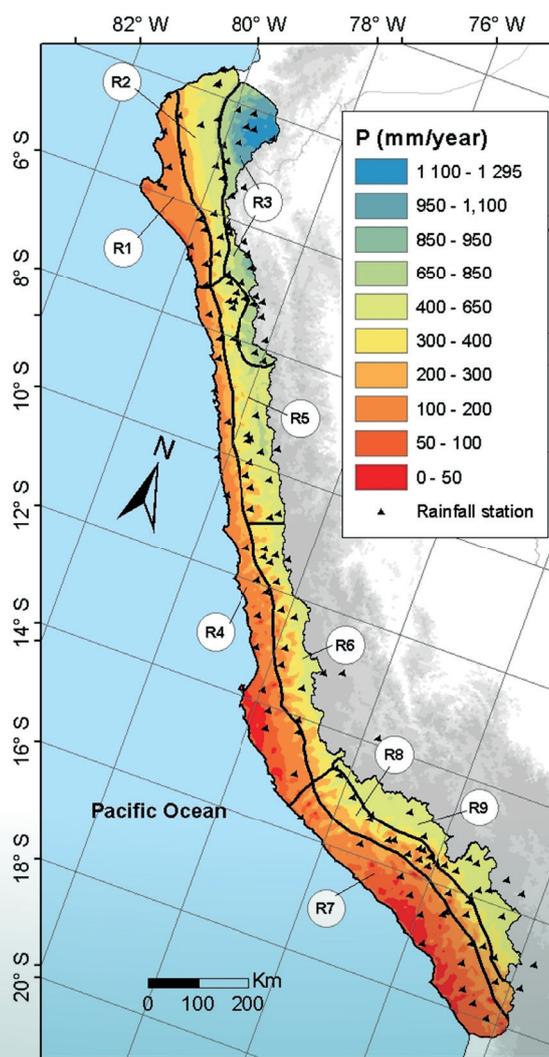


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

## “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

### Sobre la distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño



# Contenido

**2 - 3** Introducción

**4 - 7** Artículo de Divulgación Científica

**8 - 9** Avances Científicos

**10 - 12** Resumen Informe Técnico

**13 - 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”.

**Elsa Galarza Contreras**  
Ministra del Ambiente

**Hernando Tavera**  
Presidente Ejecutivo (e) IGP

**Edmundo Norabuena**  
Director Científico (e) IGP

**Ken Takahashi**  
Responsable Producto El Niño - IGP

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

Edición: Katherine Morón  
Diseño y Diagramación: Dante Guerra

Carátula: Rau, 2017

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

Impreso por:  
Presse SAC.  
Telf.: (+511) 433 0154  
Av. General Varela 2030,  
Pueblo Libre.

Lima, Febrero del 2017

Hecho el Depósito Legal en la  
Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-02860

# 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](http://www.igp.gob.pe/sysppr).



# IGP



# ENFEN

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

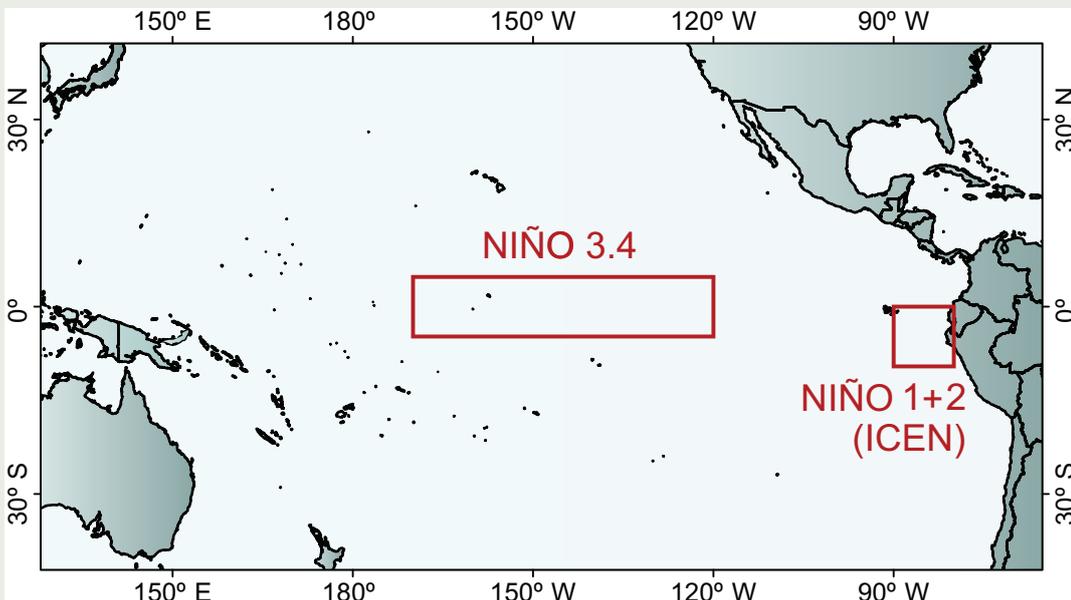
El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), conformado por representantes de IMARPE, DHN, IGP, SENAMHI, ANA e Indeci, es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.

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

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

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

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



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

## La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

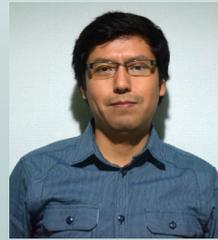
### Introducción

En 1892, se difundió la primera observación documentada de la corriente costera “El Niño”, denominada por aquel entonces: “Contracorriente marítima en Paita y Pacasmayo” (Carranza, 1892) y donde se intentaba explicar las lluvias torrenciales acaecidas en 1891. Un siglo y cuarto después, aun continúa el reto de poder comprender el efecto de este fenómeno sobre las lluvias a diferentes escalas de espacio y tiempo, especialmente en regiones del planeta como la Vertiente del Pacífico Peruano (VPP), donde sus efectos son experimentados frecuentemente. En el presente artículo se responde a preguntas comunes sobre la distribución de las lluvias en la VPP y el impacto del Fenómeno El Niño o ENSO (El Niño Oscilación del Sur en inglés), basándose en una revisión del estado del arte en la temática, las metodologías y los nuevos aportes.

### ¿Cómo se distribuyen las lluvias en la VPP?

El estudio del régimen de la precipitación siempre ha estado ligado a los registros de medición *in-situ*, efectuados en el Perú por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La medición *in-situ* se considera como una fuente confiable bajo condiciones geográficas óptimas y/o con una densa red de estaciones. Aunque las estaciones de medición generalmente no se ubican en las zonas más representativas de un valle interandino, es válido el empleo de técnicas de regionalización para la identificación de zonas aproximadamente homogéneas que engloben variables en zonas sin medición y cuyas series de tiempo asociadas, ofrecen una señal más limpia para el estudio del ENSO (sin influencia de patrones de circulación a nivel de estación).

A nivel interanual, un primer trabajo de regionalización en la VPP (Rau et al., 2017) para el periodo 1964-2011 consistió en un procedimiento iterativo a dos etapas, empleando dos métodos clásicos: la clusterización particional k-means (Hartigan y Wong, 1979) con su evaluación por perfiles; y el vector regional (Brunet-Moret, 1979) con su evaluación por índices estadísticos. Esta



**Pedro Rau, M.Sc**  
Laboratorio Géosciences Environnement  
Toulouse (GET, Francia)

*Candidato a doctor en Hidrología de la Université Toulouse III Paul Sabatier (Francia). Magister en ciencias en Hidrología y Medio Ambiente del Institut National Polytechnique de Toulouse (Francia), en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Perú) e Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Es autor de artículos publicados en revistas arbitradas y su principal interés de investigación es la hidroclimatología de la vertiente del Pacífico peruano y la hidrología de zonas áridas y semi-áridas.*

#### Luc Bourrel, Ph.D.

*Investigador del Institut de Recherche pour le Développement  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse*

#### Boris Dewitte, Ph.D.

*Investigador del Institut de Recherche pour le Développement  
Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie  
Spatiales*

#### David Labat, Ph.D.

*Professor de la Université Toulouse III Paul Sabatier  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse*

combinación hizo posible asimilar el comportamiento no-estacionario y no-Gausiano de las series de precipitación en las 145 estaciones analizadas. La Figura 1 muestra esta distribución en 9 regiones marcadas por un gradiente latitudinal y altitudinal, así como sus series interanuales. Estas regiones también representan a 9 zonas climáticamente homogéneas. Cabe señalar, que se aprecia una tendencia temporal ascendente para las zonas altas del norte (R3 y R5), siendo significativa para R5 con un incremento anual de ~30 mm/década.

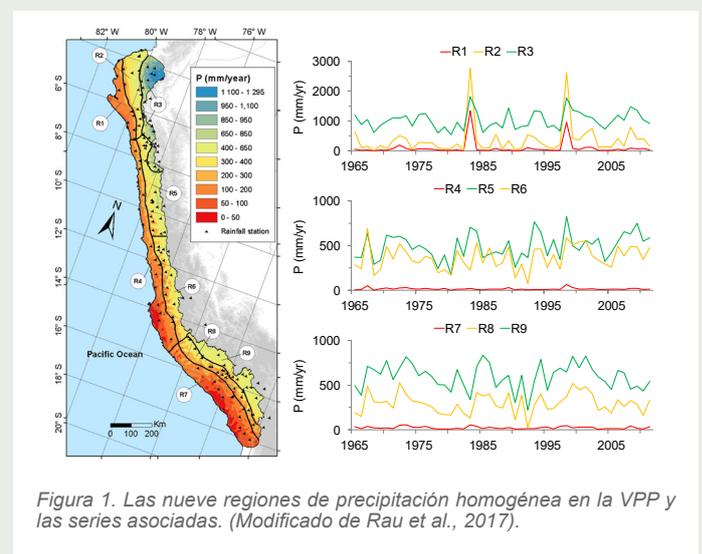


Figura 1. Las nueve regiones de precipitación homogénea en la VPP y las series asociadas. (Modificado de Rau et al., 2017).

# La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

Pedro R., Luc B., Boris D., David L.

## El niño y las lluvias ¿hacia un efecto oscilante y cambiante?

El efecto del ENSO sobre las lluvias en la VPP generalmente ha estado asociado a fuertes eventos que modifican las condiciones áridas, semi-áridas de la región (Woodman y Takahashi, 2014) y en especial asociado a los dos eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998 de consecuencias desastrosas debido a las inundaciones y sequías. Actualmente, se tiene documentado dos tipos de eventos El Niño: El Niño del Pacífico Este que corresponde a fuertes anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial Oriental (El Niño EP, interpretado por el índice E) y El Niño del Pacífico Central (Niño Modoki) que corresponde a anomalías cálidas de la TSM en el Pacífico ecuatorial Central (El Niño CP, interpretado por el índice C como la variabilidad de eventos moderados o La Niña) (ver Ashok et al., 2007; Takahashi et al., 2011). Los índices E y C presentan similitudes a los índices clásicos NIÑO 1+2 (90°-80°W, 10°S-0°) y NIÑO 4 (160°E-150°W, 5°S-5°N) respectivamente en su relación con las lluvias (Bourrel et al., 2015).

Los estudios que intentan explicar la relación ENSO/lluvia en la VPP se listan a continuación: Horel y Cornejo-Garrido (1986), Goldberg et al. (1987), Tapley y Waylen (1990), Takahashi (2004), Lagos et al. (2008), Lavado et al. (2012), Lavado y Espinoza (2014), Bourrel et al. (2015), Segura et al. (2016), Rau et al. (2017), los cuales podrían clasificarse en dos enfoques: el enfoque físico, orientado a revelar el proceso océano-atmosfera-continente de la relación ENSO/lluvia; y el enfoque de impactos, orientado a revelar la evolución de la relación ENSO/lluvia. Un enfoque mixto va entrando en escena (Sanabria et al., 2015; Segura et al., 2016), el cual permite complementar la temática de pronóstico, así como se desarrolla en países de la región como Ecuador (Recalde-Coronel et al., 2014; Pineda y Willems, 2016; Vicente-Serrano et al., 2016; de Guenni et al., 2016).

Los estudios con el enfoque de impactos revelan dos aportes principales: a) la periodicidad decenal de las lluvias y de la relación ENSO/lluvia, b) el grado de influencia de la variabilidad del océano Pacífico y la inversión de la relación ENSO/lluvia en las últimas décadas.

La periodicidad puede ser estudiada con el método de las ondeletas (ver Labat, 2005 para una explicación completa, ver Bourrel et al., 2015 para su aplicabilidad en la relación ENSO/lluvia, ver Sivakumar, 2017 para un repaso de métodos modernos aplicables a series de tiempo no lineales), la cual reveló que las regiones de lluvia en la VPP presentan una frecuencia quasi-decenal (entre 8 y 16 años de frecuencia), así como su relación con los índices E y C, corroborando la variación de baja frecuencia del ENSO y lluvias (Rau et al., 2016).

Sobre el grado de influencia de la variabilidad del océano Pacífico, la VPP presenta una mayor significancia en el superávit de lluvia en las regiones bajas del norte y su relación con El Niño EP (con un 66% de covarianza y un coeficiente de correlación de 0.6); y de déficit de lluvia en las regiones altas con El Niño CP (con una covarianza del 23% y un coeficiente de correlación de 0.5), asimismo sin encontrar una relación directa con la TSM del Atlántico (Rau et al., 2017). Sin embargo, si durante las últimas décadas El Niño CP se presenta cada vez más frecuente con respecto a El Niño EP (Lee y McPhaden, 2010) ¿Cómo explicar la tendencia ascendente de lluvia en algunas regiones de la VPP mostrado en la Figura 1?

Remitiéndose al estudio de Bourrel et al. (2015) que abarcó una parte de la VPP (de Tumbes a Ica), mostraron un cambio notorio de la relación ENSO/lluvia a partir de la década del 2000. Este cambio se observa en la Figura 2, considerando las regiones de la Figura 1. La relación directa entre el índice E (para el periodo Septiembre a Febrero) y las lluvias anuales (Figura 2a) es significativa (correlaciones móviles en coloración rojo) debido a los Niños extremos de 1982/1983 y 1997/1998. También, se aprecia una relación inversa (correlaciones móviles en coloración azul) para las regiones del sur durante el evento de 1982/1983 y que resulta interesante notar su influencia para las regiones del norte en las últimas décadas. A partir del 2000, este cambio se aprecia mejor sin incluir los eventos extremos para ambos índices E y C (Figura 2b y 2c). Las correlaciones E/lluvia y C/lluvia siguen una tendencia negativa más acentuada en las regiones del norte y sur respectivamente.

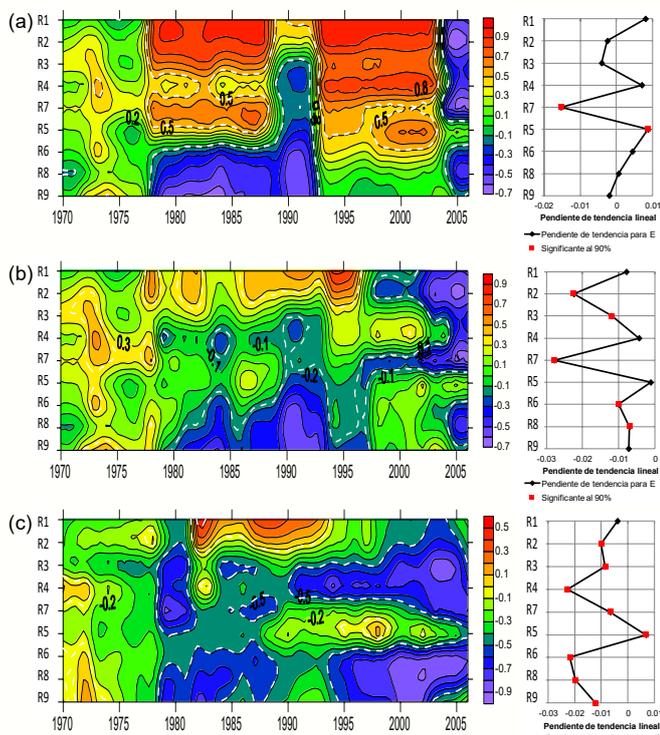


Figura 2. Coeficientes de correlación móvil para 11 años (izquierda) entre índices ENSO y la precipitación anual en cada región (áreas significativas al 90% mediante una prueba-t, encerradas entre líneas blancas discontinuas). Pendiente de la tendencia lineal (derecha) de la correlación móvil (puntos rojos significativos al 90% mediante una prueba-t. a) con el índice E, b) con el índice E (sin incluir los eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998) c) con el índice C (sin incluir los eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998). (Rau et al., 2016).

Esto conlleva a las siguientes preguntas sobre lo que viene sucediendo en las últimas décadas 1) ¿Frente a un calentamiento/enfriamiento cerca a las costas, hay una menor/mayor precipitación anual? 2) ¿Frente a un calentamiento/enfriamiento del Pacífico Central, hay una menor/mayor precipitación anual? La Figura 3 muestra esta relación entre el calentamiento en el Pacífico Tropical y las lluvias en las regiones, a través de los índices NIÑO 1+2 ubicado cerca de nuestra costa norte y NIÑO 4 en el Pacífico Central, corroborando esta inversión en las correlaciones durante 2000-2011.

Conociendo que hay límites del calentamiento de la TSM alrededor de los  $\sim 26^{\circ}\text{C}$  que si es superado, se espera que llueva más (Takahashi, 2004; Woodman y Takahashi, 2014) con repercusión a nivel anual, es válido afirmar que a partir del 2000, El Niño está asociado a anomalías débiles de la TSM a lo largo de la costa peruana sin alcanzar los  $26^{\circ}\text{C}$ , observándose

esta relación inversa entre el índice NIÑO 1+2 y las lluvias. No obstante, esto se complementa con la pregunta 2, es decir esta relación inversa también se asocia con el Pacífico Central. Lo anterior verificaría la influencia de los periodos comprendidos entre los dos saltos climáticos documentados: de 1976 (Miller et al., 1994) y la del 2000 (Tsonis et al., 2007), los cuales modularían el comportamiento del ENSO a escala global (Trenberth y Stepaniak, 2001). Las covarianzas asociadas a los dos modos del Pacífico, no responden al 100% de la variabilidad de las lluvias en la VPP, con lo cual las tendencias de R3 y R5 mencionado al principio, se debería a una combinación de efectos asociado a componentes regionales como por ejemplo procesos atmosféricos regionales (influencia de la oscilación Madden y Julian en las zonas altas del norte, Bourrel et al., 2015) y el transporte de humedad desde la cuenca Amazónica no estudiado hasta la fecha.

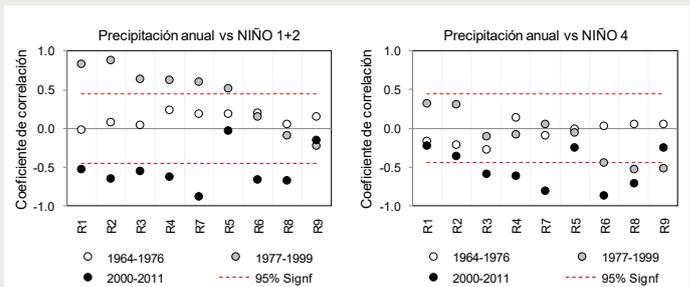


Figura 3. Coeficientes de correlación entre el índice NIÑO 1+2 y NIÑO 4 (periodo Sep-Feb) y la precipitación anual durante los 3 periodos comprendidos entre los saltos climáticos de 1976 y 2000. Significancia máxima del 95% obtenida con el periodo 2000-2011 en líneas rojas discontinuas.

Hasta este nivel es válido afirmar que desde los años 2000, se viene experimentando un periodo de cambio en la relación ENSO/lluvia en la VPP, quedando mucho trabajo de investigación en perspectiva, como la identificación y documentación de estas oscilaciones decenales ligadas a la teleconexión climática y el estudio de los mecanismos atmosféricos y oceánicos asociados. Actualmente estos mecanismos representan un reto en su comprensión debido a que los modelos climáticos muestran un gran sesgo en esta región asociado a un calentamiento (Takahashi, 2015). También, los mecanismos asociados a los eventos extremos de lluvia dependen de los tipos de El Niño, los cuales son simulados de forma disímil por los modelos climáticos, proyectando finalmente una gran incertidumbre sobre la futura evolución de las lluvias en países como el Perú.

# La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

Pedro R., Luc B., Boris D., David L.

## REFERENCIAS

- Ashok, K., S. K. Behera., S. A. Rao (2007): *El Niño Modoki and its possible teleconnection*, *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007.
- Bourrel, L., P. Rau., B. Dewitte (2015): *Low-frequency modulation and trend of the relationship between ENSO and precipitation along the northern to centre Peruvian Pacific coast*, *Hydrological Processes*, 29(6), 1252–1266.
- Brunet-Moret, Y. (1979): *Homogénéisation des précipitations*. Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie, 16, 3-4.
- Carranza, L. (1892): *Contra-corriente marítima en Paita y Pacasmayo*. Boletín Sociedad Geográfica de Lima, 1, 9, 344-345, Peru.
- de Guenni, L. B., M. García., Á. G. Muñoz (2016): *Predicting monthly precipitation along coastal Ecuador: ENSO and transfer function models*, *Theoretical and Applied Climatology*, 1-15, doi:10.1007/s00704-016-1828-4
- Goldberg, R. A., G. Tisnado., R. A. Scofield (1987): *Characteristics of extreme rainfall events in north-western Peru during the 1982–1983 El Niño period*, *Journal of Geophysical Research*, 92, C14 225–241.
- Hartigan, J. A., M. A. Wong (1979): *Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm*, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C* 28(1), 100-108.
- Horel, J. D., A. G. Cornejo-Garrido (1986): *Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall*, *Monthly Weather Review*, 114, 2091–2105.
- Labat, D. (2005): *Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts*, *Journal of Hydrology*, 314-1, 275-288.
- Lagos, P., Y. Silva., E. Nickl., K. Mosquera (2008): *El Niño – related precipitation variability in Peru*, *Advances in Geosciences*, 14, 231–237, 2008.
- Lavado, W. S., J. Ronchail., D. Labat (2012): *Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages*, *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 1–18.
- Lavado, W., J. C. Espinoza (2014): *Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Peru*, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 171 – 182.
- Lee, T., M. McPhaden (2010): *Increasing intensity of El Niño in the central equatorial Pacific*, *Geophysical Research Letters*, 37, L14603, <http://doi.org/10.1029/2010GL044007>.
- Miller, A., D. Cayan., T. Barnett (1994): *The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean*, *Oceanography*, 7, 21–26.
- Pineda, L. E., P. Willems (2016): *Multisite Downscaling of Seasonal Predictions to Daily Rainfall Characteristics over Pacific – Andean River Basins in Ecuador and Peru Using a Nonhomogeneous Hidden Markov Model*, *Journal of Hydrometeorology*, <http://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0040.1>.
- Rau, P., L. Bourrel., D. Labat (2016): *Variación de baja frecuencia y tendencias en la relación entre el Fenómeno El Niño y las precipitaciones en la Vertiente del Pacífico Peruano*, XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Perú.
- Rau, P., L. Bourrel., D. Labat (2017): *Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast*, *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158.
- Recalde-Coronel, G. C., A. G. Barnston., Á. G. Muñoz (2014): *Predictability of December-April rainfall in coastal and Andean Ecuador*, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 1471-1493.
- Sanabria, J., L. Bourrel., B. Dewitte (2015): *On the evolution of precipitation during extreme El Niño events along the coast of Peru*, 11th ISCHMO International Conference on Southern hemisphere Meteorology and Oceanography, Chile.
- Segura, H., J. C. Espinoza., K. Takahashi (2016): *Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes*, *Environmental Research Letters*, 11(9), 1–8. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094016>.
- Sivakumar, B. (2017): *Modern Nonlinear Time Series Methods. Chaos in Hydrology*, Springer Netherlands, 111-145 pp.
- Takahashi, K. (2004): *The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997–1998 and 2002 El Niño events*, *Annales Geophysicae*, 22, 3917-3926.
- Takahashi, K., A. Montecinos., K. Goubanova., B. Dewitte (2011): *ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki Niño*, *Geophysical Research Letters*, 38, L10704.
- Takahashi, K. (2015): *Modelos climáticos y sus errores promedio en el Pacífico*. Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, 2, 6, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- Tapley, T., P. Waylen (1990): *Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru*, *Hydrological Sciences Journal*, 35, 4, 429-446.
- Trenberth, K., D. Stepaniak (2001): *Indices of El Niño Evolution*. *J. Climate*, 14, 1697–1701.
- Tsonis, A., K. Swanson., S. Kravtsov (2007): *A new dynamical mechanism for major climate shifts*, *Geophysical Research Letters*, 34, L13705.
- Vicente-Serrano, S., E. Aguilar., R. Martínez (2016): *The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador*, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-016-3082-y
- Woodman, R., K. Takahashi (2014): *¿Por qué no llueve en la costa del Perú (salvo durante El Niño)?*. Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, 1, 6, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.

## Análisis de Rendimiento del HPC-Linux-Clúster usando el método Benchmark WRF

Berlín Segura, Ivonne Montes y Kobi Mosquera  
Instituto Geofísico del Perú

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha implementado una infraestructura computacional de última generación dedicada al cálculo científico intensivo denominada "Sistema Computacional de Alto Rendimiento para la Simulación de Fluidos Geofísicos" (en adelante HPC-Linux-Clúster), la cual es ahora una de las herramientas computacionales más grandes y poderosas a disposición de la comunidad científica peruana; adquirida gracias al Convenio de Subvención N°101-2014-FONDECYT, a los proyectos de colaboración SPIRALES2012 IRD-IGP, Manglares IGP (IDRC) y al Programa Presupuestal por Resultados 068 (PPR).

Medir el rendimiento de este tipo de infraestructura requiere utilizar técnicas de "benchmark", que se define en informática, como herramientas estandarizadas para evaluar el desempeño del sistema completo o de cada componente, medir los límites en la capacidad de transferencia en el sistema o entre conexiones, establecer comparativos con otros sistemas o arquitecturas computacionales, así como determinar o elegir los sistemas más adecuados para ciertas aplicaciones. El presente estudio propone analizar el rendimiento del HPC-Linux-Cluster mediante el *benchmark* de tipo aplicativo que consiste en utilizar un modelo numérico complejo, en este caso el modelo atmosférico regional WRF (Weather Research and Forecasting Model) y seguir la metodología de Arnold et al. (2011); la cual permite medir el rendimiento del WRF y probar la escalabilidad de diferentes plataformas. En este caso, el método además permite calcular el rendimiento (rapidez y eficiencia) del HPC-Linux-Cluster y compararlo con otras plataformas de Europa y USA.

### Metodología Arnold et al. (2011): Benchmark aplicativo usando WRF

El método consiste en utilizar 3 configuraciones de múltiples dominios sobre el modelo WRF (desarrollado para la investigación y el pronóstico del tiempo) que abarcan la región de Europa (Fig. 1), implementados en otras cuatro diferentes plataformas computacionales a nivel internacional (Vienna Scientific Cluster – VSC, Pacific Area Climate Monitoring and Analysis Network – PACMAN, Arctic Region Supercomputing Center University of Alaska – CHUGACH, National Institute for Computational Sciences University of Tennessee – KRAKEN ; más detalles en la Tabla 1). La primera configuración, 4dbasic, consiste en configurar 4 dominios (21.6, 7.2, 2.4 y 0.8 km de resolución) anidados (One-way) con 40 niveles verticales. La segunda, 4basiclev, tiene la misma configuración que la primera pero con 63 niveles verticales. La tercera, 3dhrlev, se configura para 3 dominios (7.2, 2.4 y 0.8 Km) teniendo mayor resolución horizontal y vertical. Estas configuraciones presentan varios desafíos para el modelo WRF, entre ellas tenemos el coste computacional debido a la gran cantidad de puntos de grilla y la estabilidad del modelo.

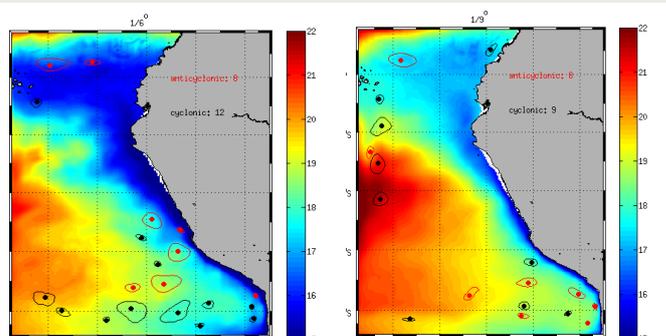
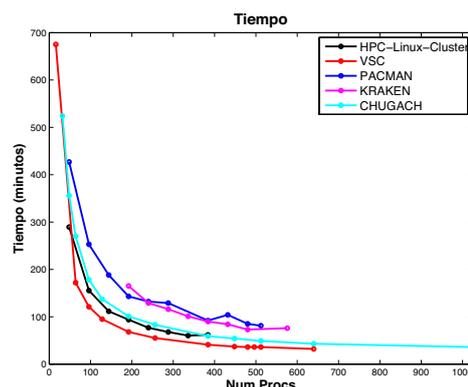


Figura 1. Configuraciones de múltiples dominios: 4dbasic, 4basiclev y 3dhrlev para el benchmark usando el modelo WRF.

Siguiendo la metodología de Arnold et al. (2011) se realizaron 8 simulaciones por cada configuración, dando un total de 24 simulaciones; empleando de 2 a 16 nodos que alcanzan entre 48 y 384 procesadores. Para cada simulación se mide el tiempo de ejecución que lleva la simulación y se calcula las *medidas del rendimiento para aplicaciones paralelas*; las cuales son:

- Tiempo: es el tiempo de cálculo y el tiempo en crear los archivos de entrada y salida.
- Speed-up (S): expresada como ganancia de velocidad o rapidez, se define como la razón entre el tiempo de ejecución secuencial ( $T_s$ ) con un procesador y el tiempo de ejecución paralelo ( $T_p$ ) con múltiples procesadores.
- Eficiencia (E): es una medida del grado de aprovechamiento de los recursos computacionales. La eficiencia se define como la rapidez dividida por el número de procesadores ( $p$ ).
- Escalabilidad: un sistema paralelo es escalable cuando tiene la capacidad de mantener la eficiencia con el aumento simultáneo de los procesadores y el tamaño del problema. La escalabilidad de un sistema paralelo es una medida de la capacidad de incrementar la rapidez con el número de procesadores, esto refleja la capacidad del sistema paralelo de utilizar eficazmente los recursos de procesamiento (Grama, 2003).



# Análisis de Rendimiento del HPC-Linux-Clúster usando el método Benchmark WRF

Berlin Segura, Ivonne Montes y Kobi Mosquera  
Instituto Geofísico del Perú

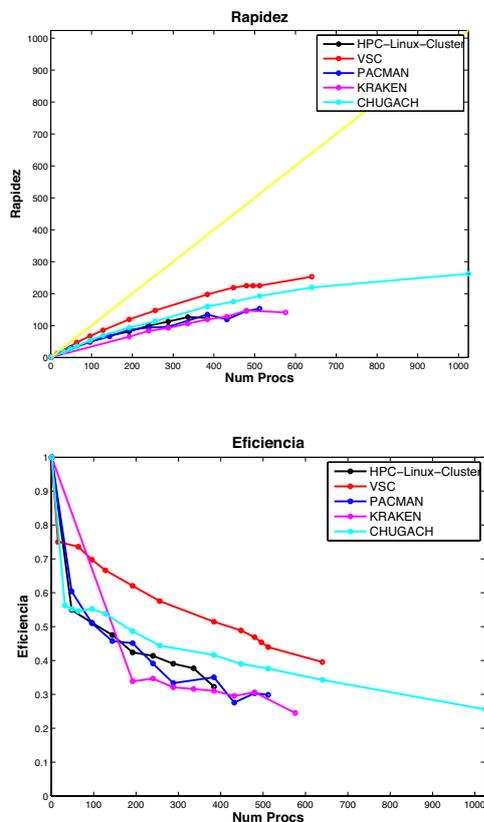


Figura 2: Tiempo (arriba), rapidez (centro) y eficiencia (abajo) para la configuración 4dbasic: plataformas HPC-Linux-Cluster (negro), VSC (rojo), CHUGACH (celeste), KRAKEN(magenta) y PACMAN(azul).

## Resultados Preliminares

De la comparación entre las configuraciones sobre el HPC-Linux-Cluster se tiene que el menor tiempo fue alcanzado para el caso 4dbasic seguido por el 4basiclev y 3dhrlev, pero la diferencia entre las configuraciones es pequeña en la rapidez y la eficiencia.

Para la comparación del rendimiento del HPC-Linux-Cluster con las otras plataformas para las 3 configuraciones (4dbasic, 4basiclev y 3dhrlev) se obtuvo que, el menor tiempo, mayor rapidez y eficiencia fue alcanzado por VSC seguida por HPC-Linux-Cluster CHUGACH, KRAKEN y PACMAN. Aunque las plataformas son muy diferentes entre sí, se observa que el HPC-Linux-Cluster se aproxima a los resultados del CHUGACH (Fig. 2, mostrado solo para 4dbasic).

Un detalle observado es que el rendimiento del HPC-Linux-Cluster en las tres configuraciones se ve disminuido debido al tiempo que lleva en acceder a los archivos de entrada y salida (I/O ; lectura y escritura al disco). Por lo que, para aumentar la eficiencia se ha probado con cuatro métodos I/O: el primero crea archivos empleando por defecto un sólo procesador (I/O Netcdf en serie), en el segundo método los archivos son generados por cada procesador (I/O Netcdf en paralelo PNetcdf), en el tercero se definen los procesadores para el cálculo y para crear los archivos de entrada y salida (I/O Quilt) y, en el cuarto,

se usa la combinación de Quilt con PNetcdf (I/O Quilt-PNetcdf); de los cuales se ha obtenido que el método I/O Pnetcdf alcanza el menor tiempo, mayor rapidez y eficiencia, luego le siguen los métodos I/O Quilt-Pnetcdf y I/O Quilt. Asimismo, al comparar los métodos I/O con 336CPU se tiene que el menor tiempo fue alcanzado por PNetcdf (33.88 min), luego tenemos a Quilt-PNetcdf, Quilt, Netcdf serie Intel y Netcdf serie GNU (60.25 min), donde el tiempo fue reducido a 26.37 min.

Como conclusión preliminar se puede afirmar que el HPC-Linux-Cluster tiene un desempeño comparable con otros sistemas similares a nivel internacional según el benchmark con el modelo WRF, el cual es escalable ya que la rapidez se incrementa con el número de procesadores, aunque el método escogido para el I/O tiene también un importante efecto. Esto indica que el HPC-Linux-Cluster es una herramienta computacional poderosa para apoyar las investigaciones científicas que se desarrollan en el IGP y la comunidad científica (ej., universidades).

Para acceder a nuestros recursos visite la web <http://scah.igp.gob.pe/laboratorios/dfgc> o escribanos a [dfgc@igp.gob.pe](mailto:dfgc@igp.gob.pe)

Plataformas	Procesado	Conexión
HPC-linix-Cluster	Xeon 2.5GHz, 24 núcleos por Nodo, 128 GB de memoria, 5.3 GB por núcleo, 48-384 CPU	Infiniband QDR
VSCUniversity of Vienna	Sun Fire X2270, 8 núcleos por Nodo, 24 GB de memoria, 3 GB por núcleo, 16-640 CPU	Infiniband QDR
PACMAN at Arctic Region Su-percomputing Center (ARSC)University of Alaska	Penguin, Computing Cluster, 16 núcleos por No-do, 64 GB de memoria, 4 GB por núcleo, 48-512CPU	Mellanox QDR Infiniband
CHUGACH (ARSC)	Cray XE6, 16 núcleos por Nodo, 32 GB de memo-ria, 2 GB por núcleo, 32-1024CPU	Cray Gemini interconnect
KRAKEN The National Institute for Computational Sciences (NICS) University of Tennessee	Cray XT5, 12 núcleos por Nodo, 18 GB de memo-ria, 1.5 GB por núcleo, 192-576CPU	Cray SeaStar2+ interconnect

Tabla 1: Plataformas computacionales: HPC-Linux-cluster, VSC, PACMAN, CHU-GACH y KRAKEN

## Referencias

Arnold D., D. Morton, I. Schicker, J. Zabludil, O. Jorba, K. Harrison, G. Newby, and P. Seibert: "WRF benchmark for regional applications", in 12th Annual WRF Users' Workshop, Boulder, USA, 20-24 June, 2011.

Grama, Ananth, Anshul Gupta, George Karypis, and Vipin Kumar: "Introduction to Parallel Computing – 2nd Edition". Addison-Wesley, 2003.

Kaivalya M. Dixit: Overview of the SPEC Benchmarks. The Benchmark Handbook 1993

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers: "A Description of the Advanced Research WRF Version 3", NCAR Technical Note, 2008.

User-Oriented WRF Benchmarking Collection <http://weather.arsc.edu/WRFBenchmarking/index.html>

WRF V3 Parallel Benchmark Page <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/bench/>

# Resumen del Informe Técnico

## PPR/EI Niño - IGP/ 2017-1

*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), para el mes de diciembre las condiciones climáticas de la costa peruana fueron cálidas débiles, con el valor del ICEN de  $+0.43^{\circ}\text{C}$ . Los valores temporales del ICEN (ICENTmp) indican condiciones Cálidas Débiles para los meses de enero y febrero 2017. Para el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI) de la NOAA de diciembre 2016 corresponde a condiciones frías débiles, mientras que el valor estimado para el mes de enero 2017 corresponde a condiciones neutras.

Para el resto del verano (hasta marzo 2017), seis de los siete modelos numéricos internacionales de NMME con condiciones iniciales del mes de febrero 2017, pronostican condiciones Cálidas Débiles en el Pacífico oriental, además de un refuerzo de la Zona de Convergencia Intertropical frente a Perú y debilitamiento de la ZCIT al norte del Ecuador. Para el mes de abril de los siete modelos cuatro pronostican condiciones cálidas moderadas, dos modelos condición cálida débil y un modelo condición neutra. Para la región del Pacífico central, para el resto del verano los modelos predicen condiciones generalmente neutras. Para el mes de abril, cinco de los siete modelos indican condiciones neutras y dos modelos indican condiciones cálidas débiles.

Además, hay evidencia de que una onda Kelvin cálida, aparentemente asociada a las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Oriental, arribó a la costa durante el mes de enero, lo cual podría haber contribuido al calentamiento superficial observado. Por otro lado, la onda Kelvin cálida, producto de la reflexión de una onda Rossby cálida en el extremo occidental, podría llegar a partir de mediados de febrero. Por otro lado, los pulsos de viento del este recientes en el Pacífico central-occidental, podrían aminorar la magnitud de esta onda Kelvin cálida.

### Índice Costero El Niño

Utilizando los datos de Temperatura Superficial del Mar (TSM) promediados sobre la región Niño1+2, actualizados hasta el mes de enero de 2017 del producto ERSST v3b generados por el Climate Prediction Center (CPC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, EEUU), se ha calculado el Índice Costero El Niño (ICEN; ENFEN 2012) hasta el mes de diciembre de 2016. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN	Condiciones costeras del mes
2016	Setiembre	0.14	Neutra
2016	Octubre	0.22	Neutra
2016	Noviembre	0.37	Neutra
2016	Diciembre	0.43	Cálida Débil

Tabla 1. Valores recientes del ICEN.

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

El valor del ICEN para el mes de diciembre indica condición Cálida Débil. El valor de 0.43 es sustancialmente menor al ICENTmp previamente estimado para este mismo mes de 0.77, y esto se debe al sorprendentemente valor bajo ( $0.38^{\circ}\text{C}$ ) de la anomalía mensual de ERSST v3b para enero 2017, lo cual contrasta con el valor de aproximadamente  $1^{\circ}\text{C}$  calculado usando los datos semanales NOAA OI SST o los datos diarios de OSTIA. Además, este valor de  $0.38^{\circ}\text{C}$  en enero implica una reducción relativa al valor de diciembre de 2016 ( $0.60^{\circ}\text{C}$ ), contradiciendo la observación de un súbito calentamiento en la segunda quincena de enero en la región Niño 1+2 como en estaciones costeras de Imarpe y DHN. Una posible explicación a esta situación es que, debido a que los datos más recientes de ERSST v3b son estimados preliminares utilizando los datos de barcos y otros in situ disponibles en el momento y no usa datos satelitales, quizás en enero los datos disponibles fueron demasiado escasos para una buena estimación. Los datos de ERSST v3b tras unas semanas luego son mejorados conforme más datos de mediciones van llegando y es probable que más adelante el valor de enero aumente sustancialmente. Esta situación de una aparentemente errada estimación no es común, pero resalta la necesidad de mayor número de mediciones in situ de calidad (ej. cruceros oceanográficos) que sean transmitidas en tiempo real.

Según estos valores del ICENTmp, se estima que en enero y febrero 2017 las condiciones serían CÁLIDAS DÉBILES. El ICENTmp de enero será confirmado cuando se disponga del valor de ERSST para el mes de febrero de 2017. De confirmarse esto, se cumpliría el criterio de ENFEN (2012), para confirmar El Niño costero, el cual ya fue anunciado al activarse la Alerta de El Niño Costero (CO ENFEN N°03-2017) mediante el sistema de alerta de El Niño/La Niña costero (ENFEN, 2015).

# Resumen del Informe Técnico PPR/El Niño - IGP/ 2017-1

Por otro lado, para el Pacífico Central (Niño 3.4), el ONI (Ocean Niño Index en inglés; <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt>), actualizado por la NOAA al mes de diciembre de 2016, es de  $-0.73^{\circ}\text{C}$ , correspondiente a condiciones Frías Débiles<sup>1</sup>, siendo el quinto mes con condiciones frías débiles, e indicando la continuación de La Niña en el Pacífico central al menos hasta diciembre.

Los valores estimados (ONItmp), combinando observaciones y pronósticos, indican condiciones neutras para los meses de enero y febrero 2017. De cumplirse esto, el evento La Niña débil en el Pacífico central habría concluido en diciembre (inclusive), por lo que el verano se consideraría neutral.

## Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

En la región Niño 3.4 las anomalías de la TSM (IR, MW, OSTIA) fueron en promedio de  $-0,35^{\circ}\text{C}$ , dentro del rango de condiciones neutras. Sin embargo, la actividad convectiva en el océano Pacífico ecuatorial central continuó mostrándose anómalamente reducida, lo que junto con los vientos anómalos del este, indican el acoplamiento de la atmósfera a las condiciones oceánicas, similares a las de un evento La Niña débil en el Pacífico central. Esto es consistente con la propuesta de DiNezio (2016) de que estas condiciones atmosféricas responden más al gradiente zonal de TSM en el Pacífico occidental, no tanto al valor en sí de la TSM, el cual puede estar también afectado por el calentamiento global. Por otro lado, según estos datos satelitales, en la región Niño 1+2 la anomalía de la TSM se mantuvo en promedio dentro del rango de condiciones cálidas, pero aumentando rápidamente a lo largo del mes con valores cercanos a  $+0^{\circ}\text{C}$  hasta casi  $+2.9^{\circ}\text{C}$  y  $+2.0^{\circ}\text{C}$  según los productos de microondas y OSTIA, respectivamente.

El esfuerzo de viento zonal (este-oeste) en el Pacífico central ( $160^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{W}$ ;  $5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$ ) continuó con anomalía mensual del este, siendo levemente mayores al mes anterior. En el Pacífico oriental ecuatorial (al este de  $140^{\circ}\text{W}$ ) persistieron ligeras anomalías de vientos del oeste (según datos de TAO). Desde finales del mes de enero se viene presentando un nuevo pulso de vientos del este en el Pacífico central ( $160^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{W}$ ), que podría generar una nueva onda Kelvin fría. El contenido de calor oceánico ecuatorial y la inclinación de la termoclina se presentaron alrededor de lo normal, aunque ligeramente positivas. Por otro lado, la termoclina en el Pacífico oriental, en  $110^{\circ}\text{W}$  mostró anomalías positivas pero cercanas a sus condiciones normales, en  $95^{\circ}\text{W}$  se observó condiciones próximas a su normal.

<sup>1</sup>Los umbrales para establecer la categoría de condiciones cálidas o frías débiles, moderadas, fuertes, y muy fuertes usando el ONI son  $\pm 0.50$ ,  $\pm 1.00$ ,  $\pm 1.50$ , y  $\pm 2.00$ , respectivamente (Nota Técnica ENFEN, 02-2015).

Los datos de altimetría satelital (Fig. 1d) y de altura dinámica de TAO indican anomalías positivas en el nivel del mar en el extremo central oriental en enero. Para el caso de la profundidad de la termoclina, según la información de ARGO, se observaron anomalías positivas débiles (alrededor de 15 metros en promedio) en la región oriental. Esto también se observa en la información de las boyas de TAO (Figura 1b).

Lo anterior podría haber sido causado por una onda Kelvin cálida forzada por las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental, pero esto sólo se aprecia con el modelo oceánico lineal forzado experimentalmente con vientos del reanalysis de NCEP/NCAR, mas no con el modelo forzado con ASCAT (Fig. 1e). Por otro lado, si se considera el modelo con una termoclina promedio inclinada y forzado con ASCAT también muestra una señal positiva en el Pacífico oriental en enero, aunque no es claro si se debe al forzante de vientos del oeste en el Pacífico oriental o a la amplificación de una débil señal de onda Kelvin cálida debido a la somerización de la termoclina promedio.

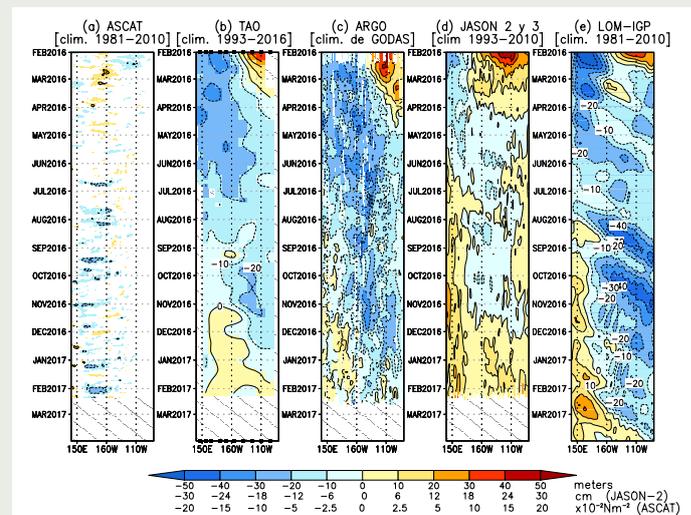


Figura 1. Diagrama longituditud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal basado en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de  $20^{\circ}\text{C}$  datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Finalmente, en (e)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

## Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

Según la propagación observada de la onda Kelvin cálida, que se habría formado como consecuencia de la reflexión de las ondas Rossby cálidas en el extremo occidental, se podría esperar que alcance el extremo oriental a partir de mediados de febrero (Figura 1c).

# Resumen del Informe Técnico

## PPR/El Niño - IGP/ 2017-1

El modelo lineal con profundidad de termoclina constante, forzado con esfuerzo de vientos de ASCAT y ajustado en magnitud para representar la variación de la termoclina, solo muestra la señal de dicha onda Kelvin cálida en el Pacífico Central pero esta señal que llegaría a la costa entre febrero y marzo, se ve debilitada e incluso cancelada hacia el extremo oriental. Además, el modelo predice la llegada de una onda Kelvin fría a mediados de febrero, la cual se habría formado con un pulso de viento del este a inicios de enero. Finalmente, debido a la anomalía de viento del este al este de 180° a inicios del mes de febrero, el modelo indica la formación reciente de una onda Kelvin fría que arribaría a mediados de marzo.

Por otro lado, el mismo modelo pero con termoclina variable, la cual es somera en la zona oriental, muestra en dicha región una señal de onda Kelvin cálida en enero que continuaría afectando la profundidad de la termoclina hasta mediados de febrero. Este modelo también predice una atenuación de la onda Kelvin cálida esperada entre febrero y marzo.

Sin embargo, existe incertidumbre en los datos utilizados para forzar estos modelos, así como en los modelos mismos, por lo que es posible que la onda Kelvin cálida no sea atenuada tanto como estos indican.

### Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2), los pronósticos de los modelos climáticos de NMME (CFSv2, NASA\_GEOS5, FLOR, CM2.1, NCAR\_CCM4, CMC1 y CMC2) inicializados en febrero indican en general condiciones cálidas para el resto del verano. Para el mes de marzo, 6 de 7 modelos indican condiciones cálidas débiles y 1 modelo indica condición cálida moderada. Para el mes de abril, 4 de 7 modelos indican condiciones cálidas moderadas, 2 modelos predicen condiciones cálidas débiles y 1 modelo condición neutra (Fig. 2). Para el verano (diciembre 2016-marzo 2017), los modelos en promedio predicen condiciones cálidas Débiles y El Niño costero sería débil. Los pronósticos extienden el evento El Niño costero hasta al menos agosto 2017, con magnitud moderada a partir de mayo. Si bien los pronósticos para marzo y abril inicializados en febrero son relativamente confiables, la barrera de predictibilidad introduce incertidumbre para los siguientes meses (Reupo y Takahashi, 2014).

Para el Pacífico central (Niño 3.4), 6 modelos de NMME inicializados en febrero predicen condiciones neutras para el mes de marzo y un modelo predice condiciones cálidas débiles. Para el mes de abril, se observan cinco modelos con condiciones neutras y dos modelos indican

condiciones cálidas débiles. A partir de mayo, 5 de 7 modelos predicen condiciones cálidas, pero en general esto debe tomarse con cuidado debido a la barrera de predictibilidad. Considerando 4 modelos inicializados en enero, se observa condiciones neutras para los meses de marzo y abril (Fig.2)

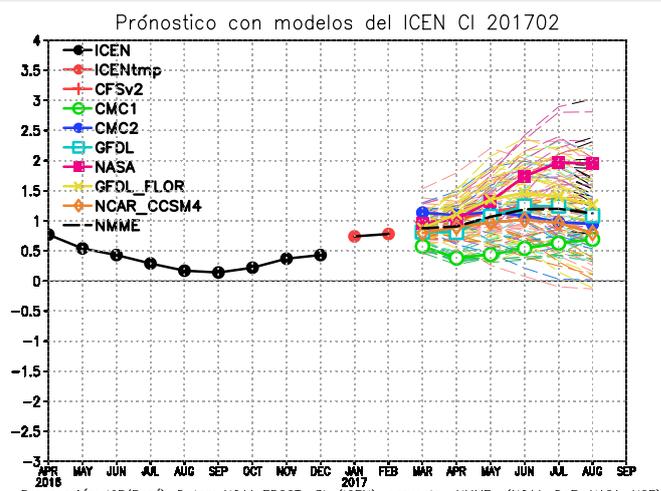


Figura 2. Índice Costero El Niño (ICEN, negro con círculos llenos) y su valor temporal (ICENtmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de 3 meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Los pronósticos de los modelos CFSv2, CMC1, CMC2, GFDL, NASA, GFDL\_FLOR y NCAR\_CCSM4 tienen como condición inicial el mes de febrero de 2017. (Fuente: IGP, NOAA, proyecto NMME).

Se hace notar que el NOAA CPC, quienes coordinan el proyecto NMME, presenta en su página web (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/plume.html>) una versión de los pronósticos de Niño 3.4 a la que aplican un ajuste basado en pronósticos previos (breve explicación en <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/plume.descr.html>). Esta tiene aproximadamente el efecto de reducir la amplitud de las anomalías, por lo que con el ajuste los pronósticos son menos fríos.

Si bien El Niño costero en curso no sigue la dinámica ENOS tradicional, es consistente con el mecanismo físico propuesto para El Niño de 1925 asociado a una intensa Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) al sur del ecuador y anomalías de viento del norte (Takahashi y Martínez, 2015). Esto se observa tanto en la distribución de precipitación y vientos actuales, como en el pronóstico de lluvias de los modelos NMME para marzo, el cual indica aumento de lluvias en la ZCIT al sur del ecuador extendiéndose a la costa norte de Perú, además de condiciones secas al norte del ecuador. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que en general los modelos climáticos tienden a sobre-estimar la ZCIT sur climatológicamente, lo cual podría tener impactos en los pronósticos. Por otro lado, los modelos pronostican la continuación de anomalías secas en el Pacífico central consistentes con La Niña en esta región.

# Resumen del Informe Técnico

## PPR/El Niño - IGP/ 2017-1

### Conclusiones:

1. El ICEN para diciembre de 2016 fue de 0.43 (Cálida Débil) y el ICENtmp para enero y febrero de 2017 es 0.74 y 0.78, respectivamente, ambos siendo condiciones Cálidas Débiles. El valor de ERSST v3b para enero utilizado para el cálculo del ICEN parece subestimar el calentamiento real.

2. En el Pacífico central, el ONI de diciembre (NDE) correspondió a condiciones frías débiles. El ONI estimado para enero y febrero corresponde a condiciones neutras, lo cual indicaría que La Niña habría concluido en diciembre (inclusive). La ATSM en la región Niño 3.4, durante este enero, ha fluctuado alrededor de los  $-0.3^{\circ}\text{C}$ .

3. El contenido de calor oceánico ecuatorial y la inclinación de la termoclina se presentaron dentro de su variación normal, aunque ligeramente positivos.

4. La actividad convectiva en enero continuó mostrándose anómalamente reducida, similares a los de La Niña débil en el Pacífico central, consistente con la respuesta a las anomalías negativas del gradiente zonal de TSM en el Pacífico central.

5. Los vientos zonales ecuatoriales en enero se mostraron cerca de lo normal, con anomalías del este en el Pacífico occidental y del oeste en el oriental (según TAO).

6. Hay evidencia de que una onda Kelvin cálida, aparentemente asociada a las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Oriental, arribó a la costa durante el mes de enero, lo cual podría haber contribuido al calentamiento superficial observado.

7. Por otro lado, la onda Kelvin cálida, producto de la reflexión de una onda Rossby cálida en el extremo occidental, podría llegar a partir de mediados de febrero. Por otro lado, los pulsos de viento del este recientes en el Pacífico central-occidental, podrían aminorar la magnitud de esta onda Kelvin cálida y los modelos de propagación de ondas indican su atenuación en el Pacífico oriental.

8. La intensidad de la onda Kelvin cálida podría disminuir con la presencia de anomalías de viento del este ecuatoriales.

9. Para el Pacífico oriental (Niño 1+2), de los 7 modelos inicializados en febrero, 6 indican que el mes de marzo presentaría condiciones cálidas débiles y 1 condiciones cálidas moderadas. Para el verano (diciembre 2016-marzo 2017), los modelos en promedio predicen condiciones cálidas Débiles. En

general, estos modelos predicen un reforzamiento de la ZCIT al sur del Ecuador y debilitamiento al norte.

10. Para el el Pacífico central (Niño 3.4), los 8 modelos de NMME inicializados en febrero, para el mes de marzo 7 predicen condiciones neutras y un modelo condición cálida débil, para el mes de abril 6 modelos predicen condiciones neutras y 2 modelos condiciones cálidas débiles. Para el verano, los modelos en promedio pronostican condiciones neutras. Considerando 4 modelos inicializados en enero predicen condiciones neutras para los meses de marzo y abril.

### 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", Instituto Geofísico del Perú, Mayo, 1, 5.

Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels, Ando, K., Cronin, M., Farrar, T., Guilyardi, E., Kumar, A., Lee, T., Roemmich, D., Serra, Y, Sprintall, J., Strutton, P., Sutton, A., Takahashi, K. y Wittenberg, A., 2016: First Report of TPOS 2020. GOOS-215, 200 pp. [<http://tpos2020.org/first-report/>]

DiNezio, P., 2016: Desafíos en la predicción de La Niña, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, 3 (9), 4-8.

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

ENFEN 2015: Pronóstico probabilístico de la magnitud de El Niño costero en el verano 2015-2016. Nota Técnica ENFEN 02-2015.

Lavado-Casimiro, W., Espinoza, J. C., 2014: Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007), Revista Brasileira de Meteorología, 29 (2), 171-182.

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

Mosquera, K., B. Dewitte y P. Lagos, 2010: 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, No9, 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", Instituto Geofísico del Perú, Enero, 1, 1, 4-7

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

Takahashi, K., Martínez, A. G., 2016: The very strong El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. En revisión en Climate Dynamics.

# Comunicado Oficial ENFEN

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



### COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 02- 2017 Estado del sistema de alerta: **Vigilancia de El Niño Costero**<sup>1</sup>

El Comité Multisectorial ENFEN, ante la evolución reciente de las condiciones océano-atmósfera en el Pacífico Ecuatorial Oriental, que incluye la costa norte del Perú, considera que existen condiciones favorables para un evento El Niño costero débil en el presente verano.

Por lo tanto, el Comité Multisectorial ENFEN da inicio a un estado de "Vigilancia de El Niño Costero", durante el cual continuará monitoreando e informando sobre la evolución de las condiciones actuales y actualizando las perspectivas en forma más frecuente.

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió en forma extraordinaria para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas hasta la tercera semana de enero de 2017.

En las dos últimas semanas, en el Pacífico oriental, incluyendo la costa peruana, aumentaron rápidamente las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar (TSM), alcanzando +1,6°C en la región Niño 1+2 y +4°C en Talara y Paita.

Este calentamiento se explica, entre otros, por el arribo de una onda Kelvin cálida, generada por las anomalías de viento del oeste en el Pacífico Ecuatorial oriental. Además, la intensificación de los vientos del norte frente a Centroamérica, así como el debilitamiento del Anticiclón del Pacífico Sur y los vientos costeros, favorecieron el desplazamiento de aguas ecuatoriales hacia el sur y el calentamiento superficial local.

La interacción océano-atmósfera descrita -y las anomalías de TSM asociadas- podrían persistir o intensificarse en los siguientes meses, debido a la formación estacional de la banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical y al arribo, entre fines de febrero e inicios de

marzo, de la onda Kelvin cálida observada en diciembre en el Pacífico Central. De darse estas condiciones, aumentaría la frecuencia de lluvias, particularmente en la costa norte.

Por lo expuesto, tomando en consideración las condiciones cálidas débiles según los valores preliminares del ICEN desde diciembre y los resultados más recientes de los modelos de las agencias internacionales para la región Niño 1+2, el Comité Multisectorial ENFEN da inicio a un estado de "Vigilancia de El Niño Costero", durante el cual continuará monitoreando e informando sobre la evolución de las condiciones actuales y actualizando las perspectivas en forma más frecuente.

Comité Multisectorial ENFEN  
Callao, 24 de enero de 2017

<sup>1</sup>Definición de "Vigilancia de El Niño costero": Según los modelos y observaciones, usando criterio experto en forma colegiada, el Comité ENFEN estima que es más probable que ocurra El Niño costero a que no ocurra. Al inicio del texto del Comunicado Oficial se indicará un rango de magnitudes tentativas y cuándo podría presentarse, así como una indicación sobre los posibles impactos en la lluvia y temperaturas (Nota Técnica ENFEN 01-2015). Se denomina "Evento El Niño en la región costera de Perú" o "El Niño costero" al periodo en el cual el Índice Costero El Niño (ICEN), que es la media corrida de tres meses de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2, indique "condiciones cálidas" (>+0,4°C) durante al menos tres (3) meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 01-2012).



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

### COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 03- 2017

### Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño Costero<sup>1</sup>**



El Comité Multisectorial ENFEN, ante la evolución reciente de las condiciones océanoatmósfera en el Pacífico Ecuatorial Oriental, que incluye la costa norte del Perú, considera que se han consolidado las condiciones para un evento El Niño costero débil en el presente verano; estas condiciones favorecen un aumento en la frecuencia de lluvias de magnitud muy fuerte, especialmente en la costa norte.

Por lo tanto, frente al escenario actual el Comité Multisectorial ENFEN, establece pasar del estado de "Vigilancia de El Niño Costero" al estado de "Alerta de El Niño Costero", durante el cual se intensificará el monitoreo de las condiciones, actualizando las perspectivas en forma más frecuente.

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 al mes de enero de 2017.

En la región del Pacífico Central (región Niño 3.4), la temperatura superficial del mar (TSM) muestra valores dentro del rango normal (Figura 1a). La inclinación este-oeste de la termoclina y el contenido de calor en el Pacífico ecuatorial continuaron alrededor de lo normal. Según el valor temporal del Índice Oceánico Niño (ONI) estimado hasta enero, el evento de La Niña débil en el Pacífico Central habría concluido en diciembre 2016.

Por otro lado, a partir de la segunda semana del mes se vienen observando anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Oriental. Asimismo, en esta región, incluyendo la costa peruana, aumentaron rápidamente las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar (TSM), alcanzando +2,0°C en la región Niño 1+2 (Figura 1b), +5°C en Talara y +6°C en Paita hacia fines del mes. El valor estimado del Índice Costero El Niño (ICENTmp) para diciembre fue +0,70°C (condición cálida débil) y el estimado para enero es de +0,77°C (condición cálida débil).

A lo largo del mes, se observó un debilitamiento persistente del Anticiclón del Pacífico Sur y los vientos costeros, que sumados a la intensificación de los vientos del norte frente a Centroamérica, favorecieron el desplazamiento de aguas ecuatoriales hacia el sur y el calentamiento superficial. Este calentamiento además se reflejó en la formación de la segunda banda de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en la última semana del mes. Además, una onda Kelvin cálida superficial, asociada a las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Oriental, arribó a la costa durante el mes de enero, contribuyendo a dicho calentamiento.

A finales del mes de enero se presentaron lluvias de magnitud muy fuerte<sup>2</sup> en Tumbes y Piura por efecto de la interacción océano-atmósfera, provocada por dicho calentamiento.

Las anomalías de las temperaturas máximas del aire se incrementaron en general. En la costa norte se presentaron anomalías de +1,5°C para la temperatura máxima y +0,5°C para la temperatura mínima.

En la costa central, las anomalías fueron de +1,9°C en la temperatura máxima y +1,7°C en la temperatura mínima, mientras que en la costa sur, las anomalías fueron de +1,5°C y +1,7°C, respectivamente.

En las estaciones costeras, la TSM promedio mensual presentó valores por encima de lo normal en la costa norte, mientras que en la costa central y sur alrededor de lo normal. Sin embargo, desde la segunda semana se detectó un rápido incremento de la TSM, principalmente en la costa norte y central del Perú, entre +2°C y +6°C (Figura 2). Frente a la costa norte, la TSM alcanzó valores de 27°C cerca de la costa, mientras que frente a la costa central y sur se registró valores de 26°C por fuera de las 50 millas de la costa, con la excepción entre Callao y Pisco, donde alcanzó valores menores.

En las secciones oceanográficas de Paita y de Chicama, la anomalía positiva de la temperatura se presentó en la capa de los 30 metros superficiales, alcanzando valores de +3°C, en promedio, mientras que a mayor profundidad se observaron condiciones neutras. Por otro lado, se detectó la proyección de aguas ecuatoriales superficiales (AES), de baja salinidad, hasta Pimentel, restringidas a la capa superficial.

Durante el mes, los ríos de la vertiente del Pacífico incrementaron sus caudales: en el norte alcanzando valores ligeramente sobre sus promedios históricos, mientras que en el centro, alcanzaron valores muy por encima de sus promedios y en el sur, presentaron valores similares a sus medias. Los reservorios en general tuvieron una tendencia ascendente respecto a su almacenamiento de agua: en la costa norte operaron en promedio al 36% y en la costa sur, al 44% respecto a su capacidad hidráulica útil.

La clorofila-a, indicador de la producción del fitoplancton, que es base de la cadena alimenticia en el mar, presentó una rápida disminución en sus concentraciones superficiales frente a la costa central y norte, posiblemente debido al debilitamiento persistente del afloramiento costero y además, en el norte, a la proyección de las AES que son típicamente menos productivas.

Los índices reproductivos de la anchoveta muestran que se ha reiniciado el desove en la región norte centro. La ausencia de munida en el norte, el retorno a costa del bonito y agujilla, la presencia de jurel en el centro y el registro de sardina frente a Pisco son indicios de un ambiente cálido.

### PERSPECTIVAS

Debido a la presencia de la banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) frente a la costa norte, se espera que la interacción océano-atmósfera continuará favoreciendo la circulación anómala de los vientos costeros. A su vez, este patrón contribuye a la persistencia del calentamiento superficial de la temperatura del mar en dicha región al menos en las próximas semanas.

Asimismo, se prevé que la onda Kelvin cálida observada en el Pacífico Central continúe propagándose hacia el este, pudiendo arribar a la costa norte del Perú entre fines de febrero y marzo; condición que contribuiría al incremento de la temperatura del mar. En conjunto, estas condiciones favorecen un aumento en la frecuencia de lluvias de magnitud muy fuerte, en la vertiente del Pacífico, especialmente en la costa norte.

Tomando en consideración los valores estimados del Índice Costero El Niño (ICEN) desde diciembre, el monitoreo y los resultados reportados anteriormente de los modelos de las agencias internacionales para la región Niño 1+2, el Comité Multisectorial ENFEN considera que estas condiciones contribuyen a la consolidación de un evento El Niño costero de magnitud débil, por lo cual eleva el sistema de alerta, al estado de "Alerta de El Niño Costero", durante el cual se intensificará el monitoreo de las condiciones, actualizando las perspectivas en forma más frecuente.

Comité Multisectorial ENFEN  
Callao, 02 de febrero de 2017

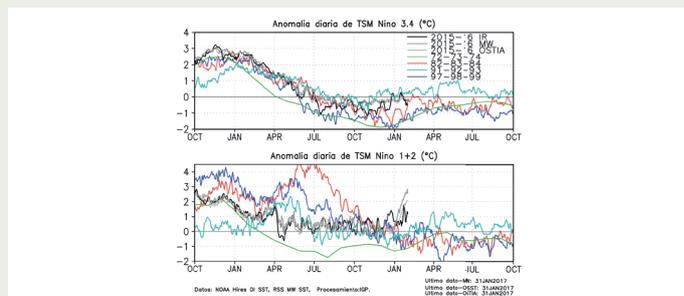


Figura 1. a) Series de tiempo de la anomalía diaria de la TSM en la región Niño 3.4 y en b) la región Niño 1+2. Las líneas en color negro (gruesa), gris y negro (fina) indican la evolución de la anomalía de la TSM en el presente año usando información infrarroja (IR), microondas (MW) y del producto OSTIA, respectivamente. Las líneas de color rojo, azul, celeste y verde, indican la evolución de la anomalía de la TSM para los años de La Niña costera 1985, 2007, 2010 y 1988.

<sup>1</sup>Definición 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. Al inicio del texto del CO se indicará un rango de magnitudes tentativas y su posible duración, así como una indicación sobre los posibles impactos en la lluvia y temperaturas (Nota Técnica ENFEN 01-2015). Se denomina "Evento El Niño en la región costera de Perú" o "El Niño costero" al período en el cual el Índice Costero El Niño (ICEN), que es la media corrida de tres meses de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2, indique "condiciones cálidas" (>+0,4°C) durante al menos tres (3) meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 01-2012).

<sup>2</sup>"Lluvias muy fuertes" se define como el percentil 95% de la precipitación diaria; "lluvias extremas" se definen como 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](http://twitter.com/igp_peru)  
 [https://www.youtube.com/c/igp\\_videos](https://www.youtube.com/c/igp_videos)

En el marco del:

