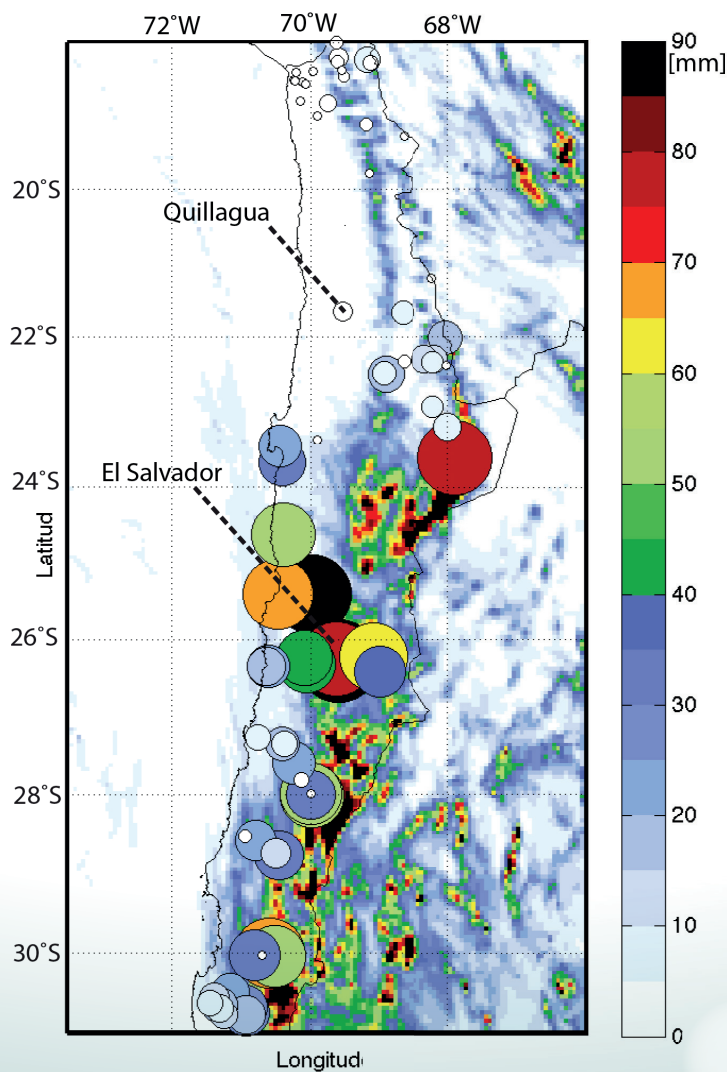


Programa Presupuestal por Resultados N° 068 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama ?



Distribución de lluvia acumulada durante la tormenta del 24 al 26 de Marzo en Chile

Contenido

2 - 3 **Introducción**

4 - 6 **Artículo de Divulgación Científica**

7 - 9 **Avances Científicos**

10 - 13 **Resumen Informe Técnico**

14 - 15 **Comunicado Oficial ENFEN**

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

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

Actividad: “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”.

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: Rondanelli, 2017

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

Impreso por:
IAKOB COMUNICADORES & EDITORES SAC.
Telf.: 364 8038 / 369 5019
Dirección: Calle Talladores 474
Urb. Ind. El Artesano - Ate

Lima, Mayo 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:
<http://intranet.igp.gob.pe/productonino/>



IGP

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.



ENFEN

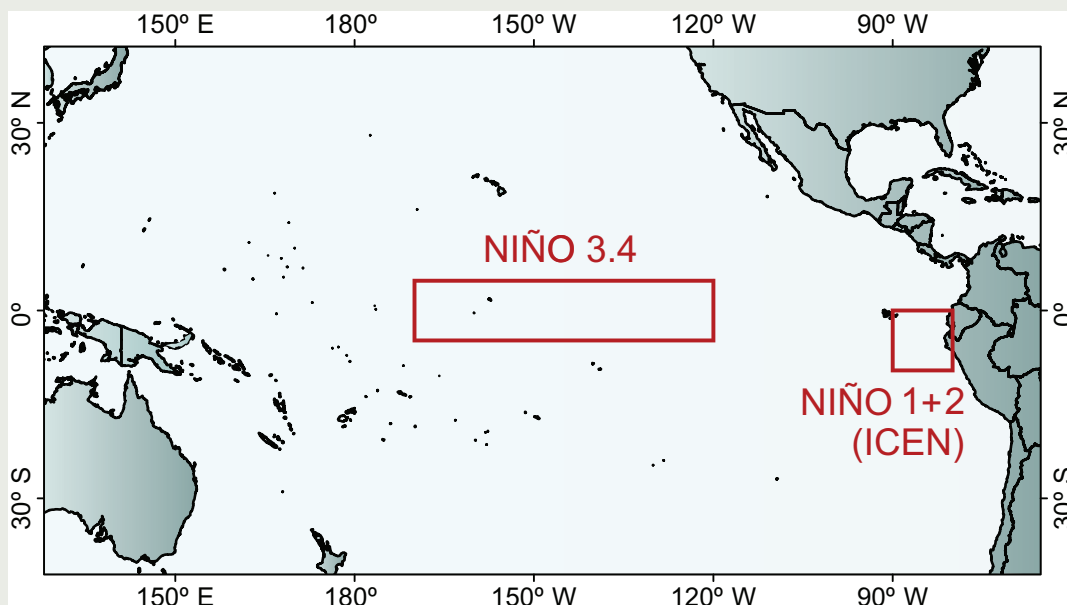
El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), conformado por representantes de IMARPE, DHN, IGP, SENAMHI, ANA e Indeci, es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.

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 Amazonía peruana.

Artículo de Divulgación Científica

¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama ?

Cerca de los 24°S y enfrentando la costa oriental de Sudamérica yace el desierto de Atacama, el más árido del planeta. El pueblo de Quillagua (21.6 6°S, 69 69°W), un oasis del Río Loa que nace en los Andes alimentando por la precipitación Altiplánica del verano, presenta la precipitación anual más pequeña de la que se tiene registro en el planeta (0.05 mm/ año, Middleton, 2001).

Los factores que explican la extrema sequedad del desierto son múltiples (ej. Rondanelli et al., 2015): (1) la posición de Atacama bajo la rama descendente de la circulación atmosférica conocida como la celda de Hadley (que explica la sequedad de otros desiertos subtropicales del planeta, como los de Sahara y Kalahari.) y (2) muchos otros factores que tienen su origen en las relativamente frías aguas que bañan la costa oriental de Sudamérica. Estas aguas frías están aparejadas a los vientos del sureste que terminan por converger en general al norte del Ecuador. Esto contrasta fuertemente con la costa oriental de Sudamérica a similares latitudes que Atacama, en donde lugares como Sao Paulo o Río de Janeiro experimentan frecuentes episodios de lluvia. La frialdad de la costa frente Atacama tiene múltiples consecuencias; por una parte la estabilidad atmosférica, una medida que tan fácil o difícil resulta la mezcla turbulenta de aire, la cual se ve intensificada por las bajas temperaturas costeras. La estabilidad a su vez, contribuye al desarrollo de la capa de nubes del tipo estratocúmulos que se encuentra ubicada de manera semi-permanente frente a la costa de Chile y Perú. El efecto de los Andes sobre la sequedad es controversial, pues si bien hay un fuerte contraste en la precipitación a ambos lados de la cordillera y pareciera existir un efecto de “sombra de precipitación” hacia el lado Pacífico asociado al bloqueo por los Andes de la entrada de aire húmedo desde la Amazonía y el océano Atlántico, simulaciones efectuadas con modelos atmosféricos globales indican que el remover los Andes solo conseguiría hacer más extensa la zona árida hacia el Oeste (Garreaud et al., 2011).

Por otra parte, un efecto adicional de los Andes en la hiperaridez de Atacama, es el calentamiento de las laderas de los Andes, que contribuye a la existencia de un ciclo diario de descenso del aire que refuerza la sequedad durante las horas de la tarde, inhibiendo la posible convección forzada por el calentamiento diurno (Rutllant et al., 2003), típica de las latitudes tropicales. Este descenso de aire adicional, dificulta que el Monzón sudamericano, activo durante los veranos en el Altiplano Andino penetre con precipitación estival hacia la costa. Un extremo climático como la hiperaridez de Atacama, requiere de esta conjunción de factores todos apuntando en la misma dirección hacia la mayor sequedad atmosférica.

Entonces, las pocas veces que llueve, resultan ser de mayor importancia pues estas excepciones pueden ayudar a entender los factores que determinan las condiciones normales y climatológicas de hiperaridez. La pregunta “¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama?” ilumina la pregunta más general respecto de cómo es que un lugar del planeta mantiene condiciones hiperáridas por cientos de años sin mayor alteración.



Dr. Roberto Rondanelli

Profesor en el Departamento de Geofísica, Universidad de Chile Centro del Clima y la Resiliencia, (CR)2

Profesor asistente del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile e investigador asociado del Centro del Clima y la Resiliencia CR(2). Sus intereses radican en el estudio de la dinámica del clima, en particular de la interacción mutua entre nubes, precipitación, vapor de agua y radiación. Durante sus estudios de doctorado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), EEUU, estudió la respuesta de la nubosidad y la precipitación respecto de la temperatura superficial del mar y su posible impacto en las realimentaciones climáticas en el clima de la tierra temprana. Actualmente trabaja en actividades de instrumentación meteorológica, desarrollando instrumentos y plataformas observacionales que permitan observaciones más flexibles y precisas de la atmósfera.

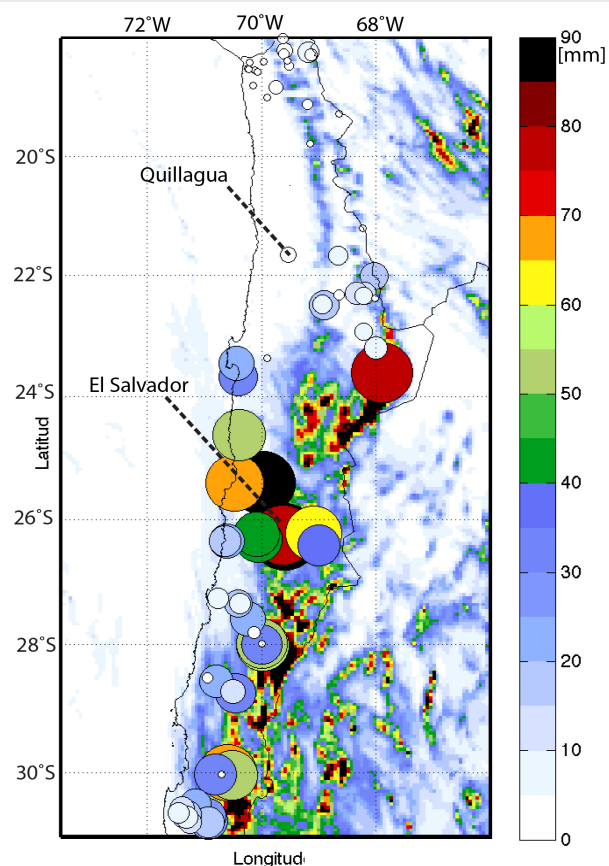


Figura 1: Distribución de la lluvia acumulada durante la tormenta del 24 al 26 de Marzo de 2015 en el Norte de Chile. Precipitación en mm totales, sombreado de color corresponde a una simulación numérica usando el modelo WRF (agradecimientos a Raúl Fuentes por efectuar la simulación). Los círculos corresponden a las estaciones pluviométricas disponibles.

¿Cómo llueve cuando llueve en Atacama ?

Roberto R.

Un caso excepcional reciente fue el de marzo de 2015. El día 24 comenzó a llover de manera tímida en la zona de la cuenca del Río Salado. En las estaciones cercanas a la mina El Salvador, se registraron valores de precipitación con una intensidad de hasta 10 mm/h y acumulaciones totales del orden de 10 a 20 mm. Otros 40 a 70 mm caerían durante el 25 de marzo, produciendo una crecida estimada que llegó a más de 1000 m³/s en la ciudad de Chañaral durante el día 25 (Wilcox et al., 2016), provocando la muerte de más de 30 personas y daños por cerca de US\$1500 millones (Kron, 2016), al tiempo que esta crecida puso a Chile dentro del "Top 10" en el triste resumen de los países con daños por catástrofes climáticas durante el año 2015 (Kreft et al., 2016). La distribución de las lluvias observadas y simuladas con un modelo numérico se presentan en la Figura 1. El oasis de Quillagua, recibió 4 mm, es decir, la precipitación equivalente a 80 años en solo 2 días.

¿Cuáles son los procesos físicos responsables de la precipitación de la tormenta?. Ciertamente, la causa más próxima puede atribuirse a la presencia de lo que se conoce como una baja segregada (conocida como "depresión aislada de niveles altos" en Perú), que consiste en una zona de aire más frío que se ubica en la tropósfera libre y que generalmente, tiene su origen en una masa de aire frío polar. Cuando ocurre una segregación se produce un ciclón en altura, este ciclón puede o no generar una circulación ciclónica en superficie. La figura 2 ilustra el proceso de segregación y la circulación ciclónica alrededor de la baja con el campo de vorticidad potencial. En este caso, la circulación ciclónica superficial ocurrió pero fue muy débil. Muchas bajas segregadas ocurren frecuentemente frente a la costa occidental de Sudamérica, sin generar ninguna alteración mayor en el tiempo atmosférico, y generalmente causando fuertes vientos y tormentas eléctricas en la alta cordillera.

Es así como la mera existencia de una circulación ciclónica no asegura la ocurrencia de precipitación, ni menos de la magnitud observada en Atacama durante Marzo de 2015. Asimismo, por muy intensa que sea la dinámica de un sistema, las condiciones locales ya discutidas, en particular un océano frío y poca disponibilidad de vapor de agua, hacen difícil la precipitación, aún en presencia de sistemas de mal tiempo que tengan el ascenso o la "dinámica seca" correcta.

La situación durante Marzo de 2015 presentaba la particularidad de la presencia de una anomalía de temperatura superficial del Mar frente a la costa de Perú, asociada al debilitamiento temporal de los vientos del sudeste (ej. Goubanova et al., 2015). Esta anomalía y en conjunto con una anomalía cálida en el Pacífico central, fueron la manifestación temprana del episodio de El Niño 2015-2016. La pregunta natural entonces es si ¿acaso esta lengua de agua más cálida pudiera tener algo que ver en la precipitación sobre la zona hiperárida?. En general, el vapor de agua que precipita sobre Chile proviene desde los trópicos, cruzando por miles de kilómetros sobre el océano Pacífico que está frío la mayor parte del tiempo. La temperatura del océano es importante pues es una variable que determina en parte la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. A mayor temperatura el contenido de agua atmosférico aumenta en una proporción exponencial. Intentando responder la pregunta de cuánto influyó la calidez anormal de las costas de Perú en la

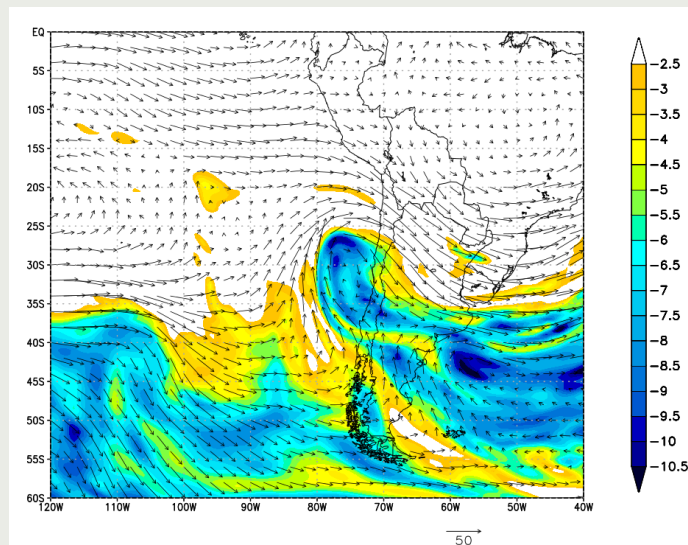


Figura 2: La figura ilustra los campos de viento y vorticidad potencial en una superficie isentrópica de 330 K. La vorticidad potencial es un trazador del flujo atmosférico. La figura ilustra el momento de la segregación del ciclón desde una vaguada profunda en el Atlántico el 25 de Marzo del 2015.

precipitación en la zona hiperárida, Bozkurt et al.(2016) diseñamos un experimento numérico mediante el cual, cambiando la temperatura en la zona frente a la costa de Perú en un modelo atmosférico pudimos comprobar primero, cómo en la simulación se redujo drásticamente la cantidad de vapor de agua transportado desde el Norte por la parte delantera de la baja segregada y seguidamente disminuyó la precipitación sobre el Desierto de Atacama, llegando en la zona hiperárida a desaparecer por completo. Es decir, bastó con restituir la temperatura a su valor climatológico, para que la lluvia no cayera sobre la zona hiperárida. Esta condición ocurrió principalmente por un cambio termodinámico, relacionado con la disponibilidad de vapor de agua, más que con un cambio dinámico, relacionado con una posible disminución del transporte desde el Noroeste.

Cabe hacer notar que además la tormenta ocurrió durante el periodo del año en que la temperatura superficial del mar es máxima, a finales del verano y principios del otoño del Hemisferio Sur. Es decir, además de la anomalía es necesario sumar dos elementos que intensificaron la severidad de la tormenta: en primer lugar el que la tormenta ocurriera a fines de Marzo con la máxima temperatura del año y por consiguiente con la máxima concentración de vapor de agua sobre el océano y en segundo término, al producirse con altas temperaturas, la línea de nieve se ubico entre los 4000 y 5000 metros durante la tormenta, lo que hizo que gran cantidad de precipitación cayera como lluvia y pasara rápidamente a los cauces de la región.

Para resumir, suele ser verdad que los elementos requeridos para producir un evento extremo como el ocurrido en Atacama, son múltiples, y todos deben apuntar en la misma dirección. En este caso, la disponibilidad de vapor de agua desde el Norte facilitó que la baja segregada organizara este vapor de agua en tormentas convectivas profundas que ocurrieron con inusual severidad sobre las pendientes de la cordillera occidental en las cuencas de los ríos Copiapó y especialmente El Salado. La baja segregada

generó la posibilidad de transportar el aire cálido y húmedo desde el norte y con la relativa inestabilidad en su parte delantera. Registros históricos y geológicos recopilados, hacen pensar que esta tormenta no tiene parangón al menos durante el Siglo XX. En el Siglo XIX llama la atención que las crónicas de Vicuña Mackenna (1877) indiquen el relato de una tormenta durante Julio de ese año: “lo que constituye la más notable peculiaridad del aguacero del 10 de Julio en Atacama, no es que lloviese en esas regiones cuando en el sur había escampado totalmente ... sino que su marcha fuera inversa , de norte a sur, como si el núcleo generador hubiese estado en el desierto en latitudes donde jamás llueve”.

Durante el 2017 retornaron a la costa del Perú las condiciones anómalas de temperatura similares a las observadas durante 2015, aunque sin la presencia de las intensas anomalías del Pacífico Central. Los ojos estuvieron puestos durante Febrero y Marzo en la posibilidad de una baja segregada que lograra organizar este transporte y pudiera generar una prematura repetición del evento 2015. Afortunadamente para la región de Atacama, esta repetición no ocurrió. No existió una perturbación importante que pudiese organizar tormentas de la magnitud de la gran

tormenta de Atacama 2015, salvo por lo que ocurrió a fines de Febrero de 2017 cuando una circulación ciclónica débil, ubicada cerca de los 33°S logró transportar vapor de agua, en forma de una lengua pegada a la costa y de manera similar a Marzo de 2015. Este transporte consiguió elevar el contenido de agua precipitable por sobre los 40 mm (cerca del triple de su valor climatológico) a lo largo de la costa entre el Sur de Perú y hasta Santiago (a una latitud de 33°S). Una serie de tormentas cálidas durante el día 25 produjeron aluviones cuyo origen está todavía en disputa pues también parece haber un aporte de vapor de agua desde el Atlántico como es típico de las tormentas de Verano en los Andes subtropicales (Viale y Garreaud, 2014). Sin embargo, los altísimos valores de agua precipitable a lo largo de la costa y la simultaneidad de las tormentas en una extensa franja Andina hacen sospechar nuevamente que la mano del aporte de vapor de agua desde la costa de Perú estuvo presente, si no como la causa próxima al menos como un factor catalizador de la convección sobre los Andes en estos episodios que causaron la suspensión del suministro de agua para millones de personas en el Centro de Chile.

Referencias

Barrett, B. S.; Campos, D. A.; Vicencio Veloso, J. & Rondanelli, R. (2016) Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

Bozkurt, D.; Rondanelli, R.; Garreaud, R. & Arriagada, A. (2016) Impact of Warmer Eastern Tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama Floods. *Monthly Weather Review*, 144, 4441-4460.

Goubanova, K., Illi, S., Dewitte, B., Takahashi, K., (2015): Variaciones intraestacionales de la temperatura superficial del mar en la costa del Perú. *Bol. Técn. El Niño IGP*, 2 (9), 4-8.

Kron, W. (2016) Floods in the Atacama Desert (Munich Re) <https://www.munichre.com/topics-online/en/2016/topicsgeo2015/floods-in-the-atacama-desert>

Garreaud, R. D.; Molina, A. & Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, 292, 39-50.

Kreft, Sö.; Eckstein, D. & Melchior, I. (2017) Global climate risk index: Who suffers most from extreme weather events Weather-related loss events in 2015 and 1996 to 2015, 2016 .

Middleton, N. (2003) *Going to Extremes* Pan Books, 129.

Rondanelli, R.; Molina, A. & Falvey, M. (2015) The Atacama Surface Solar Maximum *Bulletin of the American Meteorological Society*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 405-418

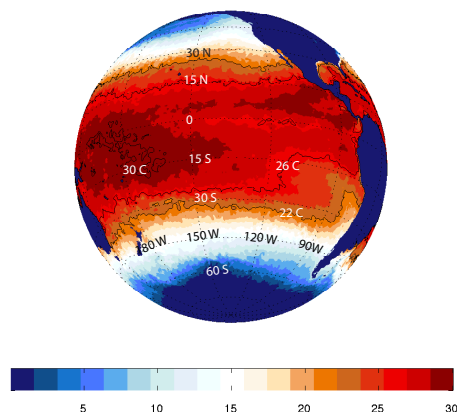
Rutllant, J. A.; Fuenzalida, H. & Aceituno, P. (2003) Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: the 1997--1998 *Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta (DICALIMA) experiment Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984--2012), 108

Viale, M. & Garreaud, R. (2014) Summer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes *Monthly Weather Review*, 142, 1074-1092

Vicuña Mackenna, B. (1877) *El clima de Chile. Ensayo histórico* Buenos Aires, Francisco de Aguirre, 1977. 399P.

Wilcox, A.; Escarriaza, C.; Agredano, R.; Mignot, E.; Zuazo, V.; Otárola, S.; Castro, L.; Gironás, J.; Cienfuegos, R. & Mao, L. (2016) An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library.

(a) Temperatura superficial del Mar 23 Marzo, 2015



(b) Anomalía de TSM respecto de Marzo (1988-2011)

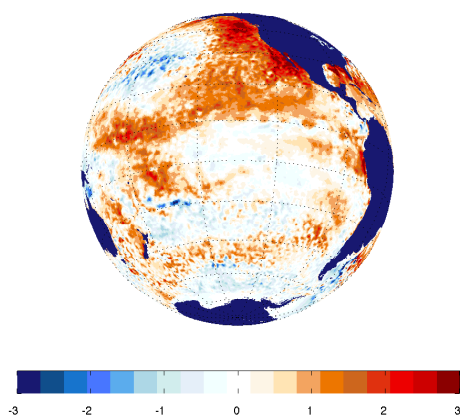


Figura 3 : (a) Distribución de la temperatura superficial del mar para el día 23 de Marzo de 2015 (datos infrarrojos, NOAA High Resolution Blended Analysis: Daily Values using AVHRR only). (b) Anomalías de Temperatura Superficial del Mar respecto de la climatología de Marzo (1988-2011) para Marzo 2015.

Diseño del Sistema HPC-Linux-Clúster del IGP

Oscar Santillán, Huber Gilt, Augusto Ingunza, Kobi Mosquera e Ivonne Montes
Instituto Geofísico del Perú

En la actualidad, ampliar el conocimiento de sistemas complejos, por ejemplo, los fenómenos geofísicos naturales y/o de los causados por la intervención humana (antropogénicos), que pueden generar importantes pérdidas socioeconómicas, implica la utilización de la técnica de modelado numérico como herramienta. Esta técnica contempla el comportamiento de un sistema expresado a través de ecuaciones matemáticas que serán resueltas en diferentes escalas de espacio y tiempo. Sin embargo, dichas expresiones matemáticas difícilmente pueden ser resueltas analíticamente y requieren computadoras para obtener resultados numéricos.

A nivel mundial con el desarrollo de la computación y las tecnologías informáticas que permiten tener dispositivos de mayor rendimiento, alta velocidad y bajo costo, el modelado numérico de procesos geofísicos emplean computadoras superiores a las convencionales capaces de resolver miles de millones de cálculos por segundo y por largos periodos de tiempo, debido a los niveles de complejidad que la investigación científica ha encontrado. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), desde 1998, ha sido pionero en el uso de esta tecnología para la simulación computacional del comportamiento de la atmósfera y el océano. Sin embargo, cada año aumentan las exigencias en cuanto a las características y complejidad de los modelos usados, lo que requiere incrementar la potencia de cómputo (Segura et al., 2014).

El IGP ha implementado recientemente en su Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos Computacional una nueva infraestructura computacional de alto rendimiento que, desde marzo de 2016, está a disposición de la comunidad científica y académica del país (Montes et al., 2016).

En este artículo se presentan algunas características y pautas que fueron seguidas para la implementación de la infraestructura computacional de alto rendimiento que, en adelante, será denominado **HPC-Linux-Clúster**.

Arquitectura del sistema HPC-Linux-Clúster

El HPC-Linux-Clúster implementado en el IGP es de tipo clúster, que puede ser definido como un aglomerado de equipos/servidores (unidades de procesamiento) que están interconectados y configurados para trabajar de manera conjunta. Este diseño es escalable, ya que se pueden añadir más unidades de procesamiento y su interconexión permite incrementar la velocidad de procesamiento mediante la paralelización, que consiste en dividir una tarea entre varios procesadores trabajando simultáneamente.

La aglomeración de las unidades de procesamiento puede ser definido de diferentes formas. La utilizada para el HPC-Linux-Clúster (Figura 1) emplea la tecnología Beowulf (Sterling et al., 1995), cuya arquitectura considera como hardware un nodo maestro o servidor principal, 20 nodos de cómputo conectados entre sí mediante una red InfiniBand de alta velocidad (56 Gigabits por segundo), y mediante una red Ethernet para la administración operativa.

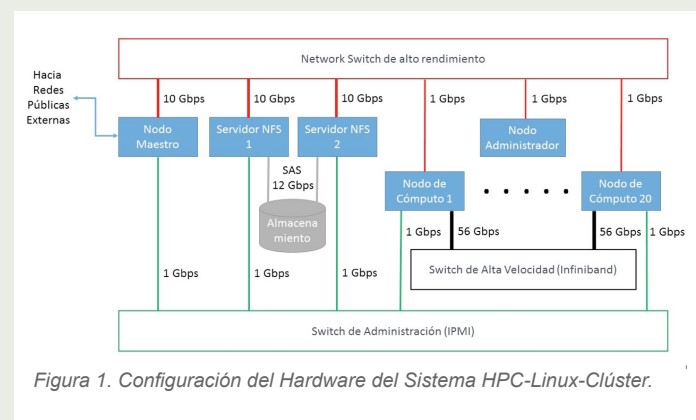


Figura 1. Configuración del Hardware del Sistema HPC-Linux-Clúster.

Estos elementos del hardware junto a un nodo administrador, ejecutan el sistema operativo libre Linux y softwares relacionados a cada nodo dependiendo de su función. Asimismo, se requiere de un sistema de clusterización para la ejecución de tareas científicas. También, existe una red interna

o privada de alto rendimiento, encargada de facilitar que todos los nodos computacionales puedan disponer del espacio físico en disco, a través del protocolo NFS (Network File System), en nuestro caso instalado en contingencia, que interactúan con un equipo de almacenamiento externo.

Con excepción del nodo maestro y el nodo administrativo, los nodos de cómputo no se encuentran equipados con un disco duro físico, ya que son encendidos a través de la red interna. Con el uso de la solución de software libre tipo DRBL (Diskless Remote Boot for Linux o inicio remoto sin disco para Linux). Para el HPC-Linux-Clúster del IGP, se usa una versión reducida del software BProc (Beowulf Distributed Process Space).

También forman parte del Sistema los diferentes equipos de comunicaciones de mediano y alto rendimiento, que permiten una adecuada administración y uso de los diferentes recursos de memoria, almacenamiento y de cómputo.

Cada nodo de cómputo y el nodo maestro están equipados con dos procesadores Intel Xeon E5-2680 de 3.5 GHZ, cada uno con 12 cores o núcleos, haciendo un total de 24 núcleos por nodo; logrando una sumatoria total de 480 núcleos (considerando los 20 nodos computacionales). Estos equipos también poseen cada uno 8 módulos de memoria tipo 2133 MT/s RDIMM de 16 Gigabytes (GB), totalizando 128 GB de memoria RAM por cada nodo.

El almacenamiento del nodo principal permite ofrecer a los usuarios del HPC-Linux-Clúster un espacio aproximado de 15 Terabytes (TB) de capacidad, sumado a un equipo de almacenamiento externo que contiene 60 discos tipo NLSAS de 6 TB configurados en un arreglo tipo RAID 6, permitiendo disponer de alrededor de 294 TB de almacenamiento externo.

Especificaciones del Software asociado al sistema HPC-Linux-Clúster

La instalación del software asociado al HPC-Linux-Clúster es un proceso de integración de varios sistemas de software, tal como se muestra en la Figura 2. Esta integración incluye un sistema operativo, programas compiladores, un sistema de red o de networking, un sistema de paralelización, un sistema de organización y planificación de trabajos, opcionalmente un sistema de monitoreo y, finalmente, un paquete de aplicaciones variado.

El sistema operativo seleccionado para el HPC-Linux-Clúster está basado en el denominado Open SUSE Linux LEAP versión 42.1, el cual se encuentra instalado tanto en el servidor principal como en el nodo administrativo.

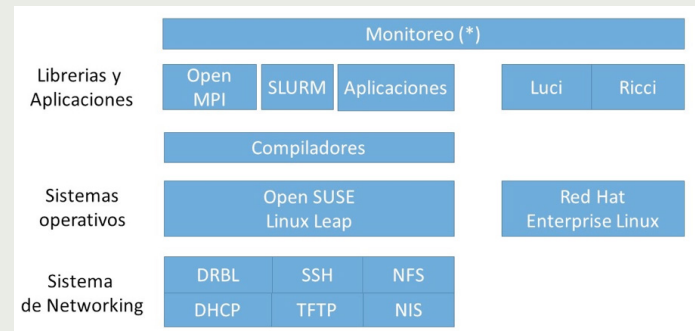


Figura 2. Estructura del Software del Sistema HPC-Linux-Clúster.

Adicionalmente, a los compiladores GNU (gcc, g++ y gfortran) instalados por defecto, se han incluido los compiladores de Intel C y C++ (icpc e icc) y Fortran Compiler 16 (ifort) que forman parte del software Parallel Studio; que instala importantes librerías para el modelamiento numérico y matemático.

El Sistema de paralelización elegido está basado en el modelo de programación denominado Open MPI (Open Source Message Passing Interface), que combina la experiencia, tecnología y recursos de toda la comunidad HPC (High Performance Computing), para obtener la mejor librería disponible para desarrolladores e investigadores científicos; la cual soporta múltiples trabajos y un procesamiento tolerante a fallos.

Para realizar el manejo y la administración de los múltiples nodos computacionales disponibles, y al mismo tiempo para manejar los distintos trabajos así como los recursos de hardware del Sistema, se hace uso del software denominado SLURM (Simple Linux Utility Resource Management); el cual organiza, planifica, contabiliza, asigna y define prioridades en la ejecución de los distintos trabajos para los diferentes usuarios, el cual permite a su vez administrar los resultados.

Para permitir que los diferentes usuarios del HPC-Linux-Clúster accedan al espacio en disco disponible en el almacenamiento externo, se ha instalado un mini clúster en los dos servidores NFS. Para ello, el sistema operativo seleccionado en dichos servidores es la versión 6.7 del denominado RHEL (Red Hat Enterprise Linux), sobre el cual se encuentra instalado y configurado los softwares llamados Luci y Ricci, que constituyen el Sistema

Diseño del Sistema HPC-Linux-Clúster del IGP

Oscar Santillán, Huber Gilt, Augusto Ingunza, Kobi Mosquera e Ivonne Montes
Instituto Geofísico del Perú

mini clúster antes señalado. Dicho Software permite acceder a los datos e información a través de un sistema de alta disponibilidad tolerante a fallos, ya que constantemente monitorea, controla y vigila la actividad o pasividad de ambos servidores NFS.

Completan el Sistema HPC-Linux-Clúster importantes equipos y sistemas de apoyo alterno, tales como los sistemas de manejo y administración de energía eléctrica (UPS, Generador, tableros eléctricos, sistemas de protección), los sistemas de aire acondicionado de precisión y de confort, una infraestructura física, de redes y comunicaciones, entre otros.

Todo lo antes descrito de forma resumida, constituye en gran parte lo que se conoce como el Sistema Computacional de Alto Rendimiento HPC-Linux-Clúster, que se encuentra a disposición de la comunidad científica y académica desde el año 2016. Para mayor información visite <http://scah.igp.gob.pe/laboratorios/dfgc>.

Referencias

- Abdelbaky, M. (2012) *A Framework for Enabling High-End High Performance Computing Resources as a Service*. New Brunswick Rutgers, 22-28.
- Chang, C.-T. Y. y. Y.-C. (2002) *An Introduction to a PC Cluster with Diskless Slave Nodes*. *Tungai Science*, 4, 25-46.
- Montes, I., et al. (2016) *Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster*. *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Instituto Geofísico del Perú, 9-10.
- Open MPI, s.f. *A High Performance Message Passing Library*. [En línea] Available at: <https://www.open-mpi.org>
- Robert Van Engelen, L.W., et al. (1996) *Automatic Code Generation for High Performance Computing in Environmental Modeling*. In *Proceedings of the 1996 EUROSIM Int'l Conf.*, June 10–12, 1996, Delft, The Netherlands, 421–428.
- Segura, B., et al. (2014) *Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos*. *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Instituto Geofísico del Perú, 1 Noviembre, 8-9.
- Sterling, T. (2002) *Chapter 1 - Introduction and Chapter 2 - An overview of Cluster Computing*. s.l.:MIT Press, 1-29.
- Sterling, T., et al. (1995) *Beowulf: A Parallel Workstation For Scientific Computation*, In *Proceedings of the 24th International Conference on Parallel Processing*.
- Tsung-Lung, L. (2011) *A Practical Guide to Building High-Performance Computing Clúster*. s.l.:National Chia-Yi University, 3-22.
- University of Maryland, s.f. *Division of Information Technology, High Performance Computing*. [En línea] Disponible: <http://www.glue.umd.edu/hpcc/help/slurm-vs-moab.html>
- Wikipedia, s.f. *Network Time Protocol (NTP)*. [En línea] Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Network_Time_Protocol

Resumen del Informe Técnico PPR/El Niño - IGP/ 2017-3

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

Resumen

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), con datos de anomalías de ERSST v3b para el mes de febrero de 2017 las condiciones climáticas de la costa peruana fueron Cálidas Débiles (+0.93°C), mientras que el ICENOI, usando datos de OI SST, indica Cálidas Moderadas (+1,60°C), al igual que en enero (+1,02°C). Los valores temporales del ICEN (ICENtmp) y el ICENOI (ICENOItmp) coinciden en mostrar condiciones Cálidas Moderadas para los meses de marzo y abril. Con tanto el ICEN o el ICENOI se confirma operacionalmente la presencia de El Niño costero iniciado en diciembre. La magnitud para el verano (diciembre-marzo) sería débil según ICEN, pero podría alcanzar moderada según ICENOI dependiendo de que se confirmen las condiciones moderadas en marzo.

Para el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI) de la NOAA de febrero 2017 corresponde a condiciones neutras, los valores estimados para los meses de marzo y abril también corresponden a condiciones neutras.

Para el mes de mayo, en el Pacífico oriental, tres de los siete modelos numéricos internacionales de NMME inicializados en abril predicen condiciones cálidas débiles, tres predicen cálidas moderadas y uno predice condiciones cálidas fuertes. Para el mes de junio, tres modelos predicen condiciones cálidas débiles, dos predicen condiciones cálidas moderadas y dos predicen condiciones cálidas fuertes. Para mayo en el Pacífico central, seis de los siete modelos de NMME predicen condiciones cálidas débiles y uno predice condiciones neutras. Los modelos climáticos de NMME coinciden en extender la duración de El Niño costero en curso hasta al menos durante octubre del 2017, consistente con la predicción del desarrollo de El Niño en el Pacífico central. Sin embargo, debido a la barrera de predictibilidad de otoño y la falta de acoplamiento océano-atmósfera observado, estas predicciones son inciertas.

Durante el mes de marzo, los datos observacionales de la profundidad de la termoclina entre 0.5°S y 0.5°N, muestran una onda Kelvin cálida que habría llegado ya a la costa americana. Esta onda Kelvin intraestacional, habría sido producto de la reflexión, en el extremo occidental de una onda Rossby cálida. Dicha onda Kelvin, que no presentó una propagación clara por la superposición a anomalías negativas interanuales en el Pacífico central, podría haberse amplificado como consecuencia de la presencia de anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental y/o por la profundidad de la termoclina que es más somera cerca de la costa americana.

Índice Costero El Niño

Utilizando los datos de Temperatura Superficial del Mar (TSM) promediados sobre la región Niño1+2, actualizados hasta el mes de marzo 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 febrero de 2017. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN	Condiciones costeras del mes
2016	Noviembre	0.37	Neutra
2016	Diciembre	0.43	Cálida Débil
2017	Enero	0.60	Cálida Débil
2017	Febrero	0.93	Cálida Débil

Tabla 1. Valores recientes del ICEN (ERSST v3b).
(Descarga: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>)

Los valores del ICENtmp, se estima que en marzo y abril 2017 las condiciones serían CÁLIDAS MODERADAS. El ICENtmp de marzo será confirmado cuando se disponga del valor de ERSST para el mes de abril de 2017.

Según el ICEN y el criterio de ENFEN (2012), El Niño costero habría empezado en diciembre 2016, verificando una magnitud débil para el verano (diciembre 2016-marzo 2017) y transicionando a condiciones cálidas moderadas de marzo 2017 a la fecha.

Como se indicó en el informe anterior (ver Anexo 1 en el Informe Técnico El Niño-IGP 2017-02), los datos de ERSST v3b para la región Niño 1+2 habrían subestimado las temperaturas en este verano. Por ello, también se estimó el ICENOI, que se calcula igual que el ICEN pero usando los datos mensuales de OISST.v2 y las climatologías de ERSST v3b (<http://www.met.igp.gob.pe/datos/climNino12.txt>).

Los valores del ICENOItmp estimados para marzo y abril 2017 corresponden a condiciones CÁLIDAS MODERADAS. El ICENOItmp de marzo será confirmado cuando se disponga del valor de OISST.v2 para el mes de abril de 2017.

Sobre la base de tanto el ICEN como el ICENOI, El Niño costero 2017 habría iniciado en diciembre 2016. Según el ICENOI, si el valor de marzo es cálido moderado, entonces la magnitud del evento El Niño costero sería moderada.

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 febrero de 2017, es de -0.18°C , correspondiente a condiciones Neutras¹.

Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

En la región Niño 3.4 las anomalías de la TSM (IR, MW, OSTIA) mostraron condiciones neutras, alcanzando la anomalía promedio de $+0.3^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la actividad convectiva continuó mostrándose anómalamente reducida, similares a los de La Niña débil en el océano Pacífico central, consistente con la respuesta a las anomalías negativas del gradiente zonal de TSM en el Pacífico central. Según la propuesta de DiNezio (2016), quien señala 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, mostrando sus anomalías máximas cercanas a $+3.1^{\circ}\text{C}$, $+2.4^{\circ}\text{C}$ y $+3.3^{\circ}\text{C}$ según los productos de microondas, OSTIA, e IR 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 la de mayor magnitud del último año, a pesar de que la TSM en el Pacífico central se encuentra neutral. En el Pacífico oriental ecuatorial (al este de 160°W) se presentaron ligeras anomalías de vientos del este, continúan las anomalías del viento del norte y la intensa (debilitada) ZCIT al sur (norte) del ecuador, así como el gradiente norte-sur en la ATSM, indicando continuación del acoplamiento a través del mecanismo “wind-evaporation-SST”, que puede hacer persistir esta situación. El contenido de calor oceánico ecuatorial ha presentado tendencia a disminuir en los últimos días del mes, mientras que la inclinación de la termoclina se presentaron alrededor de lo normal. Por otro lado, la termoclina en el Pacífico oriental, en 110°W mostró anomalías positivas, cercanas a sus condiciones normales, mientras que en 95°W se observó anomalías positivas, próximo a los 20 m, sin embargo, mostró disminución a finales del mes, llegando a valores negativos, según TAO y ARGO.

Según los datos de ARGO+TAO (Figura 1b), se observan anomalías positivas débiles (alrededor de 15 metros en promedio) en la región oriental ($110^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{W}$).

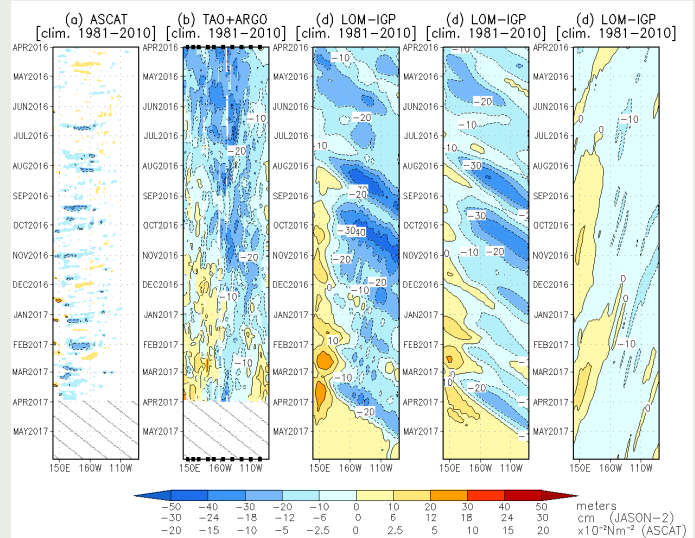


Figura 1.- Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO y los derivados de ARGO (b), derivado, diagrama de la onda Kelvin y Rossby (c), diagrama de la onda Kelvin (d) y finalmente diagrama de la onda Rossby, 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 m/s. (Elaboración: IGP)

Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

Los datos observacionales de la profundidad de la termoclina muestran una señal positiva en el extremo oriental, al este de 120°W , que podría estar relacionada con una onda Rossby cálida (Fig.1b), la cual, según los modelos numéricos de ondas, sería producto de la reflexión de la onda Kelvin cálida que arribó a la costa de Sudamérica en el mes de marzo tras ser generada en el extremo occidental y reforzada por la anomalía de vientos del oeste en el Pacífico oriental. Esta onda Rossby cálida contribuiría a mantener el incremento de la profundidad de la termoclina, al menos hasta abril.

Durante el mes de marzo, los datos observacionales de la profundidad de la termoclina entre $0.5^{\circ}\text{S}-0.5^{\circ}\text{N}$, muestran una aparente presencia de una onda Kelvin cálida en el extremo oriental que habría llegado a la costa americana (Figura 1b) y que según los resultados del modelo lineal, sería de una escala de tiempo intraestacional (periodos entre 30 y 120 días) que se habría formado como consecuencia de la reflexión, en el extremo occidental de una onda Rossby cálida. Sin embargo, esta onda estuvo superpuesta a anomalías negativas interanuales en el Pacífico central, por lo que no presentó una propagación clara y no habrían permitido identificar esta onda claramente. Por otro lado, esta onda Kelvin cálida intraestacional podría haberse amplificado como consecuencia de la presencia de anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental y/o por la profundidad de la termoclina que es más somera cerca de la costa americana.

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

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2017-3

En escalas de tiempo intraestacional (periodos entre 30 y 120 días), los modelos oceánicos lineales, forzados con vientos ASCAT, muestran la presencia de una onda Kelvin cálida débil que arribaría a la costa peruana a inicios de abril. Luego, usando los mismos resultados numéricos, llegaría una onda Kelvin fría, aparentemente también débil. Finalmente, existe la posibilidad que una onda Kelvin cálida formada por la reflexión de una onda Rossby cálida en el extremo occidental durante marzo y alcance el extremo oriental en el mes mayo.

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2), para el mes de mayo, 1 de los 7 modelos climáticos de NMME (CFSv2, NASA_GEOS5, FLOR, CM2.1, NCAR_CCM4, CMC1 y CMC2) inicializados en abril indica condiciones cálidas fuertes, 3 modelos pronostican condiciones cálidas moderadas, y 3 modelos indican condiciones cálidas débiles. Para el mes de junio, 2 de 7 modelos indican condiciones cálidas fuertes, 2 modelos pronostican condiciones cálidas moderadas, y 3 modelos predicen condiciones cálidas débiles (Figura 2). El promedio de los modelos extiende el evento El Niño costero hasta al menos octubre 2017, con magnitud moderada hasta setiembre. Si bien los pronósticos para mayo y junio inicializados en abril son relativamente confiables, la barrera de predictibilidad introduce incertidumbre para los siguientes meses (Reupo y Takahashi, 2014).

Para el Pacífico central (Niño 3.4), 1 de 7 modelos de NMME inicializados en abril predicen condiciones neutras para el mes de mayo y 6 de 7 modelos predicen condiciones cálidas débiles. Para el mes de junio, se observan seis modelos con condiciones cálidas débiles y un modelo con condiciones cálidas moderadas. Entre los meses de julio y octubre se observa que los modelos incrementan sus anomalías, observándose el modelo GFDL con condiciones cálidas fuertes entre los meses de julio y octubre, de forma similar para el modelo GFDL_FLOR para los meses de setiembre y octubre, pero en general esto debe tomarse con cuidado debido a la barrera de predictibilidad, además de la falta de acoplamiento observada entre la atmósfera ecuatorial y las anomalías positivas de TSM, particularmente la falta de las anomalías de vientos del oeste características del proceso de retroalimentación de Bjerknes.

Para el mes de mayo, los modelos NMME pronostican lluvias sobre lo normal en la costa norte de Perú en mayo, pero esto es dudoso ya que la TSM y precipitación en esta región no es bien representada por los modelos y en mayo estacionalmente se esperaría la desactivación del mecanismo de interacción océano-atmósfera asociada a la ZCIT (Takahashi y Martínez, 2016).

Conclusiones:

El ICEN, según los datos ERSST v3b para febrero de 2017 fue de 0.93 (Cálida Débil) y el ICENtmp para marzo y abril de 2017 es 1.34 (cálida moderada) y 1.42 (cálida moderada). El ICENOI, estimado con los datos de OISSTv2

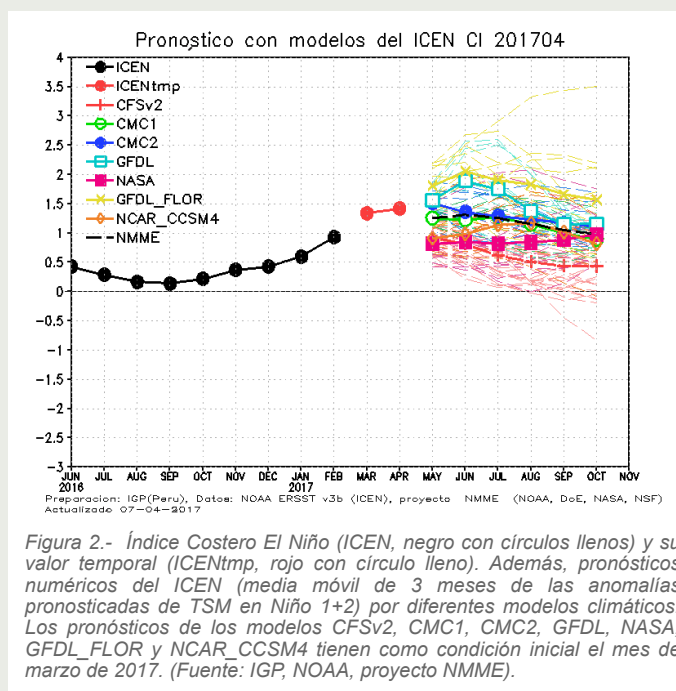


Figura 2.- Índice Costero El Niño (ICEN, negro con círculos llenos) y su valor temporal (ICENtmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de 3 meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Los pronósticos de los modelos CFSv2, CMC1, CMC2, GFDL, NASA, GFDL_FLOR y NCAR_CCSM4 tienen como condición inicial el mes de marzo de 2017. (Fuente: IGP, NOAA, proyecto NMME).

para el mes de febrero de 2017 es 1.60 (Cálida Moderada) y el ICENOItmp para marzo y abril de 2017 es 1.63 (cálida moderada) y 1.52 (cálida moderada).

En el Pacífico central, el ONI de enero (DEF) correspondió a condiciones neutras, lo cual indica el fin del evento La Niña en diciembre. El ONI estimado para febrero y marzo corresponde a condiciones neutras. La ATSM en la región Niño 3.4, durante este marzo, ha fluctuado alrededor de los 0.3°C.

El contenido de calor oceánico ecuatorial ha presentado valores ligeramente positivos, mientras que la inclinación de la termoclina se presentó dentro de su variación normal.

Según TAO y NCEP/NCAR reanalysis, las anomalías de viento del oeste en el Pacífico oriental ecuatorial se redujeron a inicios de marzo pero luego se recuperaron. Los datos de ASCAT, por otro lado, muestran mayor predominio de anomalías del este. La convección anómala en el extremo oriental está aumentando ligeramente, consistente con un acoplamiento incipiente que podría ayudar al mayor desarrollo de condiciones cálidas.

En el Pacífico occidental continuaron las anomalías del este, consistente con una respuesta a los gradientes zonales de TSM, con las anomalías más fuertes desde el 2016 a finales de febrero e inicios de marzo. Consistente con esto, la actividad convectiva en el Pacífico central en marzo continuó mostrándose anómalamente reducida, similares a los de La Niña débil.

En el Pacífico oriental ecuatorial (5°S-5°N), continúan las anomalías de vientos del norte y la intensa (debilitada) ZCIT al sur (norte) del ecuador, así como el gradiente nortesur en la ATSM (sur más cálido), indicando continuación del acoplamiento a través del mecanismo "wind-evaporation-SST" que puede hacer persistir esta situación. Sin

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2017-3

embargo, estacionalmente la presencia de la ZCIT sur no persiste más allá de abril, por lo que el acoplamiento podría desactivarse.

Se espera que la onda Kelvin cálida, producto de la reflexión de una onda Rossby cálida en el extremo occidental y aparentemente ayudada por la anomalía de vientos del oeste en el Pacífico oriental, se refleje en una onda Rossby cálida que contribuiría al incremento de la profundidad de la termoclina al este de 120°W, al menos hasta abril, según los modelos numéricos de ondas. Los datos observacionales de la profundidad de la termoclina muestran una señal positiva en el extremo oriental que podría estar relacionada con la onda Rossby cálida en mención.

Durante el mes de marzo, los datos observacionales de la profundidad de la termoclina entre 0.5°S-0.5°N, muestran una aparente llegada a la costa americana de una onda Kelvin cálida intraestacional en el extremo oriental que, según los resultados de los modelos lineales, se habría generado por reflexión de una onda Rossby en el extremo occidental y amplificada por anomalías de vientos del oeste en el Pacífico oriental y por la menor profundidad de la termoclina cerca de la costa americana. Esta onda estuvo superpuesta a anomalías negativas interanuales en el Pacífico central, por lo que no presentó una propagación clara.

Los modelos numéricos oceánicos lineales, forzados con productos de viento de ASCAT, indican la presencia de una onda Kelvin cálida débil intraestacional que arribaría a la costa peruana a inicios de abril. Luego llegaría una onda Kelvin fría intraestacional de magnitud débil. Finalmente, exista la posibilidad que una onda Kelvin cálida, formada por la reflexión de una onda Rossby cálida en el extremo occidental durante marzo, alcance el extremo oriental en el mes de mayo.

Para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2), los pronósticos de los modelos climáticos de NMME inicializados en abril para el mes de mayo indican: 1 de 7 modelos predicen condiciones cálidas fuertes, 3 modelos pronostican condiciones cálidas moderadas, y 3 modelos predicen condiciones cálidas débiles. Para el mes de junio, 2 de 7 modelos predicen condiciones cálidas fuertes, 2 modelos pronostican condiciones cálidas moderadas, y 3 modelos predicen condiciones cálidas débiles. Los pronósticos extienden el evento El Niño costero hasta al menos octubre 2017.

Para el Pacífico central (Niño 3.4), para el mes de mayo, 1 de los 7 modelos de NMME predicen condiciones neutras y 6 modelos predicen condiciones cálidas débiles. Para el mes de junio, se observan 6 modelos con condiciones cálidas débiles y 1 modelo con condiciones cálidas moderadas. Entre los meses de julio y octubre se observa que los modelos incrementan sus anomalías, observándose el modelo GFDL con condiciones cálidas fuertes entre los meses de julio y octubre, de forma similar para el modelo GFDL_FLOR para los meses de setiembre y octubre, pero en general esto debe tomarse con cuidado debido a la barrera de predictibilidad y la falta de acoplamiento océano-atmósfera observado. Considerando 4 modelos

inicializados en marzo, se observa condiciones cálidas débiles para los meses de mayo y junio

Si bien varios modelos pronostican el desarrollo de El Niño en el Pacífico central y la persistencia de El Niño costero, este pronóstico parece basarse en la expectativa de que el calentamiento en el Pacífico oriental ecuatorial active la convección profunda en esta región y los vientos del oeste asociados. Sin embargo, la configuración atmosférica actual a gran escala continúa similar a la de La Niña a pesar del calentamiento. Los modelos hicieron un pronóstico similar en el año 2014 que no se concretó, a pesar de que ese año las condiciones eran más favorables a El Niño que en este. En general, asociado con la llamada barrera de predictibilidad de otoño, los pronósticos numéricos son más confiables a partir de mayo.

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 Peru. 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 Meteorologia, 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° 06- 2017 Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño Costero¹**

El Comité Multisectorial ENFEN prevé la continuación del evento El Niño costero por lo menos hasta abril, con una magnitud moderada. Existe una alta probabilidad de lluvias muy fuertes en las zonas medias y bajas de la costa, principalmente en Tumbes, Piura y Lambayeque hasta el mes de abril, aunque esta probabilidad irá reduciéndose de acuerdo a la estacionalidad de la temporada de lluvias. Por lo tanto, el Comité Multisectorial ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", durante el cual mantendrá un monitoreo intenso de las condiciones, actualizando las perspectivas en frecuencia quincenal.

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas correspondiente a la primera quincena de marzo de 2017.

En la región del Pacífico Central (región Niño 3.4), la anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) presentó valores en el rango neutro. Asimismo, en la primera quincena del mes se observó que las anomalías de vientos del oeste se debilitaron en la región del Pacífico Oriental hasta el Pacífico Central, favoreciendo la leve disminución de la anomalía de la TSM en dicha región.

En la región Niño 1+2, que abarca la zona norte del mar peruano, las aguas superficiales presentaron en su mayor parte TSM de 28°C (Figura 1). La anomalía semanal de la TSM alcanzó un valor de +2,1°C del 05 al 11 de marzo (Figura 2).

El valor del Índice Costero El Niño (ICEN) para el mes de enero, usando los datos de la fuente NCEP OI SST v2 para diciembre 2016 a febrero 2017, es +1,03°C. Este valor corresponde a condiciones cálidas moderadas, lo cual es consistente con otros datos observados y analizados. Asimismo, utilizando esta misma fuente, los valores estimados del Índice Costero El Niño (ICENTmp) de febrero y marzo también corresponderían a condiciones cálidas moderadas.

En el litoral, las anomalías diarias de la TSM continuaron entre +4°C y +6°C en la zona norte, mientras que en el centro se presentaron en el rango entre +2°C y +4,5°. De San Juan al sur, las anomalías fluctuaron entre +0,7°C y -1°C (Figura 3). Por otro lado, las anomalías diarias del nivel medio del mar (NMM) aumentaron significativamente a principios de marzo, principalmente en la costa norte, alcanzando +21 cm en Paita, lo cual es consistente con la propagación de la onda Kelvin cálida.

Las anomalías de las temperaturas extremas del aire superaron los valores de la segunda quincena de febrero. En la costa norte se registraron anomalías de +1,7°C en la temperatura máxima y +1,1°C en la temperatura mínima. En la costa central, las anomalías fueron de +2,3°C en la temperatura máxima y la temperatura mínima; y en la costa sur las anomalías fueron de +1,2°C y +1,1°C, respectivamente.

En promedio, el Anticiclón del Pacífico Sur continuó debilitado en la primera quincena. Los vientos costeros provenientes del sur presentaron una ligera y breve intensificación frente a la costa central y sur. Sin embargo, en el resto del litoral predominaron vientos débiles con incursión de vientos del norte en la capa superficial y niveles bajos de la atmósfera hasta La Libertad. La banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) continuó presentándose bien desarrollada, alcanzando la zona frente a Chimbote en altamar. En conjunto estas condiciones han contribuido a la persistencia del calentamiento del mar frente a la costa centro-norte del Perú.

Por efecto de las altas temperaturas del mar y condiciones atmosféricas favorables, se presentaron lluvias de magnitud muy fuerte² en las zonas bajas y medias de Tumbes, Piura y Lambayeque, así como lluvias fuertes en las zonas bajas y medias de La Libertad y Ancash. En la estación meteorológica Partidor (Tambogrande), Piura, el día 03 ocurrió la precipitación más alta de todo su registro histórico, que data desde 1963 (258,3mm). En Jayanca, Lambayeque, el día 04 se registró el segundo valor más alto de toda la serie histórica, que data desde 1963 (113m). Asimismo, en lo que va de la temporada, si bien la precipitación acumulada en las partes bajas de Piura es sustancialmente menor que la observada en el año 1998, es probable que alcance una magnitud comparable a la de El Niño de 1925, la tercera más alta del último siglo después de 1998 y 1983.

Producto de las intensas precipitaciones, mayormente en la costa norte y centro, los ríos han incrementado sus caudales llegando a niveles por encima de sus umbrales de emergencia. Asimismo se presentaron activaciones de quebradas en zonas medias y bajas de las cuencas. Como consecuencia, los reservorios

tuvieron una tendencia ascendente respecto a su almacenamiento de agua; en la costa norte alcanzaron un 77% y en la costa sur un 63%, respecto a su capacidad hidráulica útil.

Las estaciones fijas oceanográficas de Paita, Chicama y Callao mostraron una profundización de las isotermas hasta los 100 metros, debido a la propagación de la onda Kelvin cálida. En la capa superficial entre 0 y 30 metros, frente a Paita, se mantuvieron anomalías de hasta +5°C. Frente a Chicama y Chimbote se detectó incrementos térmicos con anomalías que superaron los +7°C. Frente a Callao, el calentamiento alcanzó una anomalía de +4°C. En cambio, en la zona costera de Ilo, las condiciones térmicas fueron normales, mientras que por fuera de las 30 millas, se presentaron anomalías negativas sobre los 50 metros de profundidad. La proyección hacia el sur de Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) de baja salinidad hasta Chimbote, la aproximación de las Aguas Subtropicales Superficiales (ASS) a la costa de Callao y el paso de la onda Kelvin cálida continúan contribuyendo al calentamiento superficial de las aguas costeras.

La clorofila-a, indicador de la producción del fitoplancton, que es base de la cadena alimenticia en el mar, continuó mostrando en la primera quincena anomalías negativas en la zona central y norte, mientras que anomalías positivas de Pisco hacia el sur, debido a la reactivación del afloramiento costero en esta última zona.

Los indicadores reproductivos de la anchoveta en la región norte-centro continuaron presentando una disminución en la actividad desovante. Persistió la presencia de especies oceánicas, indicadoras de aguas cálidas, como agujilla, bonito y barrilete, principalmente en la zona norte. La 'munida', indicador de aguas frías, se registró principalmente en la región sur.

PERSPECTIVAS

Se estima que el Niño Costero en curso se extendería por lo menos hasta abril. Para las próximas semanas, se espera que la TSM frente a la costa norte continúe presentando valores de 28°C y de hasta 29°C, contribuyendo a la alta probabilidad de lluvias muy fuertes en las zonas medias y bajas de la costa, principalmente en Tumbes, Piura y Lambayeque, aunque esta probabilidad irá reduciéndose de acuerdo a la estacionalidad de la temporada de lluvias.

Este pronóstico está asociado al calentamiento observado, a la influencia acumulativa de las ondas Kelvin cálidas, de las cuales la más reciente continúa impactando la costa central y norte, a la persistencia de la banda secundaria de la ZCIT observada, a las anomalías de vientos del norte y a los procesos de retroalimentación océano-atmósfera en el Pacífico Oriental. Esto es consistente con la mayoría de los modelos climáticos internacionales. Si bien hay una onda Kelvin fría desplazándose hacia la costa sudamericana, esta no sería suficiente para disipar las anomalías cálidas. En conjunto, estas condiciones han incrementado la probabilidad de que El Niño costero alcance una magnitud moderada.

De acuerdo con todos los modelos climáticos de las agencias internacionales, en la región Niño 1+2 continuarían las condiciones cálidas al menos hasta otoño, mientras que para la región Niño 3.4 se presentarían condiciones cálidas desde el mes de mayo. Cabe indicar que los pronósticos para otoño en adelante no son tan confiables debido a la barrera de predictibilidad.

Tomando en consideración el monitoreo y el análisis del Comité Multisectorial ENFEN; así como, los resultados de los modelos de las agencias internacionales, el ENFEN prevé la continuación del evento El Niño costero al menos hasta el mes de abril inclusive, con magnitud moderada.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao, 16 de marzo de 2017

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. 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).

²"Lluvias muy fuertes" se definen como el percentil 95% de la precipitación diaria; "lluvias fuertes" se definen como el percentil 90% de la precipitación diaria y "lluvias extremas" se definen como el percentil 99% de la precipitación diaria.



Comunicado Oficial ENFEN

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



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 07- 2017 Estado del sistema de alerta: **Alerta de El Niño Costero¹**

El Comité Multisectorial ENFEN prevé la continuación del evento El Niño costero de magnitud moderada, que está definida según la anomalía de la temperatura superficial del mar, por lo menos hasta mayo. No obstante, la probabilidad de lluvias muy fuertes en las zonas medias y bajas de la costa, principalmente entre Tumbes y La Libertad, se irá reduciendo durante el mes de abril, de acuerdo a la estacionalidad de la temporada de lluvias.

Por lo tanto, el Comité Multisectorial ENFEN mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero", durante el cual continuará un monitoreo intenso de las condiciones, actualizando las perspectivas en frecuencia quincenal.

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas correspondiente a la segunda quincena de marzo de 2017.

En la región del Pacífico Central (región Niño 3.4), la anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) continuó presentando valores en el rango neutro. En el Pacífico Occidental y Central se presentaron anomalías de vientos del este, mientras que en el Pacífico Oriental las anomalías de vientos del oeste, luego de un debilitamiento parcial en la primera quincena de marzo, se recuperaron en la última semana.

En la región Niño 1+2, que abarca la zona norte del mar peruano, continuaron presentándose valores de TSM de 28°C, pero en la última semana se observó un repliegue de las aguas más cálidas hacia el norte de dicha región (Figura 1). La anomalía semanal de la TSM alcanzó un valor máximo de +2,6°C del 12 al 18 de marzo, descendiendo a +2,2°C en la semana siguiente (Figura 2).

Los valores estimados del Índice Costero El Niño (ICENTmp) de febrero y marzo, usando los datos de la fuente NCEP OI SST v2, corresponden a condiciones cálidas moderadas.

En el litoral, las anomalías diarias de la TSM alcanzaron un valor máximo de hasta +10°C entre Chicama y Salaverry hacia mediados del mes. Entre Talara y el litoral de Lambayeque las anomalías diarias fluctuaron entre +4°C y +6°C. En Chimbote, estos valores alcanzaron +6°C en la tercera semana, para luego descender a +5°C en la última semana del mes. En la costa central las anomalías diarias fluctuaron alrededor de +3°C. De Mollendo al sur, los valores de la TSM variaron alrededor de su normal (Figura 3). Por otro lado, las anomalías diarias del nivel medio del mar (NMM) exhibieron un nuevo incremento a fines de mes, lo cual es consistente con la llegada de una nueva onda Kelvin cálida, desarrollada en el Pacífico Oriental.

Las anomalías de las temperaturas extremas del aire aumentaron en la costa central. En el norte se registraron anomalías de +0,9°C en la temperatura máxima y +1,1°C en la temperatura mínima. En la costa central, las anomalías fueron de +2,5°C en la temperatura máxima y mínima. En la costa sur las anomalías fueron de +1,2°C y +1,0°C, respectivamente.

En promedio, el Anticiclón del Pacífico Sur se fortaleció en la segunda quincena de marzo incidiendo en el progresivo incremento de vientos del sur frente a la costa sur y central, no así en el litoral norte, donde predominaron vientos débiles con incursión de vientos del norte inclusive. La banda secundaria de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) continuó presentándose bien desarrollada, aunque en los últimos días del mes se observó un desplazamiento hacia el norte. En conjunto estas condiciones han contribuido a la disminución de la TSM en el litoral centro y sur, principalmente, en la última semana.

Por efecto de las altas temperaturas del mar y condiciones atmosféricas favorables, se presentaron algunas lluvias de magnitud extremadamente fuerte² en las zonas bajas y medias de Piura y Lambayeque, así como lluvias muy fuertes en las zonas bajas y medias de Tumbes, La Libertad y Ancash. Asimismo, en lo que va de la temporada lluviosa, la precipitación acumulada en las zonas bajas de Piura y Lambayeque es aún menor que lo observado en el mismo periodo durante El Niño 1997/1998, similar a lo acumulado durante El Niño 1982/1983 al mes de marzo y posiblemente superior a lo estimado para El Niño de 1925.

Producto de las intensas precipitaciones, la mayoría de los ríos del Perú de la vertiente occidental presentaron caudales promedios diarios por encima de sus valores normales e inclusive superaron niveles de emergencia en la costa centro

y costa norte. Asimismo se presentaron activaciones de quebradas secas con arrastre de sólidos. Resaltan caudales históricos en el río Piura, por encima de los 3,000 m³/s. Las reservas hídricas en la costa norte promediaron 87% respecto a la capacidad hidráulica de los principales embalses. En la costa sur, la mayoría de los embalses mostraron una tendencia ascendente, operando en promedio al 79% de su capacidad hidráulica útil.

La estación oceanográfica de Paita mostró una profundización de las isoterms hacia fines de marzo, generando anomalías mayores a +3°C sobre los 80 m de profundidad, mientras que las Aguas Ecuatoriales Superficiales (AES) y Aguas Tropicales Superficiales (ATS), ambas cálidas y de baja salinidad, alcanzaron los 60 m y 20 m de profundidad, respectivamente. Frente a Chicama, el día 27 se observó una ligera disminución de la temperatura, manteniéndose las AES hasta los 20 m de profundidad. Las estaciones oceanográficas de Callao hacia el sur presentaron una estructura térmica donde predominaron anomalías positivas por debajo de los 50 m, lo cual sugiere la persistencia de la influencia de la onda Kelvin cálida que arribó a la costa a inicios de marzo, aunque sobre los 50 m la condición dominante fue fría, posiblemente a consecuencia de la intensificación de los vientos superficiales del sur.

La clorofila-a, indicador de la producción del fitoplancton, que es base de la cadena alimenticia en el mar, mostró en la segunda quincena anomalías negativas en la mayor parte de la costa (menor productividad), con algunos núcleos costeros de anomalías positivas en la zona central y sur.

PERSPECTIVAS

Para las próximas semanas, se espera que la TSM frente a la costa norte disminuya, pero sus anomalías positivas podrían persistir al menos hasta el mes de mayo, prolongándose la duración de El Niño costero. No obstante, la probabilidad de lluvias muy fuertes en las zonas medias y bajas de la costa entre Tumbes y La Libertad irá reduciéndose durante el mes de abril.

El pronóstico se basa en: 1) El acoplamiento océano-atmósfera observado frente a la costa de Sudamérica, entre el calentamiento costero, la banda secundaria de la ZCIT y las anomalías del viento del norte, decaería a lo largo de abril tanto por la estacionalidad de la TSM y lluvias y por la posible persistencia de vientos alisios del sur intensos. 2) La posible persistencia de las anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Oriental, retroalimentada por el mayor calentamiento de esta región en relación al Pacífico Central, generando más ondas Kelvin cálidas.

Si bien algunos datos observacionales y los resultados de los modelos oceánicos lineales muestran una onda Kelvin fría desplazándose a lo largo de la línea ecuatorial hacia la costa sudamericana, esta no sería suficiente para disipar las anomalías cálidas.

Lo señalado en los párrafos anteriores, es consistente con la mayoría de los modelos climáticos internacionales en los próximos dos meses, aunque si bien varios de estos predicen la continuación de las condiciones cálidas en el Pacífico Oriental y el inicio de El Niño en el Pacífico Central en lo que resta del año, sus pronósticos a mediano plazo no son tan confiables debido a la "barrera de predictibilidad" en el otoño austral.

Tomando en consideración el monitoreo y el análisis experto del Comité Multisectorial ENFEN; así como, los resultados de los modelos de las agencias internacionales, se prevé la continuación del evento El Niño costero de magnitud moderada, al menos hasta el mes de mayo.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao, 30 de marzo de 2017

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. 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 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).

²"Lluvias muy fuertes" se definen como el percentil 95% de la precipitación diaria; "lluvias fuertes" se definen como el percentil 90% de la precipitación diaria y "lluvias extremadamente fuertes" 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

 https://www.youtube.com/c/igp_videos

En el marco del:

