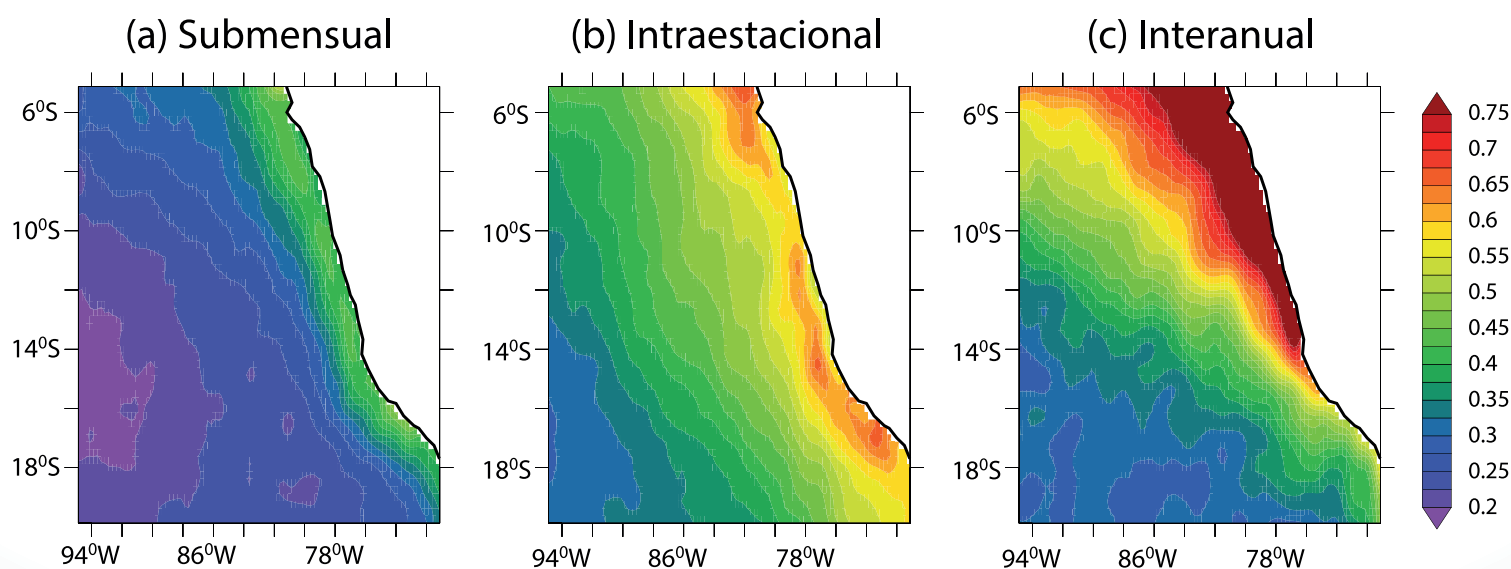


Programa Presupuestal por Resultados N° 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres" Producto: "Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño"

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

Boletín Técnico

Variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar en diferentes escalas temporales



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 Técnico 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: Goubanova K., 2014.

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

Impreso por:
Lettera Gráfica SAC.
Av. La Arboleda 431 - Ate
Teléfono (511) 7150315

Lima, Noviembre del 2015

Hecho el Depósito Legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-15849

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.

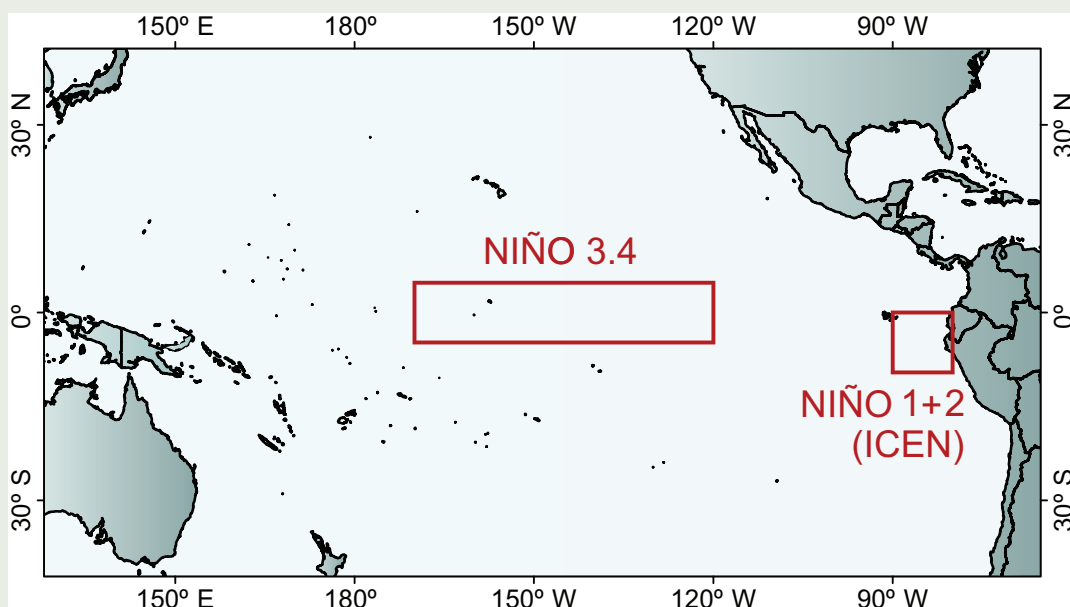
El
ENFEN es el
ente que genera la
información oficial de
monitoreo y pronóstico
del Fenómeno El Niño y
otros asociados.

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.

Variaciones intraestacionales de la Temperatura Superficial del Mar en la costa del Perú

Variabilidad de la TSM en el mar peruano

A lo largo de la costa peruana, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) cambia continuamente. Estos cambios ocurren en diferentes escalas temporales y pueden deberse a varios procesos físicos o *forzantes*, en el lenguaje de los oceanógrafos. Así, variaciones de la TSM de unos cuantos días (variabilidad sub-mensual) son típicamente inducidas por el forzante local atmosférico y, en las zonas del afloramiento costero, son asociadas, en gran medida, a la variabilidad sinóptica del viento (Renault et al., 2009; Goubanova et al., 2013; Illig et al., 2014; Aguirre et al., 2014). La Figura 1 muestra una medida de la variabilidad de la TSM en las diferentes escalas temporales (la desviación estándar de los datos filtrados). En la escala submensual (Figura 1a), se observa que la mayor variabilidad se presenta en toda la franja costera, pero con una magnitud relativamente débil ($\sim 0.4^{\circ}\text{C}$). Al contrario, las variaciones de la TSM de año en año (variabilidad interanual), que en el mar peruano son principalmente relacionadas a El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), presentan una mayor magnitud, especialmente en la costa norte donde se observan los valores que exceden 1°C (Figura 1c). La estructura espacial de la variabilidad interanual refleja la influencia del forzante remoto oceánico asociado a las ondas Kelvin oceánicas ecuatoriales (Clarke, 2008; Dewitte et al., 2012). Por ejemplo, las anomalías de la TSM durante eventos El Niño vienen inducidas por la

Ph. D. Katerina Goubanova

Investigadora Científica
Centre Européen de Recherche et de Formation
Avancée en Calcul Scientifique

Ph. D. en Climatología de la Université Paris 6, Francia. Actualmente trabaja en el Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Es autora de diversos artículos científicos publicados en revistas indexadas internacionales y recientemente su investigación está enfocada en las interacciones océano-atmósfera en el Pacífico y Atlántico Sur-Este y su papel en el desarrollo de los sesgos en los modelos climáticos globales.

Ph. D. Boris Dewitte

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

Ph.D. Ken Takahashi

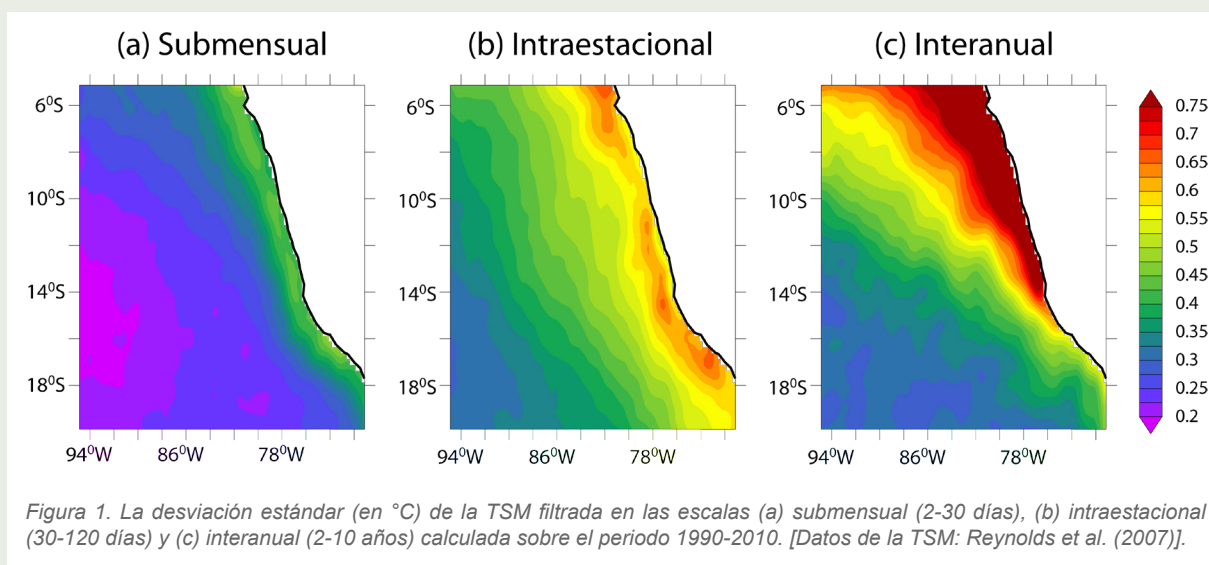
Investigador Científico
Instituto Geofísico del Perú

Ph. D. Serena Illig

Investigadora Científica del
Laboratoire d'Etudes en Géophysique et
Océanographie Spatiales

supresión del afloramiento costero o el desplazamiento (*advección*) de aguas cálidas ecuatoriales a lo largo de la costa del Perú debido al efecto de las ondas Kelvin (Mosquera, 2014).

En el presente artículo nos enfocaremos en las fluctuaciones de la TSM que se encuentran sobre la escala de tiempo intraestacional, la cual se refiere a las oscilaciones de las variables climáticas con un periodo que varía entre 30 y 120 días. Cabe mencionar que una parte de esta variabilidad intraestacional proviene de la variabilidad interna del océano y es asociada a la actividad de remolinos de mesoescala. El presente



Variaciones intraestacionales de la Temperatura Superficial del Mar en la costa del Perú

Goubanova K., Illig S., Dewitte B., Takahashi K.

artículo no analiza la variabilidad interna, la cual es más marcada afuera de la zona de afloramiento costero, sino se centra sobre la variabilidad forzada que puede explicar los eventos cálidos o fríos asociados a una alteración del afloramiento promedio dentro de una estación. Es importante predecir tal tipo de evento pues este puede tener un gran impacto sobre el ecosistema marino y sobre el clima costero.

Características de las variaciones estacionales de la TSM en 2000-2008

En la Figura 1b, que muestra la desviación estándar (en °C) de las variaciones intraestacionales, se observa que la estructura espacial de estas variaciones es similar a la de las submensuales: la mayor variabilidad se presenta a lo largo de la costa. Por otro lado, la variabilidad intraestacional muestra notablemente mayores magnitudes en todo el mar peruano con respecto a la variabilidad submensual, alcanzando 0.6 °C en promedio en la franja costera.

Para analizar con más detalle las características temporales de la variabilidad intraestacional y suavizar la variabilidad interna, consideramos la serie temporal del modo principal de la variabilidad (obtenido con el método de *funciones ortogonales empíricas* o de *componentes principales*) de la TSM filtrada entre 2 y 120 días en la franja costera (5° de ancho) de la región del Perú central (17°S-7°S). La Figura 2a muestra la variabilidad estacional climatológica del espectro de esta serie calculada con el método *wavelet* (en valores sin unidad), en la que se observa que la variabilidad intraestacional es más pronunciada en verano que en invierno y que es dominada por las oscilaciones que tienen un periodo alrededor de 60 días. Otro pico de variabilidad, aunque con menor amplitud, corresponde

al periodo alrededor de 30 días, el cual, a su vez, corresponde a la escala submensual.

Después de este primer análisis viene naturalmente la pregunta central del presente artículo: ¿Cuáles son los forzantes de la variabilidad intraestacional de la TSM?

Variabilidad intraestacional: ¿forzante oceánico remoto o forzante atmosférico local?

La respuesta no es evidente. A primera vista, uno puede suponer que el forzante principal viene de la influencia del océano por efecto de las ondas Kelvin ecuatoriales (Mosquera, 2014). De hecho, a pesar de que las amplitudes de las ondas Kelvin intraestacionales son más débiles con respecto a las ondas asociadas al ciclo interanual del ENOS, la propagación de las ondas intraestacionales y su impacto sobre la termoclina, el nivel del mar y la TSM se pueden observar a lo largo de la costa hasta al menos los 33°S (Hormazabal et al., 2001). Además, las ondas de Kelvin intraestacionales muestran una mayor actividad en verano (al menos sobre el periodo 2000-2008) y se caracterizan en esta estación por oscilaciones relativamente fuertes en el periodo alrededor de 60 días (Illig et al., 2014). En cuanto al forzante local atmosférico, como ilustra la Figura 2b, el ciclo anual del espectro del viento indica que la variabilidad es máxima para la escala submensual (periodos menos de 30 días) y para la estación de invierno, lo que es todo lo contrario al espectro de la TSM (Figura 2a). Cabe notar una pequeña señal para las oscilaciones del viento con el periodo de 60 días, pero esta señal es también mucho más pronunciada en invierno que en verano.

Teniendo en cuenta estos argumentos, Illig et al. (2014) realizaron un experimento con un modelo oceánico regional ROMS para estimar la fracción de la variabilidad intraestacional de la TSM que es forzada en forma remota por la variabilidad oceánica ecuatorial (ondas Kelvin). Este experimento se basa sobre dos simulaciones que difieren por el forzamiento superficial del viento. La primera simulación (que vamos a llamar “S-control”) utiliza el campo del viento observado sobre el periodo 2000-2008 que contiene toda la variabilidad, incluida las variaciones intraestacionales. La segunda simulación (“S-ocean”) utiliza el campo del viento climatológico calculado sobre el mismo periodo, es decir que el viento no puede generar variabilidad intraestacional en el océano localmente. Así la variabilidad intraestacional en “S-ocean” proviene estrictamente del océano. La comparación de la simulación “S-ocean” con

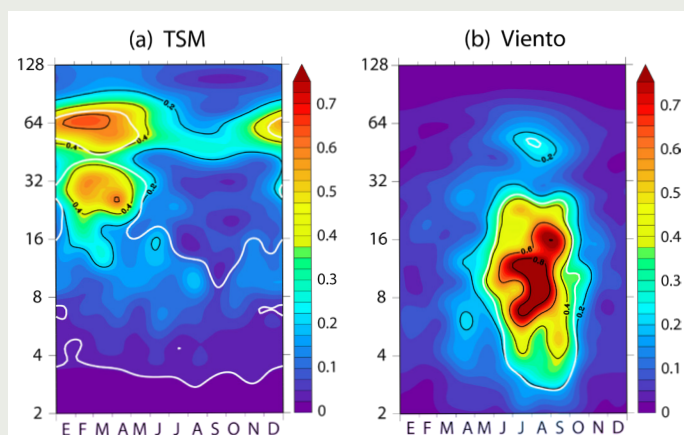


Figura 2. (a) La climatología del espectro wavelet (sin unidades) del primer modo de variabilidad de la TSM en la franja costera (5° de ancho, 7°S-17°S) filtrada entre 2 y 120 días (adaptado de Illig et al., 2014).

“S-control” se resume en la Figura 3. La curva roja muestra, en función de la latitud a lo largo de la costa, el porcentaje de la variancia (es decir, el cuadrado de la desviación estándar) de la TSM filtrada en la banda intraestacional (entre 40 y 90 días) en la simulación “S-ocean” con respecto a la simulación “S-control”. La curva azul muestra lo mismo pero para la profundidad de la termoclina. Se observa que las ondas Kelvin ecuatoriales representan entre 20% y 30% de la variabilidad intraestacional de la TSM al norte de 12°S y menos de 20% al sur (ver el eje vertical a la izquierda). Por otro lado, las ondas Kelvin generan más del 70% de la variabilidad intraestacional de la termoclina al norte de 20°S (eje vertical a la derecha). O sea, si bien las ondas de Kelvin intraestacionales se propagan a lo largo de toda la costa del Perú causando importantes fluctuaciones de la termoclina, su impacto sobre la TSM es bastante más débil.

Así, este análisis evidencia que las fluctuaciones de la TSM en la escala intraestacional, que se caracterizan por oscilaciones más fuertes en verano y en el periodo de 60 días, son forzadas principalmente por los vientos locales. Sin embargo, el forzante de viento en esta escala de tiempo tiene una variabilidad particularmente débil en verano, lo opuesto de la variabilidad de la TSM.

Papel de la estratificación en la respuesta de la TSM al forzante del viento

A fin de resolver esta aparente contradicción, verificamos, primero, si la relación entre el viento y la TSM varía a lo largo del año y, si es así, en qué estación esta relación es más fuerte. La Figura 4 (curva roja) muestra la climatología de la correlación entre las variaciones intraestacionales del viento y de la TSM. La correlación es calculada teniendo en cuenta que la respuesta de la TSM puede ser retardada en el tiempo con respecto al forzante de viento. Los números marcados por encima de la curva indican el desfase (en días) entre las variaciones de la TSM y el viento para cada mes del año. Resulta que la relación entre el viento y la TSM sigue un ciclo semi-anual muy marcado con dos periodos donde la correlación excede 0.7: uno en verano (enero-febrero) y otro en invierno (julio-setiembre). Esto indica que en verano, aunque las fluctuaciones del viento son relativamente débiles, tienen tanto impacto sobre la TSM como las fluctuaciones más fuertes invernales.

Para explicar la dependencia estacional de la relación entre el viento y la TSM en la escala intraestacional,

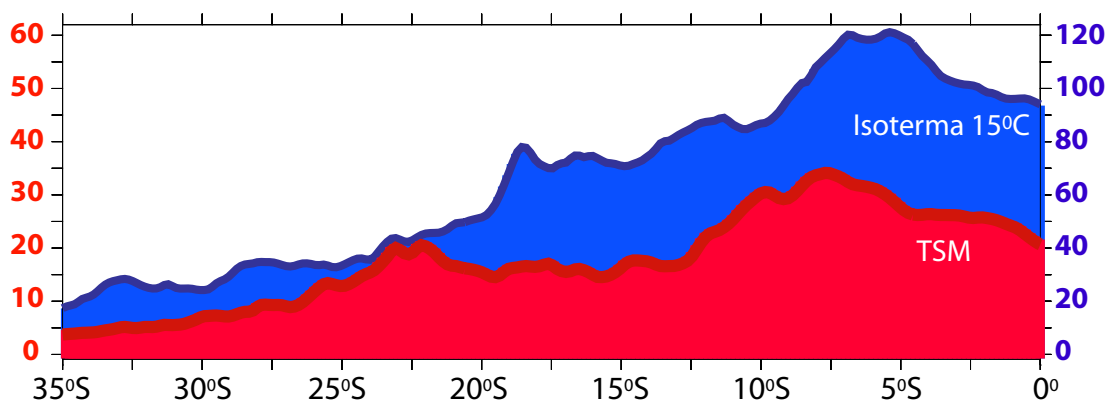


Figura 3. Proporción (%) de la variancia de la TSM (curva roja, eje vertical a la izquierda) y de la profundidad de la isoterma 15°C (curva azul, eje vertical a la derecha) intraestacionales (40-90 días) explicada por el forzante remoto (simulación “S-océano” con respecto a la simulación “S-control”), mostrada en función de la latitud y promediada en la franja costera de 0.5° de ancho. Ver el texto para descripción de las simulaciones. Periodo: 2000-2008 (adaptado de Illig et al., 2014).

Variaciones intraestacionales de la Temperatura Superficial del Mar en la costa del Perú

Goubanova K., Illig S., Dewitte B., Takahashi K.

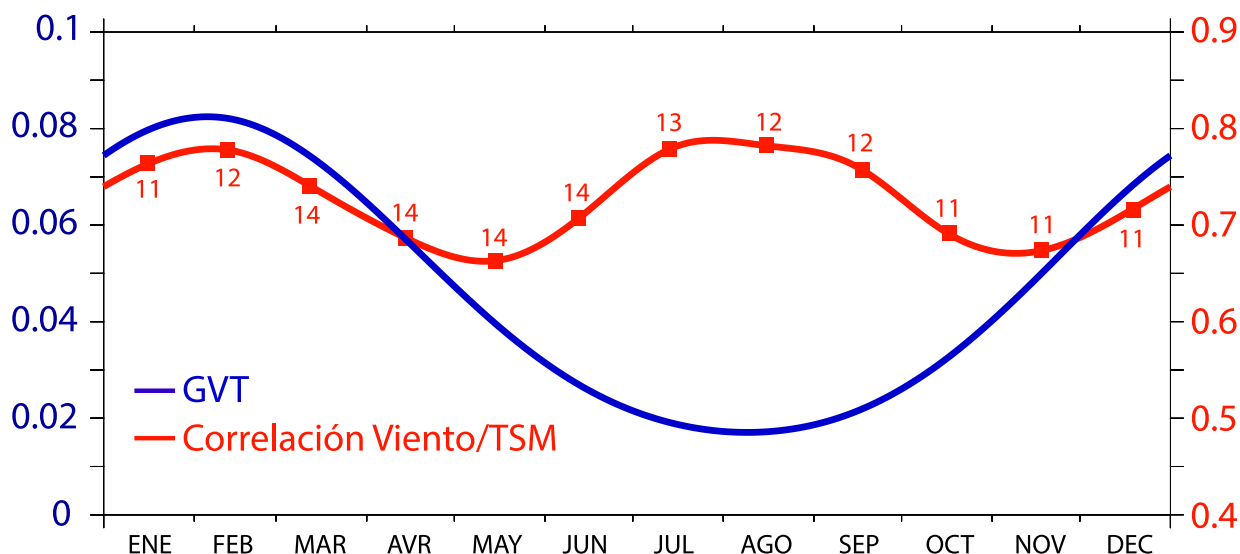


Figura 4. Curva azul (eje vertical a la izquierda): la climatología de la estratificación ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) calculada como el GVT entre la superficie y la profundidad de la base de la capa de mezcla, en la franja costera (5° de ancho, 7°S - 17°S). Fuente de datos: CARS (2009). Curva roja (eje vertical a la derecha): la climatología de la correlación máxima entre los componentes principales de la TSM y del viento filtrados entre 40 y 90 días. La correlación máxima es calculada teniendo en cuenta el desfase entre el viento y la TSM (números por encima de la curva, en días). Fuente de los datos y el periodo: como en la Figura 2.

Dewitte et al. (2011) (para la región del Perú) y Goubanova et al. (2013) (para la región de Angola-Namibia en el Atlántico Sur-Este) consideran un modelo conceptual simple. En este modelo se asume que las variaciones de la TSM dentro de la capa de mezcla oceánica son resultado de las variaciones en el afloramiento costero, o sea de la advección o transporte vertical de las aguas frías subsuperficiales. Esto, a su vez, es el resultado de las variaciones en la velocidad vertical actuando sobre la *estratificación* promedio, es decir, sobre el gradiente vertical de temperatura (GVT) promedio. Esto puede ser escrito matemáticamente como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\tilde{w} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

Donde $\frac{\partial T}{\partial t}$ es el cambio de la TSM, $\tilde{w}$ es la fluctuación intraestacional de la velocidad vertical y, por lo tanto, del afloramiento, y $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ es el GVT promedio, que puede variar según la estación.

De acuerdo con la dinámica del afloramiento, la velocidad vertical es proporcional a la anomalía del estrés del viento a lo largo de la costa $\tilde{\tau}$ y depende de las tres constantes: la densidad del agua de mar ρ , el parámetro de Coriolis f y la escala horizontal del afloramiento L_U :

$$\tilde{w} = \frac{\tilde{\tau}}{\rho f L_U}$$

Así, la ecuación (1) toma la forma siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\tilde{\tau}}{\rho f L_U} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

En tal formulación, la estratificación puede ser considerada como un coeficiente de la eficacia con la cual el viento puede modificar la TSM. La Figura 4 (curva azul) ilustra la variación estacional de la estratificación, la cual presenta un máximo en verano pero disminuye en invierno debido a la disminución de la radiación solar y al aumento del viento que profundiza la capa de mezcla en el océano. Así, el ciclo semi-anual de la relación entre el viento y la TSM a escala intraestacional refleja una “competencia” estacional entre la estratificación y la variabilidad del viento. De hecho, en verano la variabilidad del viento es débil (Figura 2b) pero su eficacia, en términos del impacto sobre la TSM, es fuerte debido al mayor GVT en esta estación. En invierno, el pequeño GVT es compensado parcialmente por la relativamente fuerte variabilidad del viento, pero sin generar tanta variabilidad en la TSM como en verano.

Papel de los flujos de calor

El mecanismo anterior fue confirmado con el modelo numérico regional para el mar peruano (Illig et al., 2014), el cual además permitió evaluar el papel de

otros procesos implicados en los cambios de la TSM a escala intraestacional, como flujos superficiales de calor (en particular del flujo latente debido a la evaporación) y la mezcla vertical. En particular, los flujos de calor contribuyen significativamente a los cambios de la TSM (~30%) y reducen el desfase entre el forzamiento de viento y la respuesta de la TSM a 11-13 días (Figura 4a), con respecto a los 15 días que se esperarían solo por la dinámica del afloramiento.

Discusión

Los resultados de los trabajos científicos mencionados en el presente artículo (Dewitte et al., 2011; Goubanova et al., 2013 y Illig et al., 2014) proporcionan material para interpretar la variabilidad intraestacional de la TSM en las regiones del afloramiento costero y pueden ser usados a fin de mejorar las estrategias de predicción del océano y del clima regional. El enfoque usado por el ENFEN en el Perú para el pronóstico a mediano plazo (hasta tres meses) de la temperatura en la costa se basa principalmente en el monitoreo de la actividad de las ondas ecuatoriales Kelvin intraestacionales (Mosquera, 2014). En el presente artículo se sugiere, basado sobre el análisis del periodo 2000-2008, que para el pronóstico de las condiciones del afloramiento a escala intraestacional se debe tomar en cuenta también el viento a lo largo de la costa. Un ejemplo de esto se observó en la segunda quincena de marzo del presente año 2015, en la que el ingreso de sistemas de bajas presiones debilitaron abruptamente los vientos alisios del sudeste, produciendo un calentamiento somero del mar (entre 10 y 20 m de la superficie) que produjo fuertes lluvias en la costa (ENFEN, 2015). Para esto, sin embargo, será necesario mejorar la predicción cuantitativa de los vientos costeros en escalas intraestacionales, lo cual es un desafío dada la naturaleza caótica de la atmósfera.

Recuadro1. Recordamos que la onda Kelvin se propaga de oeste a este a lo largo del ecuador. Una vez que ella alcanza la costa de América del Sur, parte de esta continúa su desplazamiento a lo largo de la costa de Perú hacia el sur. Las corrientes anómalas asociadas a la onda pueden provocar desplazamientos de las aguas cálidas ecuatoriales a lo largo de la costa peruana, como en el caso de El Niño 1997/98. Por otro lado, la acción de las ondas de profundizar, o elevar la termoclina, afecta el afloramiento costero produciendo un aumento o disminución de la TSM (Mosquera, 2014).

Referencias

Aguirre, C., R. D. Garreaud, et J. A. Rutllant 2014: Surface ocean response to synoptic-scale variability in wind stress and heat fluxes off south-central Chile, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 65, 64–85.

Clarke, A. J., 2008: *An Introduction to the Dynamics of El Niño & the Southern Oscillation*, Elsevier (Academic Press), ISBN: 978-0-12-088548-0.

Dewitte B., S. Illig, L. Renault, K. Goubanova, K. Takahashi, D. Gushchina, K. Mosquera, and S. Purca, 2011: Modes of covariability between Sea Surface Temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Peru from satellite observations (2000-2008), *Journal of Geophysical Research*, 116, C04028.

Dewitte, B., J. Vasquez-Cuervo, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, B. Giese, D. Gutierrez, A. Sifeddine, and L. Ortlieb, 2012: Change in El Niño flavours over 1958-2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, (77-80), 143-156.

ENFEN, 2015: Comunicado Oficial ENFEN 05-2015, 31 de marzo del 2015.

Goubanova, K., S. Illig, E. Machu, V. Garçon, and B. Dewitte, 2013: SST subseasonal variability in the Benguela upwelling system as inferred from satellite observations (2000-2008), *Journal of Geophysical Research*, 118(9): 4092-4110.

Hormazabal, S., G. Shaffer, J. Letelier, and O. Ulloa, 2001: Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile, *Journal of Geophysical Research*, 106: doi: 10.1029/2001JC900008. issn: 0148-0227.

Illig, S., B. Dewitte, K. Goubanova, G. Cambon, J. Boucharel, C. Romero, S. Purca, F. Monetti, 2014: Intraseasonal SST variability off Peru in 2000-2008: local versus remote forcings, *Journal of Geophysical Research*, Ocean, 119(6), 3548–3573.

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, 4-7, Enero, Instituto Geofísico del Perú.

Renault, L., B. Dewitte, M. Falvey, R. Garreaud, V. Echevin, and F. Bonjean, 2009: Impact of atmospheric coastal jets on SST off central Chile from satellite observations (2000-2007), *Journal of Geophysical Research*, 114, C08006.

Experimentos con el modelo oceánico lineal

Kobi Mosquera¹ y Berlín Segura¹

¹Instituto Geofísico del Perú

A fines de junio de 2015, un pulso de viento del oeste se presentó en el extremo occidental (ver Figura 1a), el que en los siguientes días se proyectó en el mar como una onda Kelvin cálida cuya señal en el Pacífico Central había alcanzado valores importantes (ver Figura 1b, c y d), incluso se podría decir que su magnitud en el nivel del mar (deducida de la señal del satélite JASON-2, ver Figura 1b) era superior a las observadas (hasta ese momento) en todo el desarrollo del fenómeno El Niño costero 2015, el cual se inició en abril. Curiosamente esta onda cálida, pronosticada para que llegue al extremo oriental entre fines de agosto e inicios de setiembre (ver Comunicado ENFEN No. 14-2015), se atenuó aproximadamente desde 100°W hasta la costa como consecuencia, tal vez, de la acción de las anomalías de viento del este y/o reflexión de estas ondas por la termoclina somera en esta región (ver Comunicado ENFEN No. 15-2015).

Mosquera et al., 2011; Mosquera, 2014). Los experimentos usaron como forzante los vientos calculados del *scatterometer* ASCAT (<ftp.ifremer.fr>), cuya ventaja principal es la de tener una buena resolución espacial a nivel global. Sin embargo, como parte de su desventaja, solo se cuenta con este tipo de información desde el año 2008. En consecuencia, la anomalía se calcula a partir de una climatología de siete años (2008-2014), periodo que se encuentra dentro de la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), la que se inició aproximadamente alrededor del año 1999. La anomalía de vientos de ASCAT, la cual cubre todo el dominio tropical, se separó en dos campos de datos: 1) vientos del oeste y 2) vientos del este. El primero (segundo) debe generar las ondas Kelvin cálidas (frías). A los resultados de ambos experimentos, es decir al nivel del mar y a las corrientes zonales, se les extrajo la señal de las ondas largas ecuatoriales (Boulanger y Menkes, 1995).

En la Figura 2 se puede apreciar, a lo largo de la línea ecuatorial, los datos observados y los resultados de los dos experimentos, entre la quincena de agosto de 2014 hasta la quincena de agosto de 2015. En (a) se grafica la anomalía de esfuerzo de viento zonal, cuyos valores positivos (negativos) indican vientos del oeste (este) y se colorean en tonos entre amarillo (celeste) y rojo (azul). En esta misma figura se nota que la anomalía de viento del oeste se hizo más intensa a partir de, aproximadamente, enero de 2015 y se concentró, en promedio, al este de 160°W. Por otro lado, las anomalías del este, la cuales se ven menos intensas que las anomalías del oeste, se concentraron al oeste de 160°W.

En la Figura 2b se ha graficado la anomalía del nivel del mar obtenida del altímetro JASON 2. El periodo usado como climatología va desde el año 2002 al 2014 (se usa JASON-1 para la climatología). Desde enero de 2015 se ve claramente la presencia de ondas Kelvin ecuatoriales cálidas, básicamente son tres ondas intensas que se formaron en la quincena de marzo, fines de mayo e inicios de julio. De estas tres ondas, las dos primeras logran llegar al extremo este con la misma intensidad con la que se aprecian en todo el Pacífico Ecuatorial, mientras que la tercera no lo hace.

En la Figura 2cdef se observan los resultados numéricos del modelo. La Figura 2c es la suma de los resultados de la simulación forzada con vientos del este y oeste, la cual incluye solo ondas Kelvin (primer modo meridional) y Rossby (segundo modo

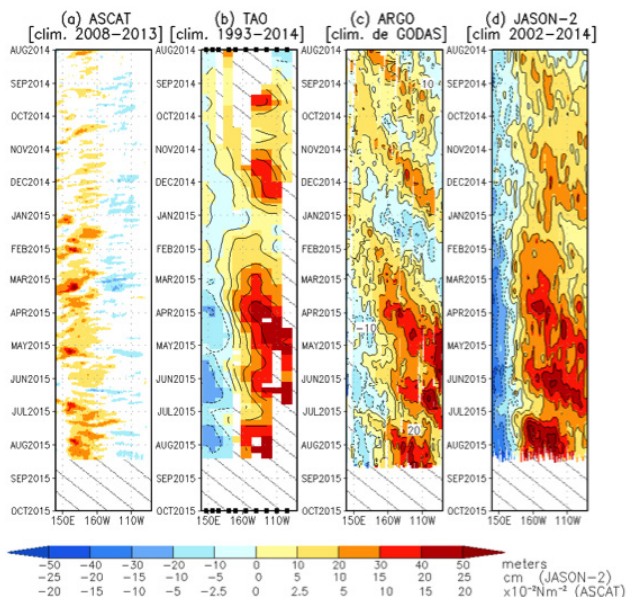


Figura 1. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Las líneas diagonales representan una propagación hacia el este con velocidad de 2.6 m/s. (Elaboración: IGP).

Para interpretar lo arriba mencionado, particularmente la influencia de la anomalía de los vientos del este, se procedió a elaborar dos experimentos numéricos con un modelo oceánico lineal (Mosquera, 2009;

meridional). Aquí se puede apreciar que los resultados numéricos son similares a lo observado (Figura 2b) y principalmente desde enero de 2015. Esto es un indicador que en dicho periodo la dinámica del nivel del mar en la zona ecuatorial tiene un comportamiento aproximadamente del tipo lineal, quizás se deba a que la termoclina ha estado menos inclinada de lo habitual. En la Figura 2d solamente se muestra la señal de la onda Kelvin, en donde se observa, indirectamente, que existe contribución de la onda Rossby (en el “mundo” del modelo), principalmente, en el Pacífico Central y Oriental. El modelo reproduce las tres ondas cálidas, tal como lo observado en el nivel del mar, que incluye la atenuación de la última onda. La Figura 2e (2f) presenta los resultados numéricos usando solo anomalías de viento del oeste (este).

centímetros al este de 120°W. La presencia de estas ondas Kelvin frías debe estar contribuyendo a que las ondas Kelvin formadas en el Pacífico Central – Occidental no lleguen con la intensidad original y a que, en el caso de la última (tercera) onda Kelvin, esta se vea muy atenuada (Figura 2b y c). Asimismo, de haber una onda Rossby reflejada en el continente o forzada por el viento, esta debe contribuir en el incremento del nivel del mar en la zona ecuatorial. Esto amerita un estudio más profundo y, además, con mayor información observacional.

Los resultados presentados en este documento son preliminares y se basan en una interpretación utilizando las ondas largas ecuatoriales, principalmente ondas Kelvin y Rossby, en un océano ideal. Esta interpretación ayudará a “ver” parte de lo que está sucediendo en el Pacífico Ecuatorial y que no permite que el fenómeno El Niño se desarrolle completamente en el extremo oriental. Más adelante se espera continuar con otros experimentos simples que permitan interpretar parte de la dinámica del Pacífico Ecuatorial.

Referencias

Boulanger, J.-P., and C. Menkes, 1995: Propagation and reflection of long equatorial waves in the Pacific Ocean during the 1992–1993 El Niño, *Journal of Geophysical Research*, 100(C12), 25041–25059.

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 Magister en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

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*, Lima, Año 5, N°9, julio-diciembre de 2010, p. 55.

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, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.

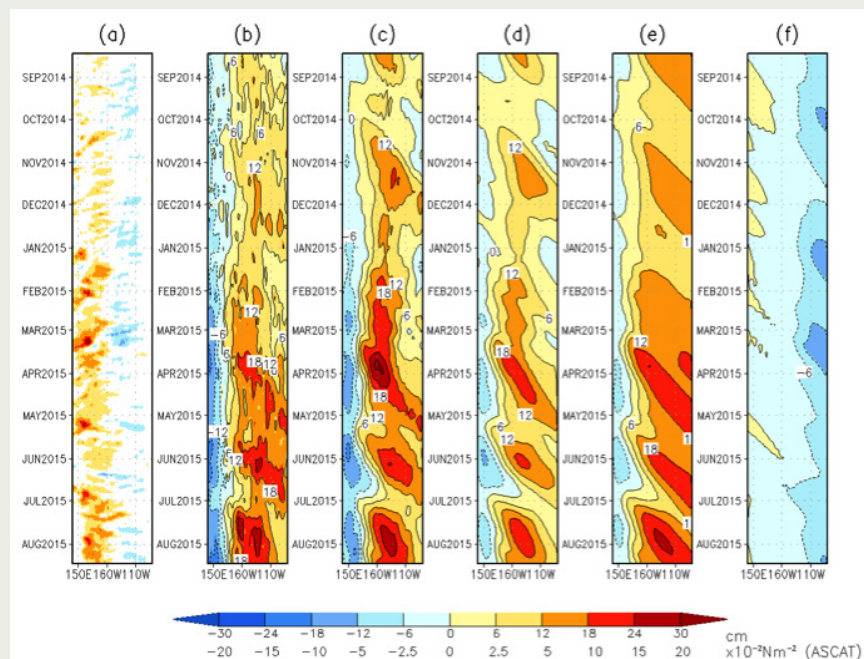


Figura 2. Diagramas longitud versus tiempo de la anomalía del (a) esfuerzo de viento zonal calculado del scatterometer ASCAT y (b) nivel del mar obtenido del altímetro JASON 1 y 2. Los otros gráficos representan el nivel del mar de las simulaciones numéricas con el modelo oceánico lineal forzado con ASCAT, en donde: (c) es la suma de la señal de la onda Kelvin y Rossby en el nivel del mar, (d) es la señal de la onda Kelvin, (e) es la señal de la onda Kelvin producto del uso de anomalías positivas del esfuerzo de viento, mientras que (f) es lo mismo que (e) pero para anomalías negativas de esfuerzo de viento.

Como se indicó líneas arriba, los vientos del oeste se deben proyectar en ondas Kelvin cálidas y, como se ve en la Figura 2e, estas deben desplazarse sin atenuación hacia el extremo oriental. Por otro lado, los resultados de forzar el modelo con anomalías de viento del este provocan ondas Kelvin frías de hasta doce centímetros, las que se dieron en octubre de 2014, enero y marzo de 2015. En promedio, lo que primó fueron las anomalías negativas de hasta seis

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2015-9

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), las condiciones climáticas de la costa peruana fueron cálidas fuertes (2.15°C) para el mes de agosto, manteniéndose la presencia de El Niño Costero, el cual ha alcanzado una magnitud de cálida fuerte. El valor preliminar del ICEN para los meses de setiembre y octubre 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 setiembre, indica en promedio que los estados climáticos se ubicarían en el rango de fuertes, tanto en noviembre como en diciembre. Estos mismos resultados numéricos predicen que para el Pacífico Central las condiciones serían cálidas muy fuertes en esos meses.

En la segunda quincena de setiembre se desarrolló una anomalía de viento del oeste entre 160°E y 160°W , aproximadamente, la que se ha proyectado como onda cálida Kelvin en el nivel del mar y en la termoclina. La presencia de anomalías de vientos entre 180 y 140°W , que se ha presentado a fines de setiembre e inicio de octubre, podría fortalecer esta onda, la cual debe arribar al extremo oriental del Pacífico en el mes 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 setiembre de 2015 del producto ERSST v3b, los cuales fueron 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 agosto de 2015. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN ($^{\circ}\text{C}$)	Condiciones costeras del mes
2015	Mayo	1.36	Cálida Moderada
2015	Junio	1.96	Cálida Fuerte
2015	Julio	2.15	Cálida Fuerte
2015	Agosto	2.15	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 agosto 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). **Por lo tanto, actualmente se está desarrollando EL NIÑO COSTERO que, con la información del ICEN de agosto, ha alcanzado una MAGNITUD FUERTE** (ver Tabla 1).

Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

El Pacífico Ecuatorial muestra un claro desarrollo del fenómeno El Niño. En el mes de setiembre, el Pacífico Central Ecuatorial continúa mostrando un acoplamiento del océano y atmósfera de gran escala pero con menor intensidad en comparación con los meses anteriores. Las ATSM en la región Niño 3.4 son similares a las de 1997, mientras que en la región Niño 3 estas se encuentran ligeramente por debajo de 1997 pero sobre 1982. En la región Niño 1+2 la ATSM está bastante por debajo de 1997, pero sobre 1972 y 1982. 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. Finalmente, la convección en el Pacífico Central-Oriental sigue activa pero con una tendencia decreciente, llegando por debajo del nivel de 82 y 97. En resumen, a pesar de que en agosto el viento del oeste en el Pacífico Central excedió el umbral para El Niño extraordinario, la termoclina en el Pacífico Oriental (110°W , 95°W) no muestra señal de una fuerte profundización como en 1982 o 1997. Posiblemente la fase fría en el Pacífico (vientos alisios del SE fuertes) ha impedido que esto ocurra.

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 03 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).

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 por un pulso de viento del oeste alrededor de la línea internacional de cambio de fecha en la primera semana de setiembre, no ha sido observada en los datos. El modelo de onda, forzado con vientos calculados de ASCAT, indica que, al parecer, esta onda no ha sido intensa como las dos anteriores. En la segunda quincena de setiembre se desarrolló otra anomalía de vientos del oeste entre 160°E y 160°W , aproximadamente, la que se ha proyectado en una onda Kelvin cálida como lo muestra el modelo lineal (Figura

Resumen del Informe Técnico

PPR/EI Niño - IGP/ 2015-9

1e), el cual fue forzado con ASCAT. A la fecha, los datos observacionales *in situ* (ARGO) y remotos (JASON-2) muestran el inicio de la señal de la onda en la profundidad de la termoclina y en el nivel del mar, respectivamente. La presencia de anomalías de viento del oeste entre la línea de cambio de fecha y 140°W que se han presentado a fines de setiembre e inicios de octubre, podrían fortalecer esta onda cálida. Esta última debería arribar al extremo oriental del Pacífico en el mes de noviembre y contribuiría en mantener, e incluso incrementar, si es fortalecida por los vientos del oeste, el actual calentamiento en la costa peruana.

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para el mes de noviembre, los pronósticos de la anomalía de la TSM en el Pacífico Oriental (Niño 1+2, ICEN) indican condiciones, principalmente, cálidas fuertes (5 de 8 modelos) y condiciones moderadas (3 de 8 modelos). Para el verano (diciembre 2015-marzo 2016), 1 de 7 modelos indican condiciones fuertes y 7 de 8 modelos condiciones moderadas (Figura 2). Por otro lado, en el Pacífico Central (Niño 3.4) los modelos indican que las condiciones estarán en el rango de cálidas muy fuerte para los meses de noviembre y diciembre; las condiciones cálidas muy fuerte continuarían para los trimestre Octubre-Noviembre-Diciembre y Enero-Febrero-Marzo 2016.

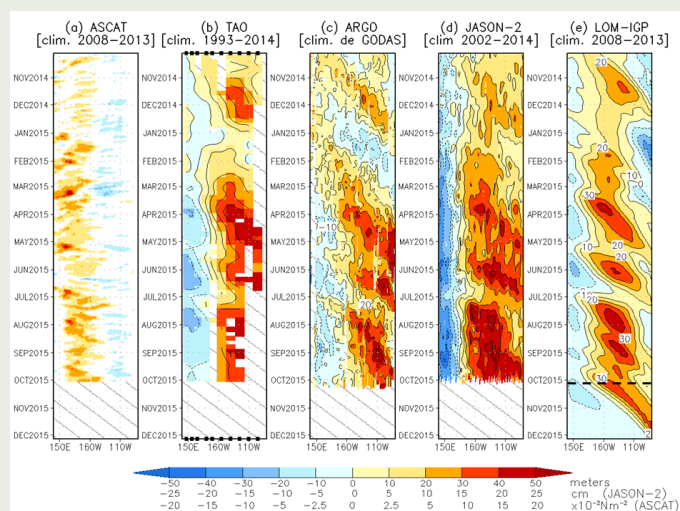


Figura 1. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Finalmente en (e) se muestra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

Modelo	Inicio	Extremo	Final	Magnitud
CFS2	abr-15	ago-15	No disponible	Moderado
CMC1	abr-15	ago-15	No disponible	Moderado
CMC2	abr-15	feb-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_CCISM4	abr-15	nov-15	No disponible	Fuerte
NMME(prom)	abr-15	dic-15	No disponible	Fuerte
ECMWF	abr-15	oct-15	No disponible	Moderado
OBSERVADO	abr-15	jul-15	No disponible	Moderado

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

Conclusiones:

1. El ICEN para agosto de 2015 fue de 2.15 (cálida fuerte), lo que indica que El Niño costero que se inició en el mes de abril ha alcanzado la magnitud de fuerte.

2. El desarrollo de la onda Kelvin cálida, que se formó por un pulso de viento del oeste alrededor de la línea internacional del cambio de fecha en la primera semana de setiembre, no ha sido claro en los datos observacionales (*in situ* y remotos). El modelo de ondas, forzado con vientos calculados de ASCAT, indica que no ha sido tan intensa como las dos anteriores.

3. En la segunda quincena de setiembre se desarrolló otra anomalía de vientos del oeste entre 160°E y 160°W, aproximadamente, la que se ha proyectado en una onda Kelvin cálida como lo muestra el modelo lineal, el cual fue forzado con ASCAT. A la fecha, los datos observacionales *in situ* (ARGO) y remotos (JASON-2) muestran el inicio de la señal de la onda en la profundidad de la termoclina y en el nivel del mar, respectivamente. La presencia de anomalías de viento del oeste entre la línea de cambio de fecha y 140°W, que se han presentado a fines de setiembre e inicios de octubre, podría fortalecer esta onda cálida. Esta última debe arribar al extremo oriental del Pacífico en el mes de noviembre y contribuiría en mantener, e incluso incrementar, si es fortalecida por los vientos del oeste, el actual calentamiento en la costa peruana.

4. Para el Pacífico Oriental (Niño 1+2), la mayoría de modelos (5 de 8) inicializados en setiembre indican que El Niño costero en marcha tendría magnitud fuerte (3 de 8 indica moderado). El pico habría sido en julio. Para el verano 2015-2016, todos los modelos predicen menores anomalías de TSM (condiciones moderadas 7 de 8 modelos y condición fuerte 1 de 8 modelos). Sin embargo, se conoce que los modelos tienden a subestimar las anomalías positivas en esta región, particularmente las asociadas a El Niño extraordinario.

5. Para el Pacífico Central (Niño 3.4), todos los modelos que han sido considerados, y que fueron inicializados en setiembre, indican que El Niño alcanzaría una magnitud muy fuerte hasta fines de 2015 para luego decaer a lo largo de los primeros meses de 2016.

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2015-9

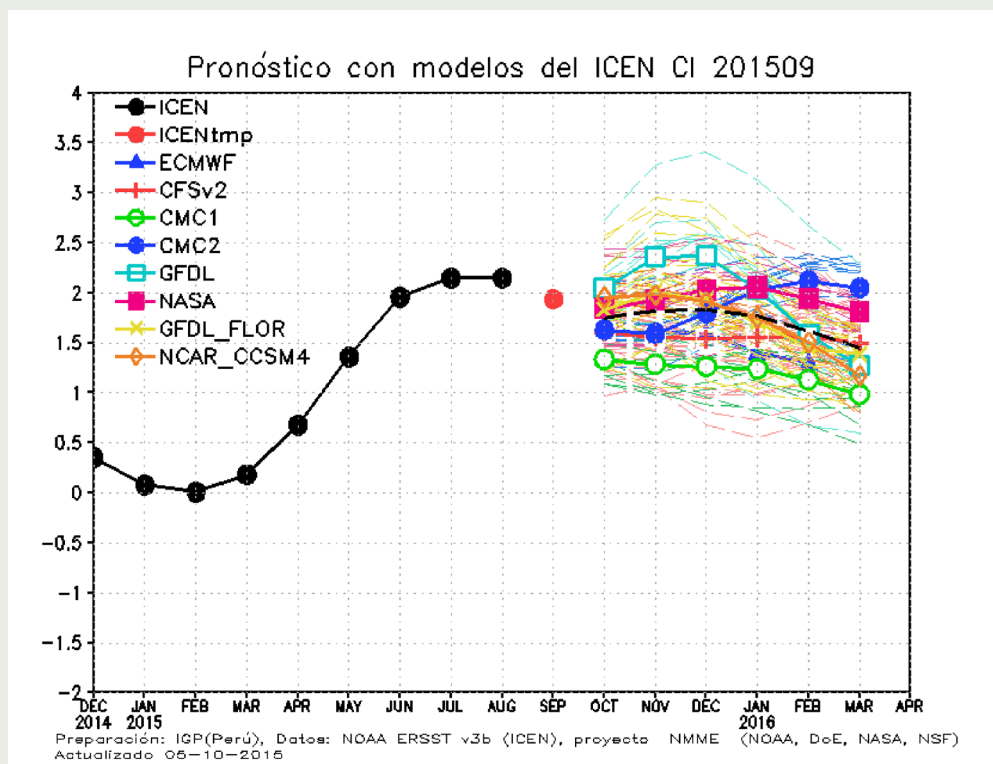


Figura 2. Índice Costero El Niño (ICEN, negro con círculos llenos) y su valor temporal (ICENTmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de tres meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Las líneas entrecortadas corresponden 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 setiembre de 2015. El modelo ECMWF tiene como condición inicial el mes de setiembre 2015. (Fuente: IGP, NOAA, proyecto NMME, ECMWF).

6. En el mes de setiembre, el Pacífico Central Ecuatorial continúa mostrando un acoplamiento del océano y atmósfera de gran escala pero con menor intensidad.

7. 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.

8. La convección en el Pacífico Central-Oriental sigue activa pero con una tendencia decreciente, llegando por debajo del nivel de 82 y 97.

9. A pesar de que en **agosto** el viento del oeste en el Pacífico Central excedió el umbral para El Niño extraordinario, la termoclina en el Pacífico Oriental (110W, 95W) no muestra señal de una fuerte profundización como en 1982 o 1997. Posiblemente esto esté asociado a la continuación de la fase fría en el Pacífico (vientos alisios del SE fuertes).

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. Tippet, 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. y 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.

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 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.

Comunicado Oficial ENFEN

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



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 16 - 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 a que las condiciones actuales continúan consistentes con un evento cálido de magnitud fuerte, sin presencia de lluvias intensas pero con temperaturas en la costa sobre lo normal.

Se mantiene el 55% de probabilidad de que el evento El Niño Costero presente magnitudes similares a las registradas durante los veranos de 1982-1983 o 1997-1998.

El Comité Multisectorial 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 setiembre.

En el Pacífico central ecuatorial continúa el acoplamiento del océano y atmósfera de gran escala. Las anomalías de viento zonal del oeste continúan entre 160°E y 160°W, mientras que las anomalías de viento del este en el Pacífico oriental han disminuido. La Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la región Niño 3.4 muestra una evolución similar a la de El Niño 1997/1998, aunque la convección en el Pacífico central ecuatorial se ha reducido desde mediados de agosto, pasando de una magnitud similar a la del evento extraordinario El Niño 1997/1998 a la de 1982/1983. Todo lo anterior es consistente con la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur. La onda Kelvin cálida formada por un pulso de viento del oeste a fines de julio entre 160°E y la línea de cambio de fecha, y que se fortaleció como consecuencia de las anomalías de viento del oeste en el Pacífico central, presentó anomalías positivas en la profundidad de la termoclina y en el Nivel Medio del Mar (NMM) en el extremo oriental, al este de 95°W. Esto es indicador que esta onda cálida no estaría atenuada como en los dos últimos meses. En la primera semana de setiembre, se desarrolló un nuevo pulso de viento del oeste alrededor de la línea internacional del cambio de fecha que estaría formando una nueva onda Kelvin cálida, su evolución será más clara en las siguientes semanas.

En la zona costera del Perú, el promedio de las anomalías de la TSM, en la primera quincena de setiembre fue +2°C en la costa norte y centro. A lo largo del litoral, las temperaturas del aire continuaron por encima de lo normal con anomalías promedio de +1,8°C para la temperatura mínima del aire y de +2,3°C para la temperatura máxima del aire. Como se indicó en el comunicado anterior, el valor del Índice Costero El Niño (ICEN) para julio es de 2,15°C, correspondiente a condiciones fuertes.

El NMM estuvo, en promedio, en la costa norte, alrededor de +10 cm por encima de lo normal, mientras que en la zona sur, las anomalías aumentaron, en promedio, 4 cm con respecto al mes de agosto. Estas anomalías estarían asociadas a la llegada de la onda Kelvin cálida esperada para agosto-setiembre. Con respecto a la estación fija de Paita, se observaron anomalías de alrededor de 2°C hasta los 100 m de profundidad disminuyendo levemente al término de la quincena.

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 76% y 64% de su capacidad máxima, respectivamente.

La anchoveta se distribuyó frente a Chimbote y Pisco dentro de las 10 millas náuticas de la costa, ligeramente profundizada frente a Chimbote. Los indicadores de la biología de la anchoveta, tal como la fracción desovante se mantiene muy por debajo del patrón, similar al mes de agosto, excepto el índice gonadosomático que presentó un comportamiento similar al patrón. Por otro lado, la anchoveta continúa madurando, pero el desove no se está desarrollando con la intensidad propia de esta época. Continúa la presencia de especies oceánicas propias de aguas cálidas frente a la costa central tales como *Sarda chiliensis* "bonito", *Katsuwonus pelamis* "barrilete" y *Decapterus macrosoma* "jurel fino".

PERSPECTIVAS

En los siguientes meses, a lo largo de la costa peruana, se espera que continúen las anomalías positivas de la TSM, 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 a fines de julio llegue a la costa peruana a fines de setiembre e inicios de octubre y contribuiría a mantener el calentamiento actual e incluso podría incrementarlo.

Conforme ingresemos a la temporada de lluvias, El Niño Costero, según su magnitud, intensificará las lluvias en la vertiente del Pacífico dependiendo de las características estacionales hidrológicas de cada región. Si bien El Niño tendrá mayor influencia sobre las lluvias en la costa norte, existe fuerte heterogeneidad de su impacto en cada región.

Para el Pacífico 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 alcance una magnitud fuerte o superior en el verano (Tabla 2).

Para las precipitaciones en los Andes y la Amazonía, 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 de la Nota Técnica Enfen N°02-2015, se mantiene la probabilidad de 95% que El Niño Costero continúe hacia el verano y el 55% de probabilidad que El Niño alcance la magnitud de fuerte o extraordinaria este verano. 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, 17 de setiembre de 2015

Tabla 1. Probabilidades de las magnitudes de El Niño Costero en el verano 2015-2016 (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	10%
El Niño costero moderado	30%
El Niño costero fuerte	35%
El Niño costero extraordinario	20%

Fuente: Nota Técnica ENFEN N° 02-2015

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

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%

Fuente: Nota Técnica ENFEN N° 02-2015

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 N°01-2015).



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



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 17 - 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 en la costa pero, dada la estacionalidad, no se esperan lluvias intensas.

La actualización de las probabilidades de magnitud del evento El Niño Costero para el verano 2015-2016 se mantiene en un 55% de probabilidad de que sea fuerte o extraordinario.

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 setiembre.

En el mes de setiembre, el Pacífico central ecuatorial continúa mostrando evidencias del desarrollo de un evento El Niño. La magnitud de la anomalía de viento del oeste (160°E - 160°W ; 5°S - 5°N) continúa por encima del año 82 pero por debajo de la del 97. La Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la región del Pacífico ecuatorial central continúa mostrando una evolución similar a la de El Niño 1997/1998, aunque la actividad convectiva en la región ecuatorial central-oriental se ha reducido, incluso por debajo del año 82. A pesar de esto, aún se continúa en la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur.

El desarrollo de la onda Kelvin cálida, que se formó por un pulso de viento del oeste alrededor de la longitud 180° en la primera semana de setiembre, y que fue informada en el Comunicado anterior, no fue tan intensa como las dos anteriores. En la segunda quincena de setiembre se presentó otra anomalía de vientos del oeste entre 160°E y 160°W , aproximadamente, forzando otra onda Kelvin cálida. A la fecha, los datos observacionales (perfiladores ARGO) y satelitales (JASON-2) muestran el impacto de la onda en la profundización de la termoclina y en el incremento del Nivel Medio del Mar (NMM), respectivamente. La presencia de anomalías de vientos del oeste entre 180° y 140°W , que se han presentado a fines de setiembre e inicios de octubre, podrían fortalecer esta onda cálida.

En la zona costera del Perú, el promedio de las anomalías de la TSM fue $+2,5^{\circ}\text{C}$ 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 $+2^{\circ}\text{C}$ para la temperatura mínima y de $+2,8^{\circ}\text{C}$ para la temperatura máxima.

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. En consecuencia, operativamente, El Niño Costero que se inició en el mes de abril, ha alcanzado la magnitud Fuerte, pero debido a la estacionalidad, no se produjeron lluvias.

El NMM en el litoral norte alcanzó, en promedio, $+16\text{ cm}$ por encima de lo normal, mientras que en el litoral centro y sur, las anomalías fueron, en promedio, $+11\text{ cm}$. En la estación fija Paíta, localizada a siete millas náuticas de la costa, las anomalías alcanzaron $+3^{\circ}\text{C}$ en los primeros 80 metros de profundidad en la última quincena de setiembre. Estas anomalías están asociadas a la llegada de la onda Kelvin cálida a la costa peruana en la tercera semana de setiembre.

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 66% y 53% de su capacidad máxima, respectivamente.

La anchoveta se distribuyó frente a Chimbote y Pisco dentro de las 10 millas náuticas de la costa, ligeramente profundizada frente a Chimbote. El comportamiento de los índices reproductivos mostraron que la anchoveta se encuentra madurando y desovando con

valores dentro de su pico de desove, aunque con un retraso en el inicio del periodo de desove. Por otro lado, continúa la presencia de especies oceánicas, propias de aguas cálidas, frente a la costa norte y centro, tales como *Sarda chiliensis* "bonito", *Katsuwonus pelamis* "barilete" y *Decapтерus macrosoma* "jurel fino".

PERSPECTIVAS

En los siguientes meses, a lo largo de la costa peruana, se espera que continúen las anomalías positivas de la TSM, 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 en la segunda quincena de setiembre llegue a la costa peruana en el mes de noviembre y contribuiría a mantener el calentamiento actual e incluso podría incrementarlo.

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.

Para el Pacífico 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 $+2^{\circ}\text{C}$.

El Comité ha actualizado las probabilidades de la magnitud del Fenómeno El Niño para el verano 2015-2016 y concluye a la fecha que, para el Pacífico central existe un 80% de probabilidad de que sea de magnitud Fuerte a Muy Fuerte, debido a que la anomalía de la TSM mantiene una tendencia ascendente en el Pacífico ecuatorial central (ver Tabla 2).

Para las precipitaciones en los Andes y la Amazonía, El Niño en el Pacífico central implica la posibilidad de la reducción de las lluvias en el verano, sin ser determinante, especialmente en la zona sur. De acuerdo a la Tabla 1, se mantiene la probabilidad³ de 55% que El Niño Costero alcance una magnitud Fuerte o Extraordinaria, aunque la probabilidad de que sea extraordinario ha disminuido ligeramente y que sea fuerte ha aumentado en la misma proporción, lo que se sustenta principalmente en la persistencia de vientos del Sureste que estarían atenuando la intensidad de la llegada de las ondas Kelvin.

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, 06 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-marzo2016	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 – marzo 2016)

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	10%
El Niño fuerte en el Pacífico Central	45%
El Niño muy fuerte en el Pacífico Central	35%

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).

²Línea internacional de cambio de fecha.

³La metodología y consideraciones para la estimación de las probabilidades se encuentra en la Nota Técnica N°02-2015 "Pronóstico probabilístico de la magnitud de El Niño Costero en el verano 2015-2016" (http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_comenf_not_tecni02_enfen_ver2016.pdf).





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

En el marco del:

