de TAO (línea azul gruesa) y ARGO (línea azul delgada) y para el periodo octubre 1997 - febrero 1998 de TAO (línea roja gruesa). La línea cortada delgada y de color negro indica la profundidad de la termoclina promedio obtenida de la climatología de TAO (1993-2014) para el periodo octubre - febrero.

parcialmente en la evolución de las ondas Kelvin cálidas en dicha región justo antes de llegar al extremo oriental. Esto aparentemente tuvo un rol importante en evitar que El Niño se desarrollara intensamente en el año 2014 (Dewitte et al., 2016). En los resultados preliminares de Mosquera y Segura (2015), quienes usaron un modelo oceánico de una capa homogénea (Mosquera, 2009) forzado con anomalías de esfuerzo de viento zonal del satélite ASCAT, se muestra la importancia de la anomalía de vientos del este en el Pacífico Ecuatorial Oriental para la formación de ondas Kelvin frías que atenuaron las ondas cálidas que se produjeron durante El Niño 2015-2016, en particular la formada a inicios de julio de 2015.

Por otro lado, es conocido que la profundidad de la termoclina en promedio no es uniforme a lo largo del Pacífico Ecuatorial, siendo mayor en el oeste que en el este, como consecuencia de la acción de los vientos alisios ecuatoriales que provocan un fuerte afloramiento de aguas frías en la región oriental. Solo en eventos El Niño la termoclina se vuelve más profunda en el este. Durante El Niño 2015/2016, a pesar de ser un evento muy fuerte en el Pacífico Ecuatorial, la termoclina no estuvo tan horizontal en el extremo oriental como en El Niño 1997-1998 (ver Figura 2). Por lo tanto, al pasar las ondas Kelvin ecuatoriales a lo largo de una termoclina de profundidad variable, estas debieron haber modificado sus características, tal como lo explican Yang y Yu (1992). Ellos estudian el caso en el que la profundidad de la termoclina se reduce hacia el este sobre escalas menores que la longitud de la onda Kelvin ecuatorial y encuentran que esta sufre una disminución en su longitud de onda y un incremento en su magnitud para conservar la energía total. Por otro lado, los científicos explican también que si el cambio oeste-este fuera abrupto debería haber una reflexión de la onda Kelvin como ondas Rossby, que haría perder energía a la primera. Mosquera-Vásquez et al. (2014), usando datos observados, muestran que en eventos El Niño del Pacífico Central, en los que la profundidad de la termoclina no es uniforme a lo largo del Pacífico Ecuatorial, la onda Kelvin se refleja parcialmente como ondas Rossby y no logra alcanzar la costa americana con la misma intensidad con la que se formó. Si vemos el gráfico inferior de la Figura 3, el cual representa la profundidad de la isoterma de 20°C (termoclina), obtenida de los datos de los flotadores ARGO, para el periodo diciembre 2015 – febrero 2016, se puede calcular, usando los resultados del modelo de “capa y media” y asumiendo una gravedad reducida $g' = 0.06 \text{ m/s}^2$, que una onda Kelvin formada en el extremo occidental tendría una velocidad de 2.94 m/s alrededor de la línea de cambio de fecha, pasando por el valor de 2.68 m/s, entre 160°W y 120°W, para terminar con una velocidad aproximada de 2 m/s en el extremo oriental. Esto podría haber sucedido con la onda Kelvin que se formó a mediados de diciembre cuya señal se aprecia en el panel superior de la Figura 3. Una vez formada la onda, esta cambia su velocidad entre 100° y 110°W, tal como se muestra en las líneas punteadas. Como la velocidad está ligada también a su estructura meridional, por la continuidad de la corriente zonal y presión y asumiendo que no existe dispersión modal, se debería ver un incremento de su amplitud a lo largo del ecuador. Asimismo, habría que hacer un análisis para detectar si hubo reflexión de ondas Rossby en esta longitud.

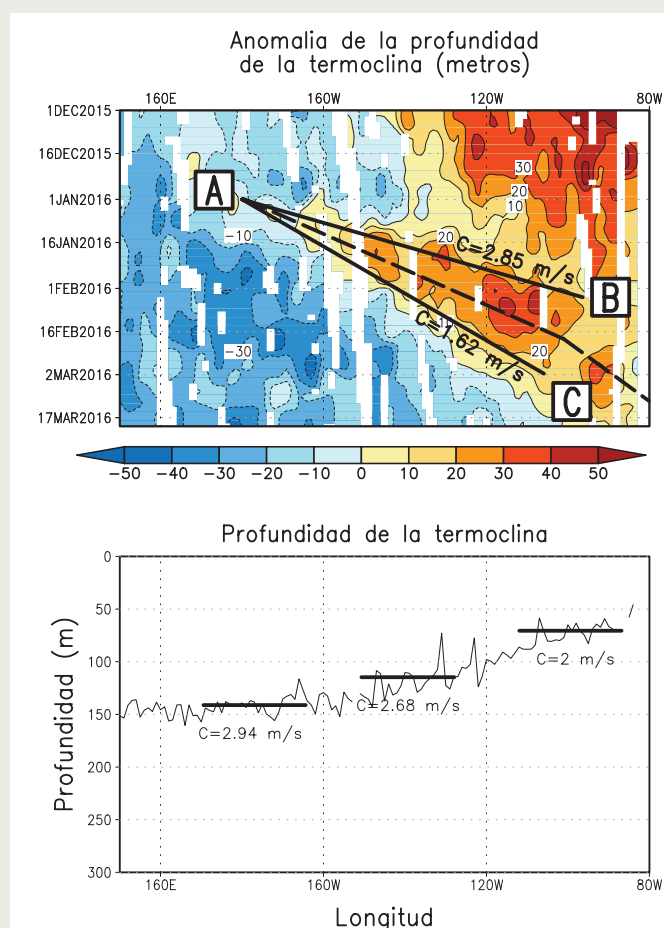


Figura 3. En el panel superior se muestra la evolución de la anomalía de la profundidad de la termoclina obtenida de los flotadores ARGO y de la climatología de GODAS. Las líneas negras representan la trayectoria que tendría una onda Kelvin con una velocidad de 2.85 m/s (AB) y 1.62 m/s (AC). El panel inferior indica la profundidad promedio de la termoclina entre 01 de diciembre de 2015 y 01 de marzo de 2016. Las líneas rectas horizontales indican aproximadamente el promedio de la profundidad (m) de la termoclina (145, 120, 70) y más abajo la velocidad teórica (m/s) que debe tener una onda Kelvin con dicha profundidad de termoclina (2.94, 2.68 y 2) usando la fórmula $C=(g'H)^{0.5}$, donde g' es la gravedad reducida y H la profundidad de la termoclina.

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Mosquera K. y Dewitte B.

Algo que lo descrito en el párrafo anterior no puede explicar es la propagación en forma de abanico que se observa en la señal de algunas ondas Kelvin sobre la profundidad de la termoclina, presentando un rango de velocidades de onda en lugar de una sola. Es decir, la onda Kelvin, al parecer, sufrió una especie de dispersión de su energía desde que se formó y mantuvo su señal máxima casi al centro de este “abanico” y una mayor dispersión entre 100° y 110°W. Los extremos de esta estructura corresponden a velocidades de onda de aproximadamente 2.85 m/s (AB) y 1.62 m/s (AC). Tomando el concepto de Busalacchi y Cane (1988), lo que podría haber ocurrido es que, debido al cambio de la densidad horizontal del océano, la onda Kelvin cálida se habría transmitido como: 1) un paquete de ondas Kelvin, de igual o menor velocidad que la original, y 2) otro paquete de ondas Rossby cortas (las que viajan al este). Adicionalmente, habría una reflexión de la onda Kelvin original como un paquete de ondas Rossby largas (las que viajan al oeste). Este proceso depende de la estructura de la termoclina, la cual determina la estructura vertical de las ondas (i.e. modos baroclinicos) y el intercambio de *momentum* (y energía) entre distintas ondas. Este proceso de reflexión/transmisión habría sido más intenso entre 110° y 100°W, donde la termoclina presentó una mayor inclinación, por lo que la estructura vertical de las ondas pudo modificarse y tener mayor variabilidad vertical. Esto se resume en forma gráfica en la Figura 4. El trabajo de Dewitte et al. (1999), quienes usaron información de un modelo de circulación general, concluyó que en este proceso de dispersión de energía, la amplitud de las ondas Kelvin más lentas se incrementarían en el extremo oriental. Por otro lado, procesos no-lineales pueden también contribuir a que la onda Kelvin se pueda disipar; tal idea la plantean Dewitte et. al. (2016). En su trabajo los autores resaltan el rol de la “advección” en la ecuación de *momentum* (términos

no-lineales de la forma $u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x}$) en la disipación

de las ondas Kelvin por medio de dispersión modal. Esto pudo contribuir a que El Niño 2014 no se desarrollara. Más aún, el estudio numérico de Giese y Harrison (1990) muestra que la poca profundidad de la termoclina en el Pacífico Oriental hace que los efectos no-lineales en las ondas Kelvin sean importantes debido a que la amplitud de las corrientes asociadas a las ondas alcanzan un nivel comparable al de las corrientes promedio, por lo cual las aproximaciones lineales podrían no ser adecuadas en esta región. Lo explicado arriba son procesos físicos que serán

importantes para interpretar la dinámica de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial, particularmente para aquellas que se presentaron en el periodo 2015/2016. Saber exactamente cuál es el mecanismo que determina la propagación de una onda Kelvin específica hacia el continente americano nos permitirá realizar un mejor pronóstico de su impacto en la temperatura superficial del mar en la costa peruana. Esto es un trabajo complejo, que amerita mucho esfuerzo tanto para la obtención y procesamiento de información *in situ* y satelital, como para la implementación de modelos oceánicos simples y de circulación general. Sin embargo, experimentos con modelos oceánicos de circulación general requieren de sistemas de

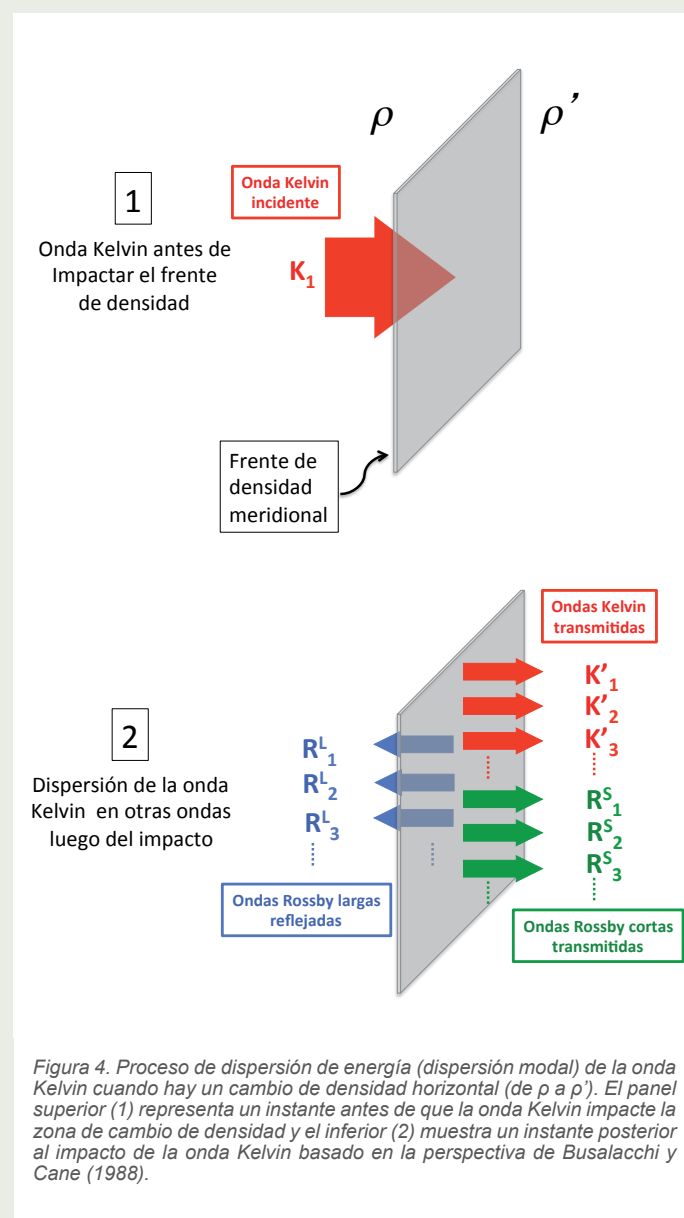


Figura 4. Proceso de dispersión de energía (dispersión modal) de la onda Kelvin cuando hay un cambio de densidad horizontal (de ρ a ρ'). El panel superior (1) representa un instante antes de que la onda Kelvin impacte la zona de cambio de densidad y el inferior (2) muestra un instante posterior al impacto de la onda Kelvin basado en la perspectiva de Busalacchi y Cane (1988).

cálculo de alto rendimiento (ej. Segura et al., 2014; Montes et al., 2016). Es este tipo de experimentos con los que se trabajará en el futuro para cuantificar el efecto de los procesos oceánicos no-lineales sobre la disipación/alteración de la onda de Kelvin y poder interpretar mejor lo que aconteció a las ondas Kelvin para no impactar, con gran intensidad, la TSM de la costa en el evento El Niño 2015/2016. Es importante resaltar que este es un tema de investigación que deberá ser resuelto en los próximos años por la propia comunidad científica peruana, ya que no es prioritario para otros países pero sí para el Perú.

Referencias

- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific, *Journal of Physical Oceanography*, 97(3), 163-172.
- Busalacchi, A. J., and M. A. Cane, 1988: The effect of varying stratification on low frequency equatorial motions, *Journal of Physical Oceanography*, 18, 801-812.
- Dewitte B., G. Reverdin, and C. Maes, 1999: Vertical structure of an OGCM simulation of the equatorial Pacific Ocean in 1985-1994, *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1542-1570.
- Dewitte, B., K. Mosquera, y K. Takahashi, 2016: ¿Por qué El Niño 2014 no creció en el Pacífico Central?, *Boletín Técnico "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"*, 3, 1, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- ENFEN, 2012: Definición operacional de los eventos "El Niño" y "La Niña" y sus magnitudes en la costa del Perú. Nota Técnica.
- ENFEN, 2015a: Informe Técnico ENFEN, No.3 - 2015, marzo de 2015, 29.
- ENFEN, 2015b: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 02, mayo de 2015, 52.
- ENFEN, 2015c: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 04, julio de 2015, 51.
- ENFEN, 2015d: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 05, agosto de 2015, 59.
- ENFEN, 2015e: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 07, octubre de 2015, 61.
- ENFEN, 2016: Informe Técnico ENFEN, Año 2, No. 02, enero de 2016, 61.
- Giese, B. S., D. E. Harrison, 1990: Aspects of the Kelvin wave response to episodic wind forcing, *Journal of Geophysical Research*, 95 (C5), 7289-7312.
- Montes, I., K. Mosquera, M. R. Luna, H. Gilt, D. Gazen, y R. Woodman, 2016: Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster, *Boletín Técnico "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"*, 3, 3, 9-10, Instituto Geofísico del Perú.
- 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"*, 1, 1, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Mosquera, K., y B. Segura, 2015: Experimentos con el modelo oceánico lineal, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 2, 9, 9-10, Instituto Geofísico del Perú.
- Mosquera, K., 2009: Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados, Tesis para optar el grado de Magíster en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, and S. Illig, 2014: The Central Pacific El Niño Intraseasonal Kelvin wave, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/2014JC010044.
- Philander, S. G., 1991: *El Niño, La Niña, and Southern Oscillation*, Academic Press, Londres, 289.
- Segura, B., I. Montes, y K. Mosquera, 2014: Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 11, 8-9, Instituto Geofísico del Perú.
- Wang, B., 2003: Kelvin Waves, *Encyclopedia of Meteorology*, ED. J. Holton, Academic Press, 1062-1067.
- Yang, J., and L. Yu, 1992: Propagation of equatorially trapped waves on a sloping thermocline, *Journal of Physical Oceanography*, 22, 573-583.

Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster

Ivonne Montes, Dra.¹; Kobi Mosquera, Dr.¹; María Rosa Luna, Ing¹; Huber Gilt, M.Sc.¹; Didier Gazen, Dr.²; Ronald Woodman, Ph.D.¹

¹Instituto Geofísico del Perú

²Laboratorio de Aerología de Toulouse (Francia)

El sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster, con el que actualmente cuenta el Instituto Geofísico del Perú (IGP), es una plataforma moderna de última generación dedicada al cálculo científico intensivo. Esta infraestructura ha sido implementada para proporcionar los recursos computacionales (e.g., horas de cálculo) requeridos para realizar las investigaciones científicas de alto nivel que se desarrollan en el IGP, fundamentalmente aquellas relacionadas al estudio de la dinámica de fluidos geofísicos. Además, lo más importante de este proyecto es que no solo tiene como beneficiario al IGP, sino también a la comunidad científica peruana (e.g., universidades, institutos, etc.), siendo su fin último el contribuir al desarrollo científico y tecnológico del Perú.

La necesidad de este sistema computacional se basa en que, como es de conocimiento, los procesos físicos involucrados en el campo de la geofísica pueden ser cercanamente representados a través de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales tratan

de describir su evolución espacial y temporal (es decir, su dinámica). Dichas ecuaciones no pueden ser resueltas analíticamente (i.e., no pueden tener soluciones con funciones matemáticas) debido a la complejidad del sistema, por lo que se requiere de otras técnicas numéricas para obtener una solución aproximada. La técnica o método numérico más común implica transformar el medio, de un dominio continuo a uno discreto, es decir, a una malla dividida en pequeñas celdas donde las ecuaciones diferenciales puedan ser “discretizadas” y, finalmente, resueltas. Esto forma parte del modelado numérico científico, el cual es muy usado para estudiar y tratar de entender el sistema complejo del mundo real. Esta técnica, en algunos casos, permite simplificar el costo de la experimentación real, así como generar una serie de experimentos idealizados sobre situaciones observadas (y no observadas) a fin de ganar entendimiento y contribuir a la solución de problemas en muchas áreas del conocimiento (e.g., Segura et al., 2014).

En la actualidad, a nivel mundial, el desarrollo y empleo de modelos numéricos implica el uso de supercomputadores y/o computadoras de alto rendimiento para resolver problemas que involucren la dinámica de la Tierra, su interacción con los seres vivos, los procesos naturales que pueden afectar al ser humano y el efecto de este sobre los procesos físicos naturales en diferentes escalas de espacio y tiempo (e.g., sobre todo el planeta o una región en particular y en el pasado, presente o futuro). Por lo tanto, este tipo de arquitectura computacional permite abordar temas de naturaleza muy compleja, tal es el caso de las investigaciones relacionadas al cambio climático global. Por ejemplo, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) basa sus resultados en las salidas numéricas de modelos climáticos que incluyen dentro de sus componentes la interacción entre el océano, la atmósfera y la Tierra para entender los diferentes posibles escenarios del cambio climático a nivel global, los cuales son de utilidad para la toma de decisiones. Por lo tanto, hoy en día es una exigencia el uso de modelos numéricos para mejorar la comprensión de los fenómenos geofísicos a fin de contribuir a un mejor pronóstico



El HPC-Linux-Clúster se encuentra ubicado en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacional del IGP.

de los mismos y, finalmente, a la mitigación de daños mediante la toma de decisiones.

Para el caso particular del Perú, actualmente surge la necesidad que la comunidad científica nacional tome mayor interés en entender los procesos geofísicos que representan una amenaza para la población. Por ejemplo, si bien los modelos climáticos han ayudado a entender los posibles efectos del cambio climático en forma global, no son claros con respecto a la representación de las variaciones climáticas locales o regionales. Por un lado, los modelos muestran ser más realistas en la representación de los fenómenos globales, tales como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, cuya fase cálida es llamada El Niño y fase fría La Niña), y en su estado climático base en el Pacífico Tropical, señalando una alta probabilidad de que el ENSO será el modo dominante de variabilidad interanual en el futuro (lo que podría aumentar la variabilidad en las precipitaciones en nivel regional debido a una mayor disponibilidad de humedad atmosférica). Por otro lado, a nivel regional y para el caso particular de la costa peruana, las proyecciones son dudosas, ya que todos los modelos climáticos muestran errores persistentes o sistemáticos en la representación del clima actual. Especialmente, muestran un sesgo cálido sobre la temperatura superficial del mar y un exceso en la precipitación del Pacífico. A pesar de que estos errores persistentes o sistemáticos fueron documentados hace 20 años, la comunidad científica internacional ha progresado poco en su solución. Esto es probablemente debido a la complejidad del problema y al hecho de ser temas de relativamente baja prioridad para la comunidad internacional (Takahashi, 2014).

Es así que el IGP, a través de su Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacional, viene haciendo uso del modelado numérico científico en temas fundamentales: los mecanismos del Fenómeno de El Niño, el rol del océano sobre el clima, la evaluación del cambio climático en el Perú y sus impactos sobre la sociedad. Dichos fenómenos, junto a otros temas relacionados a la geofísica, requieren, por su naturaleza compleja, gran capacidad de cómputo, es decir, máquinas capaces de procesar cálculos matemáticos a gran velocidad a fin de lograr una solución aproximada del sistema complejo. Por lo tanto, el HPC-Linux-Clúster se presenta como la infraestructura de última generación capaz de suplir la necesidad computacional de las investigaciones dedicadas a resolver y analizar problemas geofísicos (naturales y antropogénicos) que afectan a la población peruana y sus actividades, así como

incrementar la capacidad de pronóstico y contribuir con el proceso de toma de decisiones que permita establecer estrategias para reducir la vulnerabilidad actual en el Perú.

HPC-Linux-Clúster es ahora una de las herramientas computacionales más grandes y poderosas a disposición de la comunidad científica peruana, la cual fue adquirida gracias al Convenio de Subvención N°101-2014-FONDECYT, a los proyectos de colaboración SPIRALES 2012 IRD-IGP, Manglares IGP (IDRC) y al Programa Presupuestal 068. Dicho sistema cuenta con 26 nodos computacionales (procesadores Xeon 2.5GHz y 1.9GHz), 552 núcleos, ~2.56TB de memoria principal total, un dispositivo de almacenamiento de 400TB, conexiones Infiniband (QDR y FDR) y alcanza una capacidad teórica pico de ~20 TFLOPS. Además, por su diseño 'tipo clúster', permite un crecimiento computacional continuo, de acuerdo a las necesidades y recursos disponibles, consintiendo así ampliar el conocimiento de los fenómenos geofísicos naturales y antropogénicos. El entorno de HPC-Linux-Clúster proporciona todas las herramientas y bibliotecas para desarrollar y ejecutar aplicaciones/programas/modelos secuenciales o paralelos. En la actualidad, se cuenta con 18 usuarios pertenecientes al IGP cuyas actividades contemplan la implementación, calibración, optimización y desarrollo de modelos numéricos, así como el procesamiento de información periódica para el monitoreo del Fenómeno El Niño. Dicha información forma parte del producto "Estudios para la estimación del riesgo de desastres" del Programa Presupuestal por Resultados 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres".

El sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster se encuentra disponible para la comunidad científica nacional a través del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacional del IGP, al cual se puede acceder a través de la página web <http://scah.igp.gob.pe/laboratorios/dfgc/> o escribiendo a dfgc@igp.gob.pe.

Referencias

Segura, B., I. Montes, y K. Mosquera, 2014: Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 1, 11, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.

Takahashi, K., 2014: El Niño y el cambio climático, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 1, 5, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2016-3

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 valor del Índice Costero El Niño (ICEN), las condiciones climáticas de la costa peruana para el mes de febrero fueron cálidas moderadas (1.49°C), manteniéndose la presencia de El Niño Costero, el cual alcanzó, en toda su evolución, la magnitud fuerte. Para el caso particular del verano (diciembre 2015-marzo 2016), la magnitud de El Niño sería moderada. Los valores temporales del ICEN (ICENTmp), 1 y 2, indican que para los meses de marzo y abril las condiciones serán, cálidas moderadas y cálidas débiles, respectivamente. El pronóstico de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) de los modelos numéricos internacionales para la región del Pacífico Oriental, con condiciones iniciales del mes de marzo, indica en su mayoría declinación del evento El Niño con condiciones, en promedio, cálidas débiles para el mes de abril, mientras que para mayo mostraría condiciones neutras. Estos mismos resultados numéricos predicen que para el Pacífico Central las condiciones serían cálidas moderadas y cálidas débiles para esos meses.

Continúa observándose la propagación de onda Kelvin fría en la profundidad de la termoclina. Los datos de ARGO sugieren que esta onda ya estaría empezando su arribo a la costa sudamericana. Por otro lado, la ocurrencia de un ligero pulso de viento del oeste ecuatorial en el Pacífico Oriental (130°W-110°W), así como la presencia de una onda Kelvin cálida débil, podrían haber reducido la magnitud de esta onda, como parecen indicar los datos de TAO y ARGO en 95°W. La onda Kelvin fría podría iniciar el proceso de normalización de la temperatura en nuestra costa en el transcurso de este mes.

Índice Costero El Niño

Utilizando los datos de TSM promediados sobre la región Niño1+2, actualizados hasta el mes de marzo de 2016, 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 febrero de 2016. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN	Condiciones costeras del mes
2015	Noviembre	2.18	Cálida Fuerte
2015	Diciembre	2.07	Cálida Fuerte
2016	Enero	1.77	Cálida Fuerte
2016	Febrero	1.49	Cálida Moderada

Tabla 1. Valores recientes del ICEN.

(Descarga: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>)

Según el valor del ICEN para el mes de febrero, se establece que continúa la presencia de El Niño costero de magnitud fuerte, el cual se inició en abril de 2015.

Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

En el océano Pacífico Ecuatorial se continúan observando las condiciones del Fenómeno El Niño 2015-16. Aún persiste el acoplamiento océano-atmósfera en el Pacífico Central, aunque inferior al mes anterior. Las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM) en la región Niño 3.4 son tenuemente superiores, en promedio, a las de 1998 y 1983. En la región Niño 1+2 la ATSM es inferior a lo observado en 1998 y 1983, similar a la de 1992 y superior a las condiciones de 1973. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico Central (160°E-160°W; 5°S-5°N) son inferiores a las de los años 83 y 98. La convección en el Pacífico Central-Oriental sigue activa pero declinó durante el mes de marzo y no alcanza los valores de 1993 y 1998. La termoclina en el Pacífico Oriental, en el punto 110°W, mostró anomalías negativas desde la quincena de marzo, debido al paso de la onda Kelvin fría. La termoclina en 95°W presentó un pequeño aumento en las anomalías positivas, probablemente debido a un ligero pulso de viento del oeste ecuatorial en el Pacífico Oriental, sin embargo estas anomalías se encuentran próximas a la climatología. Por otro lado, la descarga de calor ecuatorial continúa y la anomalía de la inclinación de la termoclina ha mostrado una reducción, consistente con el desplazamiento al sur de las anomalías de viento del oeste.

Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

Los productos de TAO (Figura 1b) y ARGO (Figura 1c) muestran la presencia de una onda Kelvin fría en el extremo occidental y central en la profundidad de la termoclina, aunque estas mismas fuentes sugieren que en la región oriental (aproximadamente en 100°W) habría una aparente atenuación. En los datos de JASON (Figura 1d) y en las simulaciones del modelo lineal (Figura 1e) no se aprecia claramente el desarrollo de la onda Kelvin fría sino que sugieren una onda Kelvin cálida débil, la cual podría haberse formado como consecuencia de las anomalías de viento débiles del oeste que se dieron en el Pacífico Occidental a fines de febrero e inicios de marzo, y debería arribar en las siguientes semanas.

Resumen del Informe Técnico

PPR/EI Niño - IGP/ 2016-3

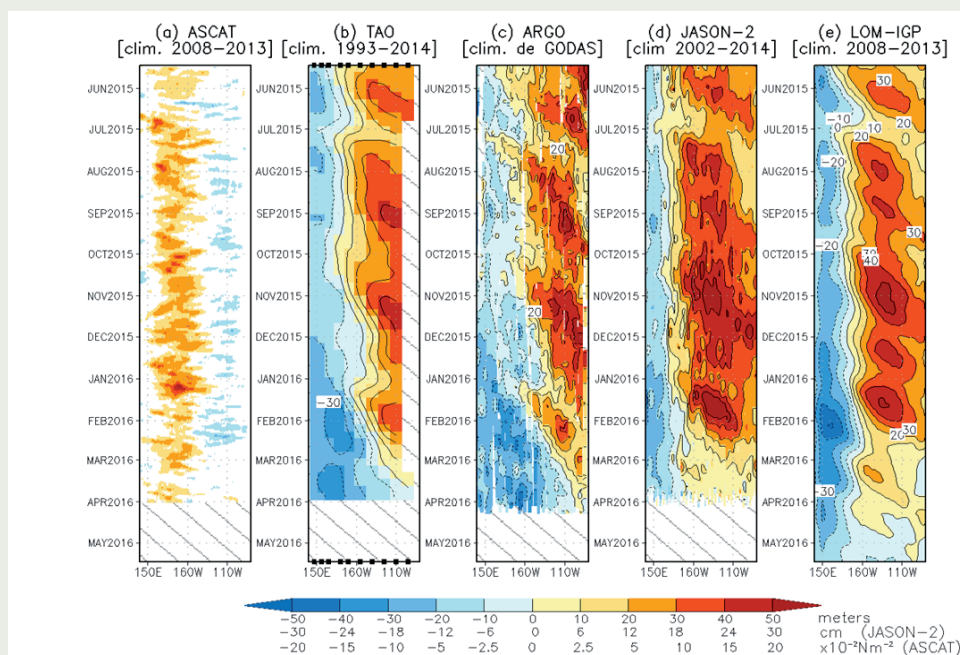


Figura 1. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Finalmente en (e) se muestra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

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para el mes de abril, de los 7 modelos disponibles sobre pronósticos de la anomalía de TSM en el Pacífico Oriental (región Niño 1+2) inicializados en marzo, 1 indica condiciones cálidas moderadas, 5 cálidas débiles y 1 neutras. Para el mes de mayo, de los 8 modelos, 4 indican condiciones cálidas débiles y 4 condiciones neutras. Para junio, 1 indica condiciones cálidas débiles y 7 condiciones neutras (Figura 2). Por otro lado, en el Pacífico Central (Niño 3.4) los modelos indican que las condiciones en promedio para los meses de abril y mayo serían cálidas moderadas y débiles, respectivamente; las condiciones para el trimestre abril – junio serían cálidas débiles y para julio-setiembre 2016 serían frías.

Conclusiones

1. El ICEN para febrero de 2016 fue de 1.49 (cálida moderada). Asimismo, el ICEN_{tmp} para marzo de 2016 es 1.14 (cálida moderada) y de abril de 2016 es de 0.78 (cálida débil). De confirmarse estos datos, El Niño costero habría alcanzado una magnitud «moderada» este verano.

2. Continúa observándose la propagación de la onda Kelvin fría en la profundidad de la termoclina. Los datos de ARGO sugieren que esta onda ya estaría empezando su arribo a la costa sudamericana. Por otro lado, la ocurrencia de un ligero pulso de viento del oeste ecuatorial en el Pacífico Oriental (130°W-110°W) y de una onda Kelvin cálida débil

podría haber reducido la magnitud de esta onda, como parecen indicar los datos de TAO y ARGO en 95°W. La onda Kelvin fría podría iniciar el proceso de normalización de la temperatura en nuestra costa en el transcurso de abril.

3. Para el Pacífico Oriental (Niño 1+2), 5 de 7 modelos inicializados en marzo indican que el mes de abril presentaría condiciones cálidas débiles (los otros 2 modelos indican condiciones fuertes y neutras, respectivamente). Según los modelos, El Niño costero se podría extender hasta entre abril (4 de 7 modelos) y mayo (2 de 7 modelos). Para el invierno, varios modelos proyectan valores negativos del ICEN, aunque correspondientes a condiciones neutras. Por otro lado, las últimas corridas del modelo CFSv2 indican condiciones más frías que las anteriores.

4. Para el Pacífico Central (Niño 3.4), todos los modelos que han sido considerados, y que fueron inicializados en marzo, indican que El Niño continuaría su declinación y presentaría condiciones moderadas en promedio para abril. Para julio 2016 en adelante, la mayoría de modelos predice condiciones neutras a frías, aunque algunos mantienen las condiciones cálidas.

5. Se recuerda que en general los pronósticos de los modelos globales inicializados en estos meses son bastante inciertos por corresponder este periodo a la barrera de predictibilidad. A partir de mayo serán más confiables.

6. Por otro lado, en general, la descarga de calor

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2016-3

ecuatorial continúa y la anomalía de la inclinación de la termoclina ha mostrado una reducción, consistente con el desplazamiento al sur de las anomalías de viento del oeste. En el Pacífico Oriental, la convección se ha reducido aunque continúa anómalamente activa. El breve pulso de viento del oeste en el Pacífico Oriental se habría debido a una onda Kelvin atmosférica, pero en general se observa la declinación de las anomalías de vientos del oeste ecuatoriales.

Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 1, 3, 4-7, 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, Lima.

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", 1, 12, 4-8, 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 Magíster en Física - Mención Geofísica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

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", 1, 1, 4-7, 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, 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", 1, 4, 8-9, 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", 1, 1, 8-9, 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", 1, 2, 4-7, 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", 1, 3, 8-9, Instituto Geofísico del Perú.

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

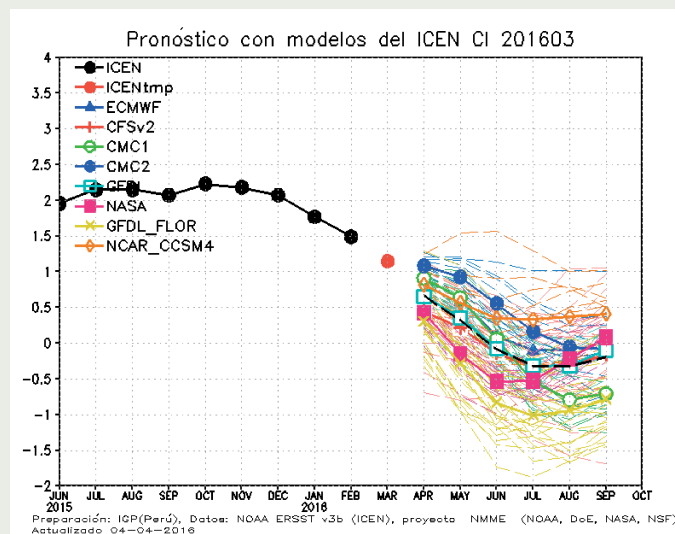


Figura 2. Índice Costero El Niño (ICEN, negro con círculos llenos) y su valor temporal (ICENtmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de tres meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Las líneas entrecortadas corresponden a los miembros de los "ensembles". Los pronósticos de los modelos CFSv2, CMC1, CMC2, GFDL, NASA GFDL_FLOR y NCAR_CCSM4 tienen como condición inicial el mes de marzo de 2016. El modelo ECMWF tiene como condición inicial el mes de marzo 2016. (Fuente: IGP, NOAA, proyecto NMME, ECMWF).

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", 1, 5, 8-9, 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

Comunicado Oficial ENFEN

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



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 06 - 2016

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 costero que se viene presentando con condiciones cálidas en la costa peruana desde otoño del 2015. El evento El Niño costero ha iniciado su fase de declinación. En la primera quincena de marzo se registró el paso de la onda Kelvin cálida, aunque con una magnitud débil. Para el mes de abril, se espera el arribo de una onda Kelvin fría a la costa peruana, la cual contribuiría a la normalización de las condiciones oceanográficas. Sin embargo, no se descartan algunos episodios aislados de lluvias fuertes⁴, principalmente en las partes medias y bajas de Tumbes y Piura, del orden de 35 a 60 mm/día, cuya frecuencia e intensidad iría disminuyendo hacia fines de marzo debido a la declinación de El Niño y de la temporada de lluvias.

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 correspondiente a la primera quincena del mes de marzo de 2016 y sus perspectivas.

Continúa la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. En la región del Pacífico Ecuatorial Central (Niño 3.4)², la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) disminuyó a +1,9°C aproximadamente, la que fue similar a las observadas en 1998 y 1983. En lo que respecta a las precipitaciones en el Pacífico Ecuatorial central-oriental³-un indicador clave del acoplamiento océano-atmósfera, se intensificaron en la primera quincena de marzo pero sin alcanzar los valores observados en 1998 y 1983. Por otro lado, la onda Kelvin fría ha alcanzado los 110°W y continúa su propagación hacia el este en la capa subsuperficial.

En el Pacífico ecuatorial oriental (Niño 1+2), la TSM alcanzó 27,5°C en promedio, mientras que su anomalía se incrementó de +0,8° a +1,1°C. Los valores estimados actualizados del Índice Costero El Niño (ICENTmp) para febrero y marzo son de +1,40°C y +1,05°C (Condición Cálida Moderada).

En la primera semana de marzo, el registro de la temperatura en la Estación Fija Paita, localizada a siete millas náuticas (mn) de la costa mostró la profundización de las isotermas hasta 60 metros (m) y el aumento de las anomalías en los 100 m de la columna de agua de +1° hasta +3°C en promedio. Además, las ATSM en el litoral de Paita y de Talara aumentaron en la misma proporción. Estos cambios fueron consistentes con el arribo de la señal de la onda Kelvin cálida en la termoclina, así como con el debilitamiento de los vientos costeros del sur en el norte del país, que favorecieron a la proyección hacia el sur de aguas cálidas superficiales de origen ecuatorial. Sin embargo, en la segunda semana, las anomalías de temperatura en la Estación Fija Paita disminuyeron a +1°C, en promedio, sobre los 40 metros de profundidad, sugiriendo que el núcleo de la onda Kelvin cálida ya habría pasado, aunque con un impacto débil.

Los vientos del sur mostraron velocidades en el rango normal (entre 5 y 6 m/s) frente a la costa central y sur en la primera semana, para luego intensificarse en la segunda semana, alcanzando valores de 15 m/s, frente a Pisco e Ica.

En el litoral centro y sur se mantuvieron anomalías de TSM entre +2° y +3°C durante la primera quincena. Por otro lado, continúa la presencia de aguas con temperaturas sobre los 27°C por fuera de las 100 mn frente a la costa norte y centro en la actualidad. Las temperaturas subsuperficiales frente a Chicama y a Callao mostraron una reducción de las anomalías a valores entre +1°C y +2°C en los primeros 150 metros de profundidad, esto con respecto al mes anterior.

Las temperaturas extremas del aire se presentaron por encima de lo normal a lo largo de la costa norte y central con anomalías de +1,4°C para la temperatura máxima y +1,3°C para la temperatura mínima.

Entre la cuarta semana de febrero y la primera semana de marzo, los vientos superficiales provenientes del Golfo de Panamá en el Pacífico Ecuatorial Oriental se intensificaron, favoreciendo el desarrollo de la banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical en el

Hemisferio Sur. Esta condición sumada a la presencia de aguas cálidas y a la contribución de vientos del este provenientes de la Amazonía en los niveles medios y altos, dio lugar a lluvias extremadamente fuertes⁴ en Tumbes, Piura y partes altas de Lambayeque. Por otro lado, en la primera quincena de marzo, estos mismos vientos del este favorecieron la presencia de lluvias esporádicas en la sierra central y sur.

Producto de las precipitaciones, los caudales de los ríos en la costa norte del país se presentaron por encima de sus valores promedio, pero con un comportamiento decreciente desde la segunda semana del mes. Los reservorios en la costa norte y sur muestran un incremento, alcanzando en promedio 59% y 72% de su capacidad máxima, respectivamente. Resalta el incremento hasta la primera semana del volumen de agua almacenado en los principales reservorios de la cuenca Rimac debido a las precipitaciones presentadas en la región andina central.

La clorofila-a, indicador de la productividad primaria, continuó presentando anomalías negativas a lo largo de la costa. Por su parte, los indicadores de la actividad reproductiva de la anchoveta mostraron un incremento del desove, aunque el contenido graso continúa registrando valores bajo el patrón histórico, indicando que la reserva energética del recurso aún se encuentra disminuida. Se mantiene la presencia de especies de aguas cálidas como: atún de aleta amarilla, pez aguja, bonito, perico, wahoo, aguja, entre otros, dentro de las 30 mn entre Pimentel (6°S) y Huacho (12°S), indicando la persistencia de estas en el litoral norte-centro.

PERSPECTIVAS

El evento El Niño costero ha iniciado su fase de declinación. En lo que resta del mes de marzo se espera que la anomalía positiva de la TSM frente a la costa peruana tiendan a disminuir. Para el mes de abril, se espera el arribo a la costa peruana de una onda Kelvin fría, cuya magnitud puede haber sido atenuada. Sin embargo contribuiría a acelerar la normalización de las condiciones oceanográficas.

Los modelos globales para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2) indican en su mayoría condiciones cálidas débiles para el mes de abril, evolucionando a condiciones neutras en junio. Para el Pacífico ecuatorial central (región Niño 3.4), los modelos globales pronostican la declinación del evento El Niño en los próximos meses, alcanzando magnitud moderada en abril.

Para la región nor-occidental del Perú, debido a la persistencia de vientos del este en niveles medios y altos de la atmósfera y a las actuales condiciones cálidas en la superficie del mar, no se descartan algunos episodios de lluvias fuertes, principalmente en las partes medias y bajas de Tumbes y Piura, del orden de 35 a 60 mm/día, las cuales irían disminuyendo para fines de marzo debido a la declinación de El Niño al comportamiento estacional de las lluvias en la zona. Por otro lado, en la región andina central y sur continuarán las lluvias dentro su régimen normal asociadas a la estacionalidad.

El Comité Multisectorial ENFEN continuará informando quincenalmente sobre la evolución de las condiciones observadas y sus perspectivas.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao-Perú, 17 de marzo de 2016

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: 5°S - 5°N, 170°W - 100°W

⁴"Lluvias fuertes" se define como el percentil 90% de la precipitación diaria. "Lluvias muy fuertes" y "lluvias extremadamente fuertes" se definen como el percentil 95% y el percentil 99% de la precipitación diaria, respectivamente.



Comunicado Oficial ENFEN

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



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 07-2016

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 costero que se viene presentando con condiciones cálidas en la costa peruana desde otoño del 2015. Continúa la fase de declinación del evento El Niño costero. Sin embargo, en la última semana de marzo e inicios de abril se registró un calentamiento frente a la costa central y norte, debido a la presencia de anomalías positivas de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Oriental. Asimismo, se han registrado precipitaciones aisladas de moderada intensidad (15-40 mm/día) en Tumbes, Piura y Lambayeque. Para el presente mes, se espera el arribo de una onda Kelvin fría a la costa peruana, la cual contribuirá a la normalización de las condiciones oceanográficas. En la costa norte, para el resto de la temporada de lluvias se esperan precipitaciones dentro de su normal.

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 correspondiente al mes de marzo de 2016 y sus perspectivas.

Continúa la declinación de la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. En la región del Pacífico Ecuatorial Central (Niño 3.4)², la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) disminuyó a +1,7°C aproximadamente, la que fue similar a las observadas en 1998 y 1983. Asimismo, la actividad convectiva, la anomalía del viento del oeste y el contenido de calor en el interior del océano se han reducido significativamente en esta región. La onda Kelvin fría alcanzó los 100°W y continúa su propagación hacia el este en la capa subsuperficial. Por otro lado, en la última semana en el Pacífico Oriental se ha observado anomalías positivas del viento del oeste y el desarrollo de una onda Kelvin cálida débil, las cuales han incrementado la TSM en dicha región.

En el Pacífico Ecuatorial Oriental (Niño 1+2), la TSM alcanzó 27,5°C en promedio, mientras que su anomalía se incrementó respecto a febrero de +0,7°C a +1,2°C. El valor del Índice Costero El Niño (ICEN) para el mes de febrero fue +1,49°C (Condición Cálida Moderada). Los valores estimados actualizados del Índice Costero El Niño (ICENTmp) para marzo y abril son de +1,14°C (Condición Cálida Moderada) y +0,78°C (Condición Cálida Débil). Estos resultados confirman que el evento El Niño costero alcanzó una magnitud moderada en el verano (diciembre 2015 a marzo 2016).

Durante marzo, en la Estación Fija Paita, localizada a siete millas náuticas (mn) de la costa, las anomalías en los 100 m de la columna de agua mostraron una reducción significativa de +3°C a +1°C en promedio, luego del paso de la onda Kelvin cálida a inicios del mes. En cuanto a las anomalías de la TSM en el litoral, estas presentaron en promedio valores inferiores a +1°C en la costa norte y valores entre +1°C y +3°C en la costa central y sur.

Por otro lado, continúa la presencia de aguas con temperaturas sobre los 27°C fuera de las 100 mn frente a la costa norte y centro. Las temperaturas subsuperficiales frente a Paita y Chicama, en las primeras 100 millas de la costa, mostraron una reducción de las anomalías a valores promedio entre +1°C y +2°C sobre los primeros 100 metros de profundidad.

Los vientos costeros del sur mostraron velocidades en el rango normal (entre 5 y 6 m/s) a lo largo de la costa, con excepción de la costa norte, que a inicios de marzo registraron valores por debajo de lo normal.

Las temperaturas extremas del aire a lo largo de la costa norte y central se presentaron por encima de lo normal con anomalías de +1,9°C para la temperatura máxima y +1,4°C para la temperatura mínima.

En la primera y en la última semana de marzo, se intensificaron los vientos de niveles bajos del norte provenientes del Golfo de Panamá en el Pacífico Ecuatorial Oriental, favoreciendo el desarrollo de la banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical en el Hemisferio Sur. Esta condición sumada a la presencia de aguas cálidas en el Pacífico Ecuatorial Oriental –particularmente a inicios de marzo– y

a la contribución de vientos del este provenientes de la Amazonía en los niveles medios y altos, dio lugar a lluvias en Tumbes, Piura y Lambayeque, las cuales fueron extremadamente fuertes³ a inicios de marzo y de moderada intensidad a fines del mes.

Como consecuencia del incremento de las lluvias, a inicios de marzo y principios de abril los caudales de los ríos en la costa norte del país se incrementaron alcanzando en el río Chira 1016 m³/s y 561 m³/s, respectivamente.

Los reservorios en la costa norte y sur alcanzaron en promedio 70% y 65% de su capacidad máxima, aumentando respecto a febrero en el primer caso y disminuyendo en el segundo.

Los nutrientes químicos en la capa superficial del mar exhibieron una tendencia positiva en la zona costera desde Paita hasta Callao inclusive. La clorofila-a, indicador de la producción del fitoplancton que es base de la cadena alimenticia en el mar, presentó también una tendencia positiva en la franja costera, pasando a un rango normal. Por su parte, los indicadores de la actividad reproductiva de la anchoveta mostraron la continuación del desove de la especie, mientras que el contenido graso continuó registrando valores por debajo del patrón histórico. En la última quincena de marzo se registró, dentro de las 30 mn entre Paita (5°S) y Pisco (12°S), la presencia de especies de aguas cálidas como bonito, samasa y caballa.

PERSPECTIVAS

Para mediados del mes de abril se espera el arribo de la onda Kelvin fría al litoral peruano, que contribuirá a la normalización de las condiciones oceanográficas. Sin embargo, durante el mes no se descartan fluctuaciones de la anomalía de la temperatura, debido al comportamiento de los vientos y/o al arribo posterior de una onda Kelvin cálida débil, pero sin alterar la tendencia general a la normalización.

Asimismo, se espera que las precipitaciones continúen disminuyendo en la costa norte hacia fines de abril, debido al comportamiento estacional y a la declinación de El Niño costero.

Los modelos globales para el Pacífico Ecuatorial Central (región Niño 3.4) y para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2) indican en su mayoría la declinación de El Niño, alcanzando en junio condiciones neutras.

El Comité Multisectorial ENFEN considera más probable la finalización del evento El Niño costero durante el otoño y condiciones neutras durante el invierno, sin descartar en este último período temperaturas del mar y del aire en la zona costera por debajo de lo normal.

El Comité Multisectorial ENFEN continuará informando quincenalmente sobre la evolución de las condiciones observadas y sus perspectivas.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao-Perú, 07 de abril de 2016

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

³"Lluvias fuertes" se define como el percentil 90% de la precipitación diaria. "Lluvias muy fuertes" y "lluvias extremadamente fuertes" se definen como el percentil 95% y el percentil 99% de la precipitación diaria.





© 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:

